

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



## Сборник научных трудов

V международной научно-практической конференции  
«САПР и моделирование в современной электронике»

Брянск, 21 – 22 октября 2021 г.

Брянск  
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Брянский государственный технический университет

# **«САПР И МОДЕЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ»**

V международная  
научно-практическая конференция  
(Брянск, 21 – 22 октября 2021 г.)

Сборник научных трудов

Под общей редакцией А.Ю. Дракина

Брянск  
2021

УДК 621.37/.39:658.011.56  
ББК 30.2-5-05  
С19

*Утверждено редакционно-издательским советом БГТУ*

**С19 САПР и моделирование в современной электронике:** сб. науч. тр.  
V международной научно-практической конференции, 21-22 октября  
2021 г./ под общ. ред. А.Ю. Дракина. – Брянск: Издательство «Новый  
формат», 2021. – 339 с.

ISBN 978-5-00202-004-1

DOI: 10.30987/collection\_61c997ed970aa2.68262965

Приведены научные статьи участников V международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», отражающие результаты исследований в области применения моделирования и САПР в электронике, физике, радиотехнике, научных исследованиях и учебном процессе.

Сборник научных трудов предназначен для инженерно-технических работников промышленных предприятий, а также может быть полезен для аспирантов и студентов.

*Редакционная коллегия:*

*Федонин О.Н.* – д.т.н., профессор, ректор БГТУ – председатель оргкомитета;

*Сканцев В.М.* – к.т.н., доцент, проректор по научной работе БГТУ, руководитель научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – зам. председателя оргкомитета;

*Банников А.И.* – начальник отдела организации научно-исследовательской работы студентов, аспирантов и молодых ученых БГТУ;

*Дракин А.Ю.* – к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – научный редактор;

*Топчий О.А.* – инженер научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – секретарь оргкомитета.

УДК 621.37/.39:658.011.56  
ББК 30.2-5-05

***Сборник научных трудов публикуется в авторской редакции***

**ISBN 978-5-00202-004-1**

© Брянский государственный  
технический университет, 2021  
© Издательство «Новый  
формат», 2021

**СЕКЦИЯ «ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ЭЛЕКТРОНИКЕ, ФИЗИКЕ,  
РАДИОТЕХНИКЕ И СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

SECTION «APPLICATION OF CAD IN ELECTRONICS, PHYSICS, RADIO  
ENGINEERING AND MODERN INDUSTRY»

УДК 629.45

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ed9c59d5.17681216

**ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ  
ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

*Светлана Николаевна Ашуркова*

Брянский государственный технический университет, старший преподаватель, к.т.н., Россия, Брянск, swetiknk@yandex.ru

*Аннотация. Выполнена разработка конечно-элементных расчетных моделей кузова пассажирского вагона с использованием современных средств САПР. Проведена оценка прочности, устойчивости и усталостной долговечности несущих конструкций кузова пассажирского вагона.*

*Ключевые слова: пассажирский вагон, кузов, математическое моделирование, метод конечных элементов, прочность, устойчивость, усталостная долговечность.*

APPLICATION OF CAD FOR ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS  
OF PASSENGER CAR BODY STRUCTURES

Svetlana N. Ashurkova

Bryansk State Technical University, Senior Lecturer, Candidate of Technical Sciences,  
Russia, Bryansk, swetiknk@yandex.ru

*Annotation. The development of finite element design models of the passenger car body using modern CAD tools was carried out. An assessment of the strength, stability and fatigue life of the load-bearing structures of the passenger car body has been carried out.*

*Keywords: passenger car, body, mathematical modeling, finite element method, strength, stability, fatigue life.*

Тенденции развития современной транспортной промышленности требуют от проектировщиков быстрых и качественных решений по совершенствованию подвижного состава. При этом временные и материальные затраты на разработку и испытания новых конструкций должны быть сведены к минимуму. Обеспечить данные требования возможно с использованием на всех стадиях проектирования современных элементов САПР, позволяющих оценить проектные решения.

При проектировании подвижного состава железных дорог одними из главных параметров, обеспечивающих его безопасность, надежность и конкурентоспособность за весь период эксплуатации являются такие параметры как: прочность несущей конструкции кузова (статическая и динамическая), устойчивость элементов конструкции и усталостная долговечность.

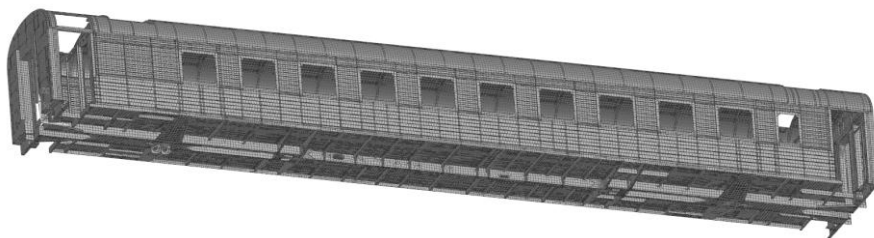
© Ашуркова С.Н., 2021

САПР и моделирование в современной электронике. С. 3 – 6.

Мировой опыт проектирования показал, что наиболее универсальным методом оценки прочности конструкции является численный метод - метод конечных элементов, который реализуется разнообразными пакетами САПР (Siemens PLM Software Femap, NX, Универсальный механизм и др.). Данные программные продукты позволяют без значительных затрат пользователя генерировать конечно-элементную сетку на основе разработанной детализированной модели конструкции [1-4].

В связи с этим в работе выполнена оценка указанных выше параметров несущих конструкций кузова пассажирского вагона современными пакетами САПР с целью определения рационального варианта конструкции.

Кузов пассажирского вагона, его несущая конструкция, является подкрепленной тонкостенной оболочкой с вырезами. Её моделирование целесообразно выполнять в виде пластинчатых или пластинчато-стержневых схем. При реализации пластинчато-стержневой схемы подкрепляющие элементы кузова моделируются линейными стержневыми элементами, воспринимающими усилия растяжения (сжатия), кручения и изгиба, а обшивка плоскими пластинчатыми элементами, учитывающими все внутренние силовые факторы. Пластинчатую схему формируют исключительно пластинчатыми конечными элементами, преимущественно трех- или четырехузловыми (рис.1). Как правило, пластинчато-стержневая расчетная схема требует немного меньше времени для формирования в отличие от пластинчатой и может быть рекомендована для поисковых расчетов. Пластинчатая схема позволяет локально оценить напряженно-деформированное состояние в элементах конструкции и рационально учесть ее нагружение [1-3].



*Рисунок 1 – Пластинчатая конечно-элементная модель кузова пассажирского вагона*

Исследование прочностных характеристик несущей конструкции кузова выполнено на примере кузова пассажирского вагона модели 61-4447. Боковые стены кузова вагона совместно с рамой являются самыми нагруженными элементами конструкции. Так как рама является наиболее сложным и ответственным узлом кузова, рассмотрим возможность рационализации кузова на примере изменения конструкции боковых стен. В связи с чем, в работе рассмотрены три варианта несущей конструкции боковых стен кузова:

1) комбинированная обшивка боковых стен (вагон-аналог); 2) негофрированная, подкрепленная стрингерами; 3) двухслойная с негофрированной наружной обшивкой, подкрепленной гофрированной с трапециевидными гофрами. Применение гладкой обшивки обусловлено современными тенденциями в пассажирском вагоностроении.

На первом этапе выполнено моделирование детализированных моделей кузовов в среде программного комплекса Siemens PLM Software NX. При этом детализации не подвергались элементы конструкции, не оказывающие существенного влияния на его прочностные характеристики (технологические отверстия, скругления, радиусы и т.д.). На основании разработанных моделей кузовов средствами программного комплекса автоматически генерировались пластинчатые конечно-элементные расчетные схемы. Следует отметить, что в местах конструкции, где возможны значительные напряжения, в местах концентраторов напряжений, целесообразно использовать ручное разбиение сетки со сгущением к градиенту напряжений.

Приложение к несущим конструкциям кузовов вагона статических эксплуатационных нагрузок выполнялось согласно требованиям норм проектирования вагонов. Прочность конструкций оценивалась по значениям максимальных нормальных напряжений [5]. Подтверждение адекватности полученных результатов выполнено на основании данных натурных испытаний вагона-аналога.

Определение общей и местной устойчивости конструкций выполнялось на основании наименьшего коэффициента запаса устойчивости.

Для оценки динамических нагрузок, действующих на вагон в процессе эксплуатации, была разработана гибридная динамическая модель вагона-аналога в среде программного комплекса «Универсальный механизм». Адекватность динамической модели подтверждена соответствием значений показателей динамики, полученных на ее основе, с показателями, полученными на основе испытаний вагона-аналога.

Полученные в результате моделирования движения вагона динамические нагрузки прикладывались к несущим конструкциям кузовов вагонов в программном комплексе Siemens PLM Software Femap. На основании выполненных расчетов определялись наиболее нагруженные зоны конструкций, которые являются определяющими с точки зрения усталостной долговечности конструкции в целом. Оценка усталостной долговечности выполнена на основании методики В.В. Болотина [6].

Результаты расчетов прочностных характеристик трех вариантов конструкции приведены в таблице. Значения параметров вагона-аналога приняты за 100%.

На основании полученных результатов, можно сделать вывод, что 2 и 3 вариант конструкции обеспечивает больший срок службы вагона чем вагон-аналог. При этом запас прочности выше у вагона-аналога. Разница значений коэффициентов запаса устойчивости не превышает 5% между рассматриваемыми вариантами конструкции и вагоном-аналогом. Следует

отметить, что все полученные результаты удовлетворяют требованиям прочности, устойчивости и усталостной долговечности.

*Таблица. Сопоставление результатов расчета разработанных моделей кузова с результатами расчета вагона-аналога*

Вариант конструкции боковой стены	Максимальные напряжения, %	Коэффициент запаса устойчивости, %	Срок службы, %
1	100	100	100
2	117	95	126
3	110	105	121

Выбор рационального варианта конструкции, в случае удовлетворения прочностных характеристик, следует выполнять с их учетом на основании других параметров конструкции, таких как металлоёмкость, технологичность и прочее.

#### **Список литературы**

1. *Ашуркова, С.Н.* Применение современных элементов САПР для анализа напряженно-деформированного состояния несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов/ С.Н. Ашуркова, Д.Я. Антипин// САПР и моделирование в современной электронике: сб.науч.тр. II Международной научно-практической конференции/ под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.2. – С.10-13.

2. *Ashurkova, S.N.* Methods of analysis of the impact of design features of bodies of passenger cars on their stiffness and strength characteristics / S.N Ashurkova, V.V. Kobishchanov, E.V. Kolchina// Procedia Engineering, 2017. – Т. 206. – Р. 1623–1628.

3. *Ашуркова, С.Н.* Оценка прочностных характеристик кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения/ С.Н. Ашуркова// Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. – Курск: Издательство ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 13-15.

4. *Шалыгин, М.Г.* Моделирование изнашивания неровностей субшероховатости поверхностей трения // Строительные и дорожные машины, 2016. – №3. – С. 42-44.

5. *Суслов, А.Г.* Комплексное технологическое повышение износостойкости и статической прочности деталей из стали 40Х13/ А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин // Научно-технические технологии в машиностроении., 2018. – № 1. – С. 19-21.

6. *Антипин, Д.Я.* Прогнозирование усталостной долговечности несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами/ Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 7(80). – С. 59-65.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 621.382

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edab94f5.95879324

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ АКТИВНОГО ПРОБНИКА ОСЦИЛЛОГРАФА

**Алексей Михайлович Богачев**, аспирант, bogachev-al2012@yandex.ru

**Сергей Викторович Шумарин**, доцент каф. ЭПБС, к.т.н.,  
sergey.shumarin@gmail.com

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Россия, Владимир

*Аннотация. Приведены результаты моделирования схемы усилительного каскада, обладающего малой входной ёмкостью, использовавшегося в качестве активного пробника осциллографа.*

*Ключевые слова: осциллографические пробники, моделирование электрических схем.*

### RESEARCH OF AMPLIFIER FOR ACTIVE OSCILLOGRAPHIC PROBE

Aleksei M. Bogachev, Postgraduate Student at the Department BEST, bogachev-al2012@yandex.ru

Sergei V. Shumarin, Associate Professor at the Department EPBS, Candidate of Sciences in Technology,  
sergey.shumarin@gmail.com

Vladimir State University, Russia, Vladimir

*Abstract. The results of modeling a circuit of an amplifier with a small input capacitance used as an active probe of an oscilloscope are presented.*

*Keywords: oscilloscope probes, circuit simulation.*

Диапазон применения современных цифровых осциллографов весьма широк, в частности осциллографы незаменимы при наладке сложных электрических цепей и измерении параметров их сигналов. При этом существует большое количество видов осциллографических пробников, каждый из которых незаменим в своей области. Так пассивные пробники оптимальны для общих измерений параметров низкочастотных сигналов; активные широкополосные пробники необходимы в задачах, где низкий уровень нагрузки на испытуемое устройство является ключевым фактором; специализированные высоковольтные пробники незаменимы при проведении измерений параметров силовой электроники, где их главная задача – обеспечение безопасности пользователя [1].

Несмотря на то, что сегодня для каждой задачи есть свой специализированный измерительный инструмент, инженеры и исследователи время от времени сталкиваются с ситуациями, когда у них нет под рукой подходящего пробника или имеющиеся не удовлетворяют их требованиям. В таких случаях, специалисты частот изготавливают собственные буферные каскады и усилители для имеющегося у них измерительного оборудования. Ниже в тексте публикации авторы приводят опыт моделирования электрической схемы, использующейся в качестве активного пробника при



измерениях, где нужна низкая входная ёмкость. Электрическая схема устройства приведена на рисунке 1.

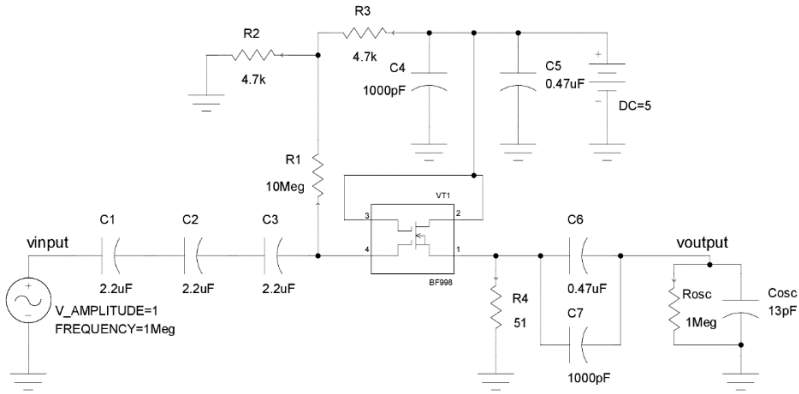


Рисунок 1 – Электрическая схема активного пробника

В основе схемы транзистор BF998, обладающий низкой входной ёмкостью первого затвора. Входная ёмкость устройства составляет примерно 0,7 пФ [2]. Для проверки работоспособности схемы и изучения её параметров было выполнено её моделирование в САПР Mentor Graphics Xpedition. На рисунке 2 приведен пример формы сигналов на входе и на выходе схемы. На вход подавалась синусоида с амплитудой 1 В и частотой 1 МГц.

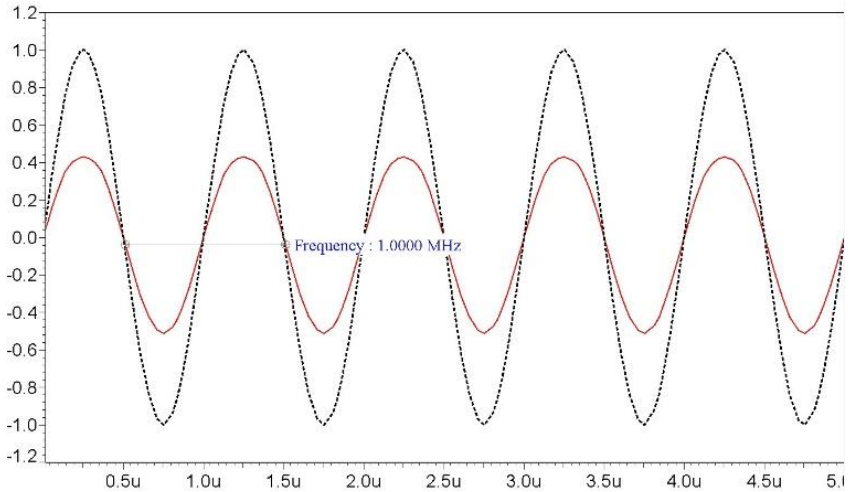


Рисунок 2 – Графики входного (пунктирная линия) и выходного сигналов. По вертикали отложено напряжение в вольтах, по горизонтали – время в секундах

На рисунке 2 видно, что устройство делит входной сигнал в 2,5 раза. На рисунке 3 приведены АЧХ и ФЧХ устройства.

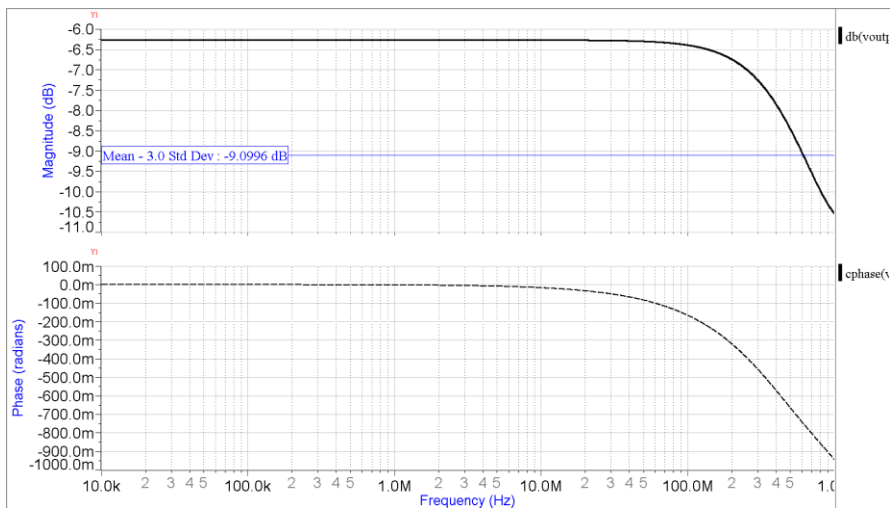


Рисунок 3 – АЧХ (сплошная линия) и ФЧХ (пунктирная линия) устройства

На рисунке 3 видно, что активный пробник обладает плоской АЧХ в диапазоне от 10 кГц до 10 МГц, при этом ослабление -3 дБ наступает при частоте 700 МГц.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что данная схема может использоваться в измерениях, требующих от осциллографического пробника низкой входной ёмкости, при этом её можно использовать в паре с усилительным каскадом для компенсации ослабления сигнала. Также важным преимуществом данной схемы является её простота и доступность компонентов.

#### Список литературы

1. Herres D. Oscilloscopes: A Manual for Students, Engineers, and Scientists. Cham: Springer International Publishing, 2020. 267 с.
2. Андреев С. Активный ВЧ-щуп // Радиоконструктор. – 2007. – №12 – С. 13.

Материал принят к публикации 13.10.21.

## АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**Денис Андреевич Бондаренко**, доцент, к.т.н., dilekter@gmail.com

**Ольга Игоревна Бондаренко**, ассистент, oljapolushko54@gmail.com

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

*Аннотация. На основе обобщения и развития современных взглядов на рациональное проектирование, излагаются основы создания алгоритма обеспечения жизненного цикла математической модели в условиях информационного общества.*

*Ключевые слова: математическая модель, жизненный цикл, проектирование.*

### ALGORITHM FOR ENSURING THE LIFE CYCLE OF A MATHEMATICAL MODEL

Denis A. Bondarenko, associate professor, candidate of technical sciences, dilekter@gmail.com

Olga I. Bondarenko, assistant, oljapolushko54@gmail.com

BSTU, Russia, Bryansk

*Abstract. Based on the generalization and development of modern views on rational design, the basics of creating an algorithm for ensuring the life cycle of a mathematical model in the information society are outlined.*

*Keywords: mathematical model, life cycle, design.*

Традиционно в литературе, посвященной математическому моделированию, принято рассматривать процесс создания модели как процесс, в котором подобие модели объекту является основным критерием. Процесс построения модели рассматривался, как линейное преобразование, на входе которого находится собственно моделируемая система, на выходе – ее модель, а технология создания модели включала в себя четыре этапа.

1. Подготовка математической модели системы.
2. Подготовка математической модели для моделирования (приведение модели к целочисленному виду или иному, обеспечивающему процесс вычислений);
3. Создание программного продукта (алгоритмизация и создание кода на языке моделирования).
4. Проверка и отладка модели.

Данная структурная схема оставляет неясными целый ряд вопросов [1].

Во-первых, это вопрос о необходимой степени подобия модели исходному объекту. С одной стороны, идеальной моделью объекта является сам объект. С другой стороны, копия объекта – это уже не модель.

Во-вторых, это вопрос о цели моделирования. Считается, что математическая модель необходима, потому что требуемую информацию часто невозможно получить иным теоретическим или экспериментальным путем. Однако тут же возникает другой вопрос – а в чем была цель теоретических исследований или эксперимента?

Третий вопрос вытекает из первых двух: а как мы, собственно, можем проверить модель, если не знаем, какой поставленной цели она соответствует?

Для решения данных вопросов представим математическую модель, как некий программно-информационный продукт внутреннего потребления, который определяют в основном два фактора [2]:

- потребности в продукте;
- технологические особенности создания.

Предлагаемый алгоритм обеспечения жизненного цикла математической модели представлен на рис. 1.

Процедурой, инициирующей создание модели (т.е. порождающей в ней потребность), будем считать появление инновационной идеи, т.е. идеи создания продукции, которую невозможно сконструировать рутинным образом, пользуясь лишь известными отработанными методиками проектирования. Это позволяет определить две вещи:

- совокупность известной информации, которая требуется для проектирования объекта;
- совокупность уинформации, т.е. информации, которой не хватает для проектирования объекта.

Выявленная информация и уинформация позволяют запустить два параллельных процесса.

Во-первых, поскольку, по определению модели, у инженера существует потребность в подобии модели объекту, то, на основе имеющейся информации, создается описание объекта на основании его проектной разработки, опытного образца и т.п., например, в CAD – системе такое описание формируется системой при создании чертежей.

Во-вторых, на основе уинформации инженер определяет, какие проблемы должна решить данная модель в общей системе определения недостающей информации [3].

Далее, на основании сформулированных проблем, производится постановка технической задачи. Например, определяется предполагаемая картина повреждаемости, какая должна быть наработка на отказ, при каких параметрах эта наработка может быть достигнута. Результатом постановки технической задачи являются исходные данные для построения функциональной структуры математической модели. Функциональная структура определяет, как и для чего будет использована модель: какую задачу должна решать модель (оптимизация конструкции, интерполяция или экстраполяция результатов эксперимента, выбор альтернативных технических решений) какие технические параметры инженер должен получить, с какой точностью, в каком диапазоне могут быть заданы исходные параметры для моделирования. Одновременно инженер определяет область применения модели, что позволяет разумно ограничить степень подобия и сложности, а тем самым – число неизвестных параметров модели [4].

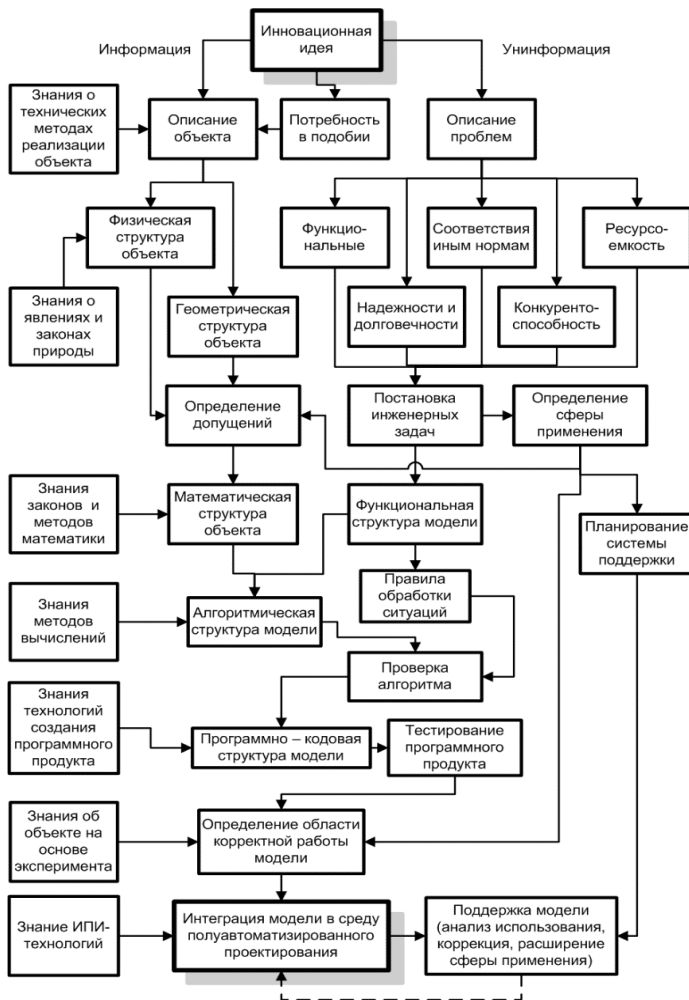


Рисунок 1 – Алгоритм обеспечения жизненного цикла математической модели

Параллельно с этими процессами производится декомпозиция проекта моделируемого изделия, т.е. переход от объектного, технического описания к описанию его физической и геометрической структуры, а после выбора системы допущений на основании определенной сферы применения модели – к математической структуре объекта, т.е. его полностью формализованному математическому описанию. Далее, на основании математического описания объекта и функциональной структуры модели инженер производит составление алгоритма, который обеспечивает как производство вычислений в соответствии с математическим описанием, так и обработку ситуаций, которые возникают в процессе реализации функций модели (алгоритмов

оптимизации, выбора критических параметров, интерактивного взаимодействия инженера с моделью).

Создание функциональной структуры модели позволяет определить правила обработки ситуаций, которые используются на стадии проверки алгоритма. После проверки алгоритма разработчик модели приступает к ее реализации в виде программного кода для выполнения в определенной среде.

После тестирования работоспособности программного продукта разработчик модели должен выполнить еще одну процедуру, которая не всегда учитывается в явном виде – это определение области корректной работы модели. Значительная часть ошибок, связанных с математическим моделированием, вызвана тем, что инженер использует модель, которую считает «авторитетной» по ранее изданным научным работам, опыту применения, но которая оказывается некорректной в данной конкретной ситуации. Область корректной работы модели необходимо определять путем сопоставления результатов моделирования с результатами, полученными экспериментальным путем для разных объектов. Попутно, таким образом, осуществляется и общая проверка корректности модели.

Наконец, еще одна важная завершающая стадия – это организация поддержки модели разработчиком. На кибернетической стадии развития производства поддержка математических моделей осуществлялась стихийно, и, в основном, в случаях, если сам разработчик модели продолжал по каким-то причинам с ней работать. На информационной стадии имеет смысл заранее продумать систему поддержки модели, включающую в себя следующие основные процессы:

- сбор информации об использовании модели, полученных результатах и их сходимостью с экспериментальными данными;
- сбор информации о замечаниях и пожеланиях к модели, позволяющей уточнить потребности в ней;
- поиск возможностей расширить сферу применения модели;
- доработку моделей в соответствии с изменениями потребностей;
- обучения работы инженеров – проектировщиков с моделью и оперативное решение возникающих в работе проблем.

#### **Список литературы**

1. *Дитрих, Я.* Проектирование и конструирование: Системный подход. М.: Мир, 1981. 456 с.
2. *Измеров, О.В.* Техническая инновационика. Проблемы инженерного анализа технических систем. Орел: Госуниверситет-УНПК. 2013. 261 с.
3. *Шалыгин, М.Г.* Десяцкая Л.В. Программно-аппаратный комплекс измерения, построения и обработки топографии поверхности / М.Г. Шалыгин, Л.В. Десяцкая // Датчики и системы. 2019. № 6. С 40-44.
4. *Антипин, Д.Я.* Применение технической инновационики при проектировании новых узлов локомотивов / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.С. Космодамианский // М.: Курск: ЗАО "Университетская книга". 2019. – 220 с.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 621.8

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edbca921.59780177

## **АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМЫХ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТОВ**

***Илья Александрович Денисов***

Брянский государственный технический университет  
старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные машины  
и оборудование», к.т.н., Россия, г. Брянск, [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru)

*Аннотация. Рассмотрены функциональные возможности современных свободно распространяемых средств инженерного анализа на примере наиболее распространённых программных пакетов. Проведён анализ их основных особенностей, достоинств и недостатков.*

*Ключевые слова: инженерный анализ, CAD, CAE, SALOME, CalculiX, PrePoMax.*

### **ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF FREELY DISTRIBUTED SOFTWARE PACKAGES FOR AUTOMATIZATION OF ENGINEERING CALCULATIONS**

Ilya A. Denisov

Bryansk State Technical University, senior lecturer of the Department "Handling machinery and equipment", PhD in Technical Sciences, Russia, Bryansk, [ilia.denisow@yandex.ru](mailto:ilia.denisow@yandex.ru)

*Abstract. The functional capabilities of modern freely distributed engineering analysis tools are considered on the example of the most common software packages. The analysis of their main features, advantages and disadvantages is carried out.*

*Keywords: engineering analysis, CAE, SALOME, CalculiX, PrePoMax.*

Оборудование, применяемое в условиях современного промышленного производства, должно соответствовать широкому набору требований, касающихся производительности, экономичности, надёжности и безопасности его работы. Производство подобного оборудования является сложной задачей, при решении которой необходимо с достаточной точностью предсказать поведение машины или механизма в различных условиях эксплуатации, выявить опасные режимы работы и наиболее нагруженные узлы, оценить необходимость дальнейших доработок и возможность последующих модификаций.

В настоящее время задачи, связанные с моделированием физических процессов в области техники, решаются с использованием различных систем инженерного анализа, называемых также системами автоматизации инженерных расчётов (англ. Computer-aided engineering, CAE), которые представляют собой отдельные программные пакеты (ANSYS, MSC Nastran, Femap, Fidesys, APM WinMachine), либо приложения, функционирующие в рамках CAD-систем (SolidWorks Simulation Siemens NX, Creo Parametric, Компас 3D и др.). Системы инженерного анализа, как правило, имеют трёхуровневую структуру, включающую предпроцессор, постпроцессор и

© Денисов И.А., 2021

САПР и моделирование в современной электронике. С. 14 – 17.

процессор с набором решателей основанных на численных методах решения дифференциальных уравнений.

Внедрение подобных систем значительно ускоряет процесс проектирования изделий и позволяет сэкономить на проведении длительных и трудоёмких физических экспериментов, что положительно сказывается как на качестве готового изделия, так и на его стоимости. Однако цена одного коммерческого CAE пакета может достигать несколько миллионов рублей, что затрудняет их применение в рамках производственного процесса средних и мелких предприятий, не обладающих солидной финансовой базой. Та же специфика характерна и для образовательного процесса, так как учебные пакеты большинства CAE систем весьма дороги для бюджетов многих региональных вузов.

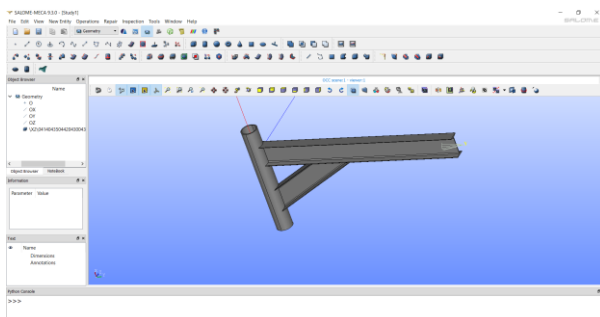
Решением данной проблемы может быть применение свободного программного обеспечения с открытым исходным кодом. В настоящий момент существует несколько основных свободно распространяемых CAE пакетов, по функционалу не уступающих коммерческим программам. Данные пакеты распространяются согласно с лицензией GNU Lesser General Public License, которая позволяет пользователям свободно и бесплатно использовать функционал программы и дорабатывать её исходный код под свои уникальные задачи.

Наиболее известным свободно распространяемым программным продуктом для проведения инженерного анализа является вычислительная среда SALOME, которая представляет собой универсальную платформу для предварительной и последующей обработки объектов исследований в ходе численного моделирования [1]. Основной задачей SALOME является поддержание взаимодействия между программным обеспечением, используемым для инженерного анализа в рамках действующей САПР. Платформа обладает собственным интерфейсом (рис. 1) с возможностью создания сеток с применением встроенных автоматических генераторов NETGEN и Gmsh. Существует возможность интеграции платформы с другими известными генераторами, а также с различными решателями в зависимости от типа поставленных перед исследователем задач. Островным языком среды является Python, что даёт возможность пользователю быстро настраивать и оптимизировать систему под собственные нужды.

Да данный момент всем пользователям доступно расширение платформы SALOME – полнофункциональная CAE система SALOME-MECA [1], представляющая собой закрытый, но свободно распространяемый программный продукт, включающий в себя помимо пре- и постпроцессора набор решателей: Code-Aster (структурный анализ) и Code-Saturne (анализ течения жидкостей и газов). Все элементы данного программного продукта создавались рядом французских компаний и исследовательских институтов для проведения расчётов, выполняемых при проектировании элементов атомных станций. Благодаря этому фактору SALOME-MECA обладает мощными средствами анализа физических процессов и по своим



функциональным возможностям не уступает большинству коммерческих пакетов.



*Рисунок 1 – Интерфейс вычислительной среды SALOME*

Существенным недостатком представленной системы является отсутствие развитой поддержки программных продуктов со стороны разработчика. Имеющаяся в свободном доступе документация выпускается преимущественно на французском и английском языке, что серьезно усложняет процесс освоения программных продуктов новыми пользователями.

Ещё одним мощным и свободно распространяемым средством для проведения инженерного анализа является программный пакет CalculiX [2]. Данный пакет представляет собой набор консольных утилит, куда по умолчанию входит пре- и постпроцессор (модуль CGX) и процессор (модуль CCX) обладающий широкими вычислительными возможностями и позволяющий производить вычисления при решении задач в области физики твёрдого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, акустики и др. CalculiX может генерировать исходные файлы для проведения расчётов и в коммерческих решателях NASTRAN, ANSYS, Abaqus.

Особенностью данной программы является её интерфейс, включающий область графического дисплея, и область ввода команд, которые обладают характерным синтаксисом и требуют предварительного изучения. Несмотря на обилие технической документации по работе с программным пакетом CalculiX, необходимость текстового ввода каждой команды значительно усложняет процесс работы и делает программный продукт сложным для освоения, что сказывается на его распространённости. Однако открытость всех утилит системы CalculiX способствует её интеграции в другие существующие программы. Примером может служить бесплатно распространяемая CAD система FreeCAD, включающая в себя расчётный модуль на основе CalculiX.

CalculiX так же может выступать в качестве расчётного ядра для разработки более совершенных с точки зрения интерфейса программ. Наиболее современной системой инженерного анализа, использующей решатель CalculiX, является программа PrePoMax [3]. Она так же является

бесплатной и свободно распространяемой с полностью открытым исходным кодом и современным понятным интерфейсом (рис. 2).

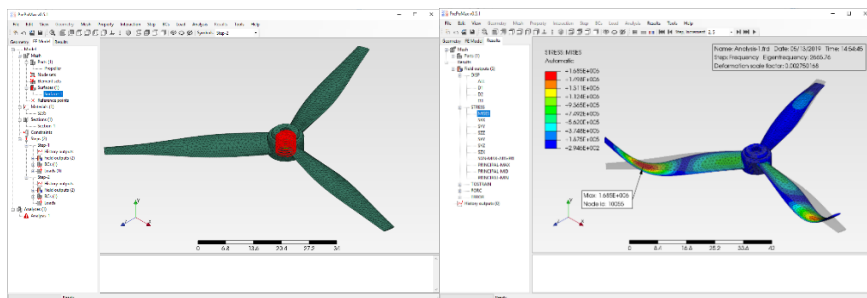


Рисунок 2 – Интерфейс системы инженерного анализа PreProMax

PreProMax содержит множество функций, необходимых для подготовки, решения и последующей обработки различных моделей, но по своим возможностям пока уступает более сложным системам инженерного анализа. Так в программе отсутствует возможность проведения расчётов механики течения жидкости и газа, ограничен набор типов конечных элементов, и отсутствует возможность построения сложных геометрий, не прибегая к помощи сторонних CAD систем. Но несмотря на это программа PreProMax является мощным инструментом, поддерживающим все доступные форматы для импорта геометрии, позволяющим проводить моделирование сложного напряжённо-деформированного состояния конструкций, включающих узлы с различными типами контактных соединений, вплоть до контакта с трением. Указанные обстоятельства, наряду с относительно простым и понятным интерфейсом, делают данную программу наиболее привлекательной для использования при решении различных задач.

Как показал проведённый анализ, современные свободно распространяемые системы инженерного анализа по функциональным возможностям не уступают своим коммерческим аналогам и обладают инструментарием, необходимым для проведения исследований сложных физических процессов. Однако неразвитая техническая поддержка и отсутствие системы взаимодействия с пользователем существенно замедляет распространение данного программного обеспечения и усложняет его внедрение в учебный и производственный процесс.

### Список литературы

1. SALOME. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.salome-platform.org/> (дата обращения 05.10.2021).
2. CalculiX. A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.calculix.de/> (дата обращения 05.10.2021).
3. Официальный сайт системы PreProMax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prepromax.fs.um.si/> (дата обращения 07.10.2021).

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 621.8

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edc30d45.26633884

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУЗОПОДЪЁМНЫХ МАШИН С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

*Илья Александрович Денисов*

Брянский государственный технический университет  
старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование», к.т.н., Россия, Брянск, ilia.denisow@yandex.ru

*Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования напряжённно деформированного состояния элементов грузоподъёмных машин с применением метода конечных элементов, реализованного в рамках среды инженерного анализа Femap. Проанализированы основные особенности построения модели, содержащей концентраторы напряжений, на этапе генерации конечно-элементной сетки.*

*Ключевые слова: грузоподъёмные машины, анализ, метод конечных элементов, концентраторы напряжений, САЕ.*

### MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF ELEMENTS OF LIFTING MACHINES WITH STRESS CONCENTRATORS

Ilya A. Denisov

Bryansk State Technical University, senior lecturer of the Department "Handling machinery and equipment", PhD in Technical Sciences, Russia, Bryansk, ilia.denisow@yandex.ru

*Abstract. The features of modeling the stress-strain state of elements of lifting machines using the finite element method implemented within the framework of the Femap engineering analysis environment are considered. The main features of constructing a model containing stress concentrators at the stage of generating a finite element grid are analyzed.*

*Keywords: lifting machines, analysis, finite element method, stress concentrators, CAE.*

Металлоконструкции и несущие элементы механизмов грузоподъёмных машин в ходе эксплуатации испытывают воздействие нестационарных многоцикловых нагрузок различной природы и интенсивности. Совокупное воздействие большого количества силовых факторов неизбежно приводит к возникновению сложного напряжённно-деформированного состояния, параметры которого во многом зависят от наличия концентраторов напряжений в материале нагруженных узлов и деталей.

Распространённые на данный момент аналитические методы расчётов грузоподъёмных машин, описанные в научной и нормативной литературе [1, 2, 4], не позволяют в полной мере оценить влияние концентраторов на величину действующих напряжений. Данное обстоятельство может привести к погрешностям в расчётах, и, как следствие, возникновению пластических деформаций, хрупких и усталостных разрушений. Полностью характеризовать напряжённно-деформированное элемента в зоне концентрации напряжений возможно только в случае использования систем инженерного анализа (САЕ).

© Денисов И.А., 2021

САПР и моделирование в современной электронике. С. 18 – 21.

Рассмотрим особенности использования САЕ систем при проведении моделировании напряжённо-деформированного состояния элементов грузоподъёмных машин, содержащих концентраторы напряжений в виде отверстий. В качестве объекта исследования выступает щека крюковой подвески башенного крана серии КБ, грузоподъёмностью 25 тонн, представляющая собой пластину с отверстиями для закрепления траверсы и осей блоков (рис. 1).

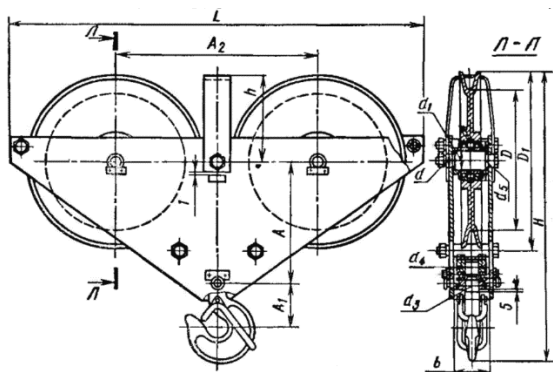


Рисунок 1 – Крюковая подвеска башенного крана

В качестве программной среды для проведения моделирования напряжённо-деформированного состояния была использована система инженерного анализа Femap, позволяющая производить необходимые вычисления с помощью метода конечных элементов. Так как исследуемый объект представляет собой пластину, габаритные размеры которой во много раз превышают её толщину, при проведении моделирования были использованы плоские четырёхугольные конечные элементы типа Plate (рис. 2) [1, 2, 3]. Материалу пластины были присвоены линейные изотропные пластические свойства, аналогичные свойствам малоуглеродистых конструкционных сталей.

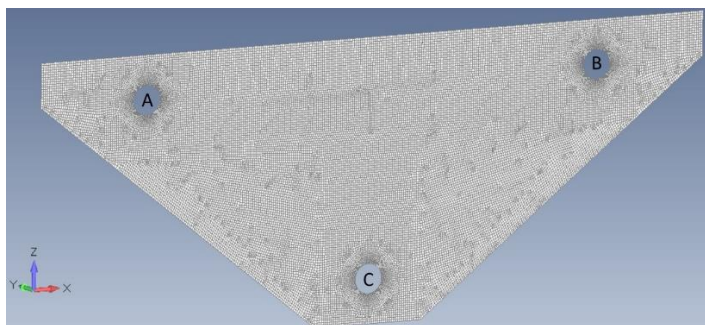


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель щеки крюковой подвески

Основная сложность при проведении подобных расчётов состоит в правильном построении сетки конечных элементов вокруг отверстий, являющихся концентраторами напряжений. Из-за нелинейности геометрии вокруг отверстий после проведения генерации конечных элементов возникает неравномерная сетка с большим количеством перестроений, что может негативно отразиться на качестве полученных расчётных данных (рис. 3, а). Данная проблема устраняется путем предварительного построения в зоне вокруг отверстия концентрической сетки, в которой элементы увеличиваются от кромки отверстия к границам зоны, где они взаимодействуют с элементами основного объёма модели (рис. 3, б). Такой подход позволяет получить максимально качественную сетку в местах возможной концентрации напряжений.

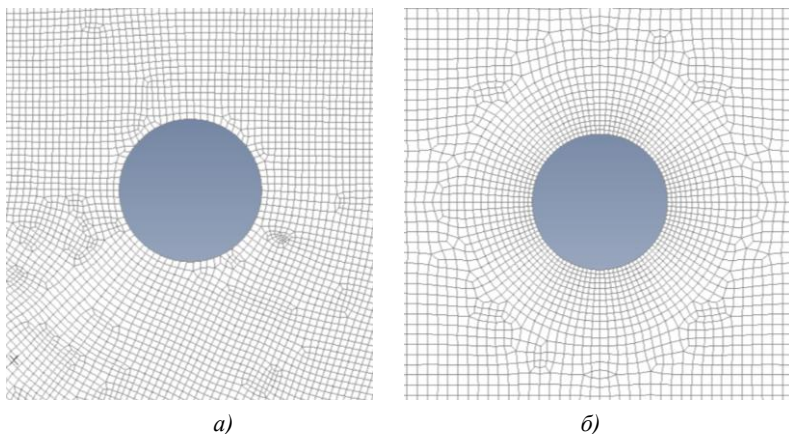


Рисунок 3 – Вид сетки конечных элементов у отверстий модели:  
а – нерегулярная перестраивающаяся сетка;  
б – регулярная концентрическая сетка

Закрепления пластины задавались путём наложения ограничений на линейное перемещение узлов конечно-элементной сетки, расположенных в верхней части отверстий А и В. Модель была нагружена усилием, равным 122,6 кН распределённым по узлам, расположенным в нижней части отверстия С. Таким образом была обеспечена возможность свободного перемещения узлов, находящихся у отверстия вне зоны контакта щеки с осями блоков и траверсой крюка.

Картини распределения напряжений в зоне вокруг отверстий показаны на рис. 4. Хорошо заметны зоны концентрации напряжений по бокам отверстий, причём в случае отверстия А и В данные зоны расположены не симметрично, что соответствует теоретической картине напряжённо-деформированного состояния принятой расчётной модели.

При проведении моделирования были использованы различные варианты построения сетки конечных элементов, согласно с рис. 3. Результаты расчётов

показали, что в случае использования регулярной концентрической сетки, в зонах концентрации наблюдаются более высокие значения напряжений, причём максимальная разница может достигать 22%. При этом максимальные деформации пластины в обоих случаях равны и не превышают 1 мм.

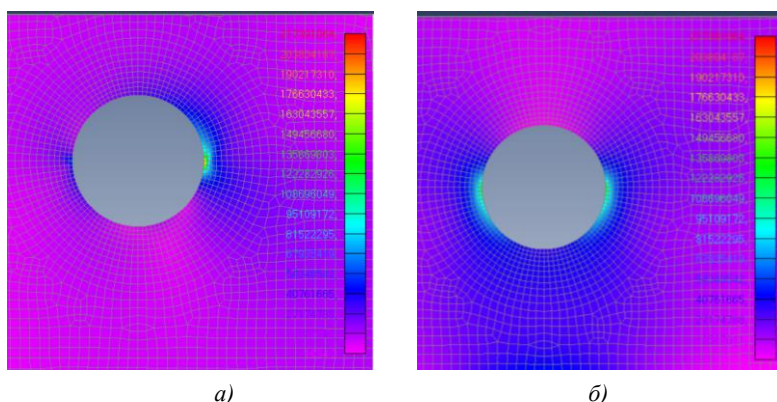


Рисунок 4 – Картины концентрации напряжений вокруг отверстий:  
а – отверстие А; б – отверстие С

Полученные в ходе моделирования результаты говорят о важности правильного построения сетки конечных элементов при проведении исследований нагруженных узлов грузоподъемных машин. Сгенерированная сетка должна обладать четкой, ровной структурой без существенных перестроений в зонах наибольших концентраций напряжений. Качество сетки конечных элементов является важным фактором, определяющим точность расчётов значений пиков напряжений, вызванных наличием различных концентраторов.

#### Список литературы

1. Гончаров, К.А. Обоснование выбора расчётных схем элементов металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальной компоновочной схемы / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – №2. – С. 155-163.
2. Гончаров, К.А. Математические модели структурно-параметрического синтеза металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальных компоновочных схем / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – №1. – С. 26-34.
3. Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование нагруженности грузоподъемных машин при использовании систем управления с частотным преобразователем / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018. – №1. – С. 31-39.
4. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. – Введ. 2016 -01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 51 с.

Материал принят к публикации 11.10.21.

УДК 621.311

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edca8f04.06007974

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕРЫВА ПИТАНИЯ ДЛЯ УСПЕШНОСТИ САМОЗАПУСКА

**Андрей Станиславович Исаев**<sup>1</sup>, ASIsaew@nirhtu.ru

**Михаил Николаевич Ползиков**<sup>1</sup>, MNPolzikow@nirhtu.ru

<sup>1</sup>канд. техн. наук, доц., доцент каф. «ЭПП»

Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Россия, Новомосковск

*Аннотация. Работа посвящена моделированию электромеханических переходных процессов при питании от местного источника. Объект исследования – система электроснабжения химического концерна ООО «Щекиноазот». Получено критическое для сохранения исходного режима время перерыва питания при вариации расчетных условий. Задача оценки успешности самозапуска программно решена в Matlab.*

*Ключевые слова: динамичная устойчивость, самозапуск, синхронный двигатель, математическое моделирование, критический режим, Matlab.*

### STUDY OF CRITICAL POWER INTERRUPTION FOR SELFSTARTING SUCCESS

Isaev S. Andrey<sup>1</sup>, ASIsaew@nirhtu.ru

Polzikov N. Mikhail<sup>2</sup>, MNPolzikow@nirhtu.ru

<sup>1,2</sup>Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professors of the department «EPP»

<sup>1,2</sup>Novomoskovsk Institute (branch) of the FSBEI of higher education «Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia», Russia, Novomoskovsk

*Abstract. The work is devoted to modeling electromechanical transients when powered from a local source. The object of the study is TKG-1 «Pervomayskaya CHPP», LLC «Shchekinoazot». The time critical for maintaining the initial mode of power interruption is obtained when the design conditions are varied. The problem of evaluating the success of self-launching is programmatically solved in Matlab.*

*Keywords: dynamic stability, self-starting, synchronous motor, mathematical modeling, critical mode, Matlab.*

Устойчивость как частное свойство устойчивого развития для технической системы означает способность сохранять исходный режим при внешних воздействиях. Для задач эксплуатации наиболее актуальными являются электромеханические переходные процессы, возникающие при самозапуске – восстановлении исходного режима двигательной нагрузкой при незначительном перерыве питания.

Объектом исследования является крупный химический концерн ООО «Щекиноазот» (второе предприятие в Тульской области по величине электропотребления – за последние 5 лет рост годового электропотребления от 620,9 до 654,8 млн. кВтч [1]).

Предприятие имеет два независимых источника – питается от энергосистемы (две ГПП напряжением 110/6,3 кВ) и от «Первомайская ТЭЦ» (установленная мощность 105 МВт). На предприятии значительна доля

высоковольтной нагрузки (основные технологические агрегаты) напряжением 6 кВ, включая генераторную установку в производстве серной кислоты. Особенностью предприятия является то, что основной поставщик электроэнергии – местный источник «Первомайская ТЭЦ» (пгт. Первомайский, Щекинский промышленный узел). В этих условиях нельзя рассматривать систему как источник бесконечной мощности, а саму систему как простейшую (генераторная станция, работающая на шины неизменного напряжения – это условие не выполняется).

Переходный процесс как частный случай электромеханического переходного процесса соответствует основному уравнению движения ротора синхронной машины:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta M = M_a - M_0, \quad (1)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции;  $\delta$  – угол между векторами ЭДС и напряжения;  $\omega$  – угловая скорость;  $\Delta M$  – небаланс момента;  $M_0$  – нагрузочный (механический) момент;  $M_a$  – асинхронный (электромагнитный) момент.

Теория динамической устойчивости разработана и в полной мере изложена в [2]. Но из-за сложности решения (1) в практических инженерных методиках принимаются допущения: 1. постоянство нагрузочного момента; 2. неизменность напряжения в точке подключения нагрузки; 3. линеаризация (1) в виде замены дифференциалов приращениями (метод последовательных интервалов). Эти упрощения модели приводят к утяжелению расчетных условий. Поэтому они вполне корректны при расчете времени самозапуска (реальное время в любом случае не будет превышать полученное значение), но вносят значительную погрешность в определение предельного времени перерыва питания (полученное значение не будет являться критическим).

Нами построена модель системы электроснабжения типичного современного предприятия в Matlab (библиотека *Simulink*). Она включает в себя источник энергии (элемент *Three-Phase Source*), линии электропередач (*Three-Phase PI Section Line*), силовой трансформатор (*Three-Phase Transformer*), нагрузку (*Synchronous Machine*), коммутационные аппараты (*Three-Phase Breaker*), нагрузка на шинах 6 кВ (*Three-Phase Series RLC Load*) и средства изменения (*Three-Phase V-I Measurement*). Использованы наработки и алгоритмы [3]. Отличие нашей модели в том, что сеть предприятия рассматривается комплексно как некоторая целостность, на всех уровнях электроснабжения.

Установлено, что для оптимального решения программой уравнения (1) необходимо принять шаг дискретизации (интегрирования) 2 мкс. Для этого в рабочем поле (*Workspace*) необходимо переопределить системную переменную в виде « $T_s=2e-06$ ». Оптимальной вычислительной процедурой является разновидности функции *ode23* (*ode23*, *ode23s*, *ode23tb*), реализующие метод Рунге-Кутты второго/третьего порядка с переменным шагом. Функции



с постоянным (фиксированным) шагом (ode1- ode5) к решению (1) не приводят.

Наиболее типичным для объекта исследования является синхронный двигатель СТД-1600-23У5. Для него проведено моделирование самозапуска при вариации расчетных условий: время перерыва питания, величина напряжения предшествующего режима, коэффициент мощности, суммарная длина питающих кабельных линий. В базе Matlab отсутствует номенклатура электрооборудования РФ, поэтому параметры схемы замещения синхронного двигателя необходимо рассчитывать (использованы материалы [4]).

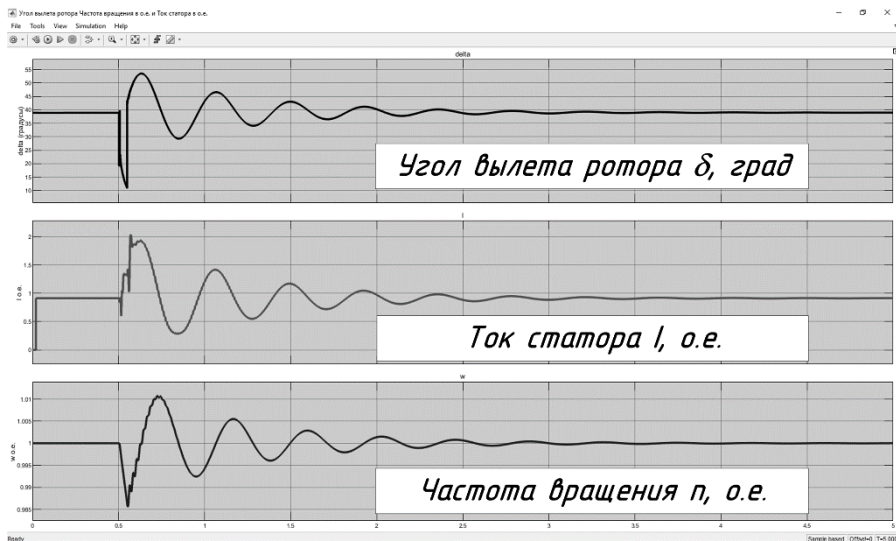


Рисунок 1 – Результаты моделирования самозапуска

Режим моделируется изменением состояния коммутатора *Breaker* (таким же образом, можно задавать и неполнофазный режим). В поле «*Switching times*» вводятся два параметра, время коммутации – соответственно отключения и включения (в секундах). На рис. 1 показаны результаты моделирования самозапуска при времени перерыва питания 0,05 с (задано время коммутации 0,5 и 0,55 с). В данном случае режим является динамически устойчивым – нагрузка восстанавливает исходный режим при времени самозапуска 2,5 с. С увеличением времени перерыва питания определяем критическое время (при большем значении самозапуск неудачен, двигатель останавливается). Результаты расчета критического времени при изменении расчетных условий приведены на рис. 2.

Универсальным способом улучшения самозапуска является уменьшение времени перерыва питания, основанное на использовании быстродействующей автоматики. Но на практике для объекта исследования он практически неприменим (повысить быстродействие имеющихся устройств АВР не представляется возможным). Вторым методом является уменьшение

загрузки двигателя (рис.2-а) – это очевидно, т.к. нагрузочный момент  $M_0$  прямо пропорционален коэффициенту загрузки  $K_3$  (в относительных единицах они эквивалентны). Но на практике подобное уменьшение ограничено технологией – при снижении нагрузки на наиболее ответственных потребителях их самозапуск будет уже неактуален из-за нарушения технологического процесса. Поэтому при анализе критического времени нами варьировались коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , напряжение в узле подключения нагрузки  $U$ , длина (как следствие – сопротивление) питающих линий  $L_\Sigma$  (изменялась относительно проектного значения  $L$ ).

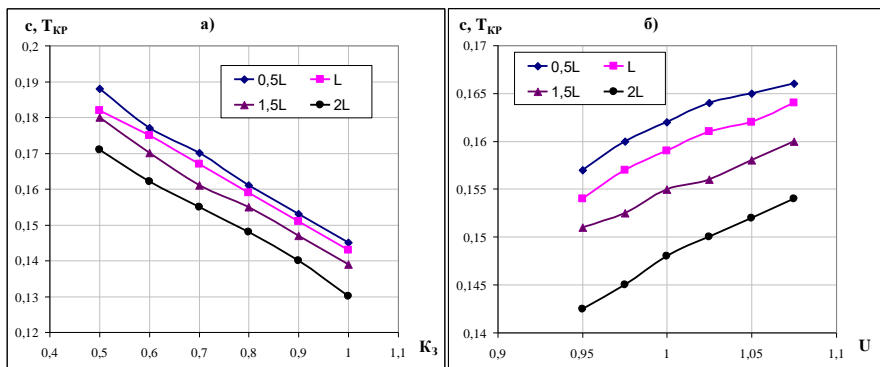


Рисунок 2 – Изменение критического времени при вариации расчетных условий

Таким образом, показана возможность моделирования режима в Matlab, корректность которого подтверждается теоретическими положениями. Для объекта исследования условия обеспечения самозапуска практически сводятся к мероприятиям, улучшающим динамическую устойчивость (повышение напряжения, уменьшение суммарного сопротивления).

#### Список литературы

1. Постановление Правительства Тульской области №199 от 29.04.2020. Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Тульской области на 2021-2025 годы.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ИД Питер, 2007. – 288 с.
4. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 421 с.

Материал принят к публикации 27.09.21.

УДК 621.31

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edd341c8.81845475

## ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В СЕТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЦЕХА

**Евгений Сергеевич Кинев**<sup>1</sup>, директор, доцент, к.т.н., Kinev\_ES@ontecom.com

**Алексей Андреевич Тяпин**<sup>2</sup>, аспирант, Mishinskaya\_AS@tamerlan-krk.ru

**Алексей Анатольевич Хороших**<sup>2</sup>, аспирант, Lexicon12x@gmail.com

**Матвей Денисович Колодочкин**<sup>2</sup>, аспирант, matvyshakolodochkin@gmail.com

**Василий Иванович Пантелеев**<sup>2</sup>, зав. кафедрой электроэнергетики, д.т.н., профессор, pvi0808@rambler.ru

<sup>1</sup>ООО Тепловые электрические системы,

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

*Аннотация. Рассмотрены причины ухудшения электромагнитной обстановки в цеховой распределительной сети металлургического предприятия с мощными вентильными регуляторами. Предложено локальное решение задачи улучшения электромагнитной совместимости, посредством применения цифровой микроконтроллерной системы управления тиристорными регуляторами миксеров сопротивления. Эффект достигается за счет более точного выполнения условий коммутации вентилей каждой фазы в момент перехода через нуль. Это позволяет не только снизить уровень высших гармоник тока в распределительной сети и улучшить симметрию напряжений, но также повысить устойчивость работы оборудования.*

*Ключевые слова: трехфазная распределительная сеть, вентильный регулятор, микроконтроллерное управление, электромагнитная совместимость, высшие гармоники.*

### DIGITAL CONTROL SYSTEM OF THE THYRISTOR REGULATOR IN THE NETWORK OF THE METALLURGICAL SHOP

E. S. Kinev<sup>1</sup>, Director, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Krasnoyarsk, Russia, Kinev\_ES@ontecom.com

A. A. Tyapin<sup>2</sup>, Postgraduate Student, Mishinskaya\_AS@tamerlan-krk.ru

A. A. Khoroshikh<sup>2</sup>, Postgraduate student, Lexicon12x@gmail.com

M. D. Kolodochkin<sup>2</sup>, Postgraduate Student, matvyshakolodochkin@gmail.com

V. I. Panteleev<sup>2</sup>, Head of the Department of Electric Power Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, pvi0808@rambler.ru

<sup>1</sup>Thermal Electrical Systems LLC, <sup>2</sup>Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk

*Abstract. The reasons for the deterioration of the electromagnetic environment in the workshop distribution network of a metallurgical enterprise with powerful valve regulators are considered. A local solution to the problem of improving electromagnetic compatibility is proposed by using a digital microcontroller control system for thyristor regulators of resistance mixers. The effect is achieved due to a more accurate fulfillment of the conditions for switching the gates of each phase at the moment of zero crossing. This allows not only to reduce the level of higher harmonics of the current in the distribution network and improve the symmetry of voltages, but also to increase the stability of the equipment.*

*Keywords: three-phase distribution network, valve regulator, microcontroller control, electromagnetic compatibility, higher harmonics.*

На металлургических предприятиях при эксплуатации основного и вспомогательного оборудования используется технологический нагрев тепловыми электрическими нагревателями (ТЭН). При этом управление температурным режимом расплава алюминия осуществляется с помощью тиристорных регуляторов [1]. Контроллеры вентильных регуляторов строят по принципу фазоимпульсного управления. С повышением потребляемой мощности становится актуальной оценка взаимного влияния работы соседних агрегатов, поддержание устойчивости работы всего комплекса технологических установок [2]. В тяжелой электромагнитной обстановке, нередко возникает необходимость модернизации производства [3]. Эффект ухудшения электромагнитной совместимости (ЭМС) особенно ярко проявляется при эксплуатации установок с фазоимпульсным регулированием температуры мощных нагревателей металлургических печей и транспортных лотков для расплава алюминия [4]. Режимные характеристики фазовых регуляторов в сети 0,4 кВ должны обеспечивать мощности потребления в десятки мегаватт, при токах каждой из 4-6 печей до 1000 ампер при низких значениях естественного коэффициента мощности.

Показатели качества электроэнергии технологической электросети страдают от несовершенства технологии управления переключением мощных вентилях, обусловленной схмотехникой модуля синхронизации задающего звена контроллера [5]. Как правило, его выполняют в виде схемы детектора перехода через ноль по каждой из трех фаз. Такой подход обоснован при бытовом применении для регулировки потребителей небольшой мощности. Однако, при одновременной работе в магистрали мощных нагрузок, с несинусоидальностью токов свыше 40 % при слабой сети подводящих алюминиевых кабелей, появляются провалы напряжения в момент закрытия тиристоров [6]. Появление импульсных помех в одной фазе, в силу связности линий питания через силовой трансформатор, приводит к импульсным выбросам в других фазах и агрегатах, подключенных к распределительной сети [7]. Это приводит к резкой несинусоидальности напряжений (свыше 12 %) при явно выраженных знакопеременных производных по напряжению и току.

Насыщение сети высшими гармониками приводит к ошибке при определении истинного момента перехода через ноль, и как следствие - к несвоевременному формированию импульса открытия силового тиристора. Тем самым, подавая меньше или больше мощности на нагреватель. Этот эффект проявляется как постоянный шум при измерении тока нагрузки при постоянном управляющем сигнале на регуляторе. Рассогласованные управляющие воздействия приводят к ошибкам в работе соседних агрегатов и возникновению аналогичных помех. В зависимости от мощности, уставок, режимов работы, помехи могут динамически суммироваться, и даже входить в резонанс. Указанная проблема чревата авариями для оборудования, работающего за пределами расчетных режимов [8].

Проблема устойчивости сети усугубляется возникновением токов реактивного характера, даже при резистивной нагрузке, что приводит к дополнительным потерям, нагреву проводов, эмиссии электромагнитных помех, влияющих на все электроприемники и измерительное оборудование цеха. В результате воздействия перечисленных факторов, системы автоматического регулирования могут давать ошибочные команды исполнительным механизмам и устройствам. Поддержание элементов распределительной сети в работоспособном состоянии, требует комплекса мер не только по компенсации реактивных мощностей и симметрированию режимов, но также по защите измерительных и сигнальных цепей от импульсных помех [9].

Одним из способов противодействия ухудшению ЭМС цеховой сети с вентильными регуляторами является создание цифрового микроконтроллерного модуля управления мощной нагрузкой. Работа модуля основана на цифровой обработке сигналов, точно идентифицирующей моменты перехода сетевого напряжения через ноль. Пример структурной схемы разработанного микроконтроллерного устройства показан на рис. 1.

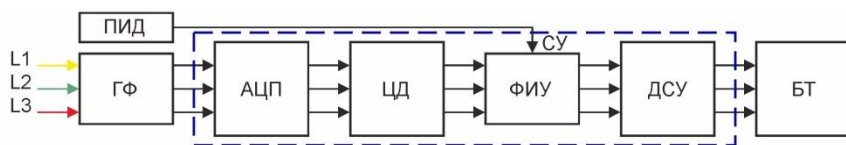


Рисунок 1 – Структурная схема контроллера тиристоров

В схеме контроллера трехфазный входной сигнал напряжения проходит гармонический фильтр ГФ и преобразуется с помощью АЦП в цифровые отсчеты. С использованием методов дискретной обработки сигналов в цифровом детекторе ЦД, выделяется сигнал синхронизации, который является аналогом сигнала перехода через ноль. Контроллер запускает формирователь импульсов управления (ФИУ), сочетая в алгоритме сигналы управления (СУ) от внешнего устройства, например, от ПИД-регулятора. Синтезированное управляющее воздействие усиливается штатным драйвером сигналов управления (ДСУ) контроллера и поступают в модуль силовых тиристоров (БТ).

Исследование взаимодействия аппаратных модулей и алгоритмов работы устройства проведено в программной среде платформы моделирования ISIS Proteus v.7. В качестве микропроцессорного средства применен целевой микроконтроллер ATmega8. Разрядность 8 бит, ОЗУ 1024 байт, ПЗУ 8192 байт. При построении устройства использованы оригинальные программно-аппаратные решения и схемотехника. Конструктивные и технологические решения, применены такие же, как в серийном промышленном оборудовании, для обеспечения удобства замены устаревших блоков на модифицированные. Результаты моделирования, макетирования и построения опытно-промышленного образца устройства показали надежность аппаратного

оснащения, а также точность и достоверность алгоритмов управления силовыми тиристорными сборками разной мощности.

Тестирование устройства выполнено в комплекте с модулями ПНТТ-630 для промышленных металлургических миксеров сопротивления емкостью 50 тонн. Долговременные испытания на печах были проведены при токах свыше 600 ампер. Кроме того, устройство испытано на системах обогрева транспортных лотков, для расплава алюминия, при токах до 200 ампер. Предложенное изделие показало значительно более надежную и устойчивую работу в сравнении со стандартными изделиями БУСТ-2 (Овен) в крайне сложной электромагнитной обстановке металлургического цеха.

### Список литературы

1. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Система электропитания МГД-перемешивателей расплава алюминия с IGBT-инверторами // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. IV Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 190-195. DOI: 10.51932/9785907271739\_190

2. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Постановка задачи анализа электромагнитной совместимости МГД-перемешивателей расплава алюминия. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 8, 2021. с. 41-49. ISSN: 2074-9635.

3. Kinev E. S., Tyapin A. A., Litovchenko A. V. Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. The scientific heritage. Budapest, 2020. No 49-1, Vol. 1. pp. 69-74. ISSN 9215-0365.

4. Головенко Е. А., Литовченко А. В., Тяпин А. А., Кинев Е. С. Электрооборудование для транспортировки жидкого алюминия. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 8, 2019. с. 43-55. ISSN: 2074-9635.

5. Williams B. W. Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components. Glasgow. United Kingdom, 2006, 1432 p. ISBN: 978-0-9553384-0-3.

6. The Industrial Electronics Handbook. Power electronics and motor drives. B. M. Wilamowski and J. D. Irwin edition. Taylor and Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York. USA, 2011, 974 p.

7. Кинев Е. С., Тяпин А. А., Пантелеев В. И., Первухин М. В., Литовченко А. В. Динамика параметрических ШИМ-моделей индукционных устройств. В кн.: Сборник материалов конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2021) 4 июня 2021. Чебоксары: ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». С. 107-111.

8. Kinev E., Tyapin A., Panteleev V., Pervukhin M. Application of analog phase splitting in induction device simulation systems. The Scientific Heritage. 2021. № 65-1 (65). pp. 56-66.

9. Tyapin A. A., Panteleev V. I., Kinev E. S., Efimov S. N., Bezhitsky S. S. Binary control characteristics of resistive models of the induction devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021) 29th-30th April 2021, Krasnoyarsk, Russian Federation. 1155 012044. <https://doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012044>.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 621.396

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eddbd2f6.91578385

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА АНТЕННЫ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

*Дмитрий Владимирович Клюкин*<sup>1</sup>, инженер, yuhoo11@mail.ru

*Александр Витальевич Демаков*<sup>2</sup>, доцент, к.т.н., demakov\_av@tu.tusur.ru

*Антон Андреевич Иванов*<sup>3</sup>, м.н.с, anton.ivvv@gmail.com

*Сергей Петрович Куксенко*<sup>4</sup>, доцент, д.т.н., ksergp@mail.ru

<sup>1,3</sup>НИЛ «ФИЭМС» ТУСУР, Россия, Томск

<sup>2,4</sup>ТУСУР, Россия, Томск

*Аннотация.* Выполнено сравнение моделей источников возбуждения при моделировании антенн методом моментов. На примере симметричного электрического вибратора показано, что использование набора смежных ребер при задании воздействия позволяет получить корректные результаты при учащении расчетной сетки модели антенны.

*Ключевые слова:* численные методы, метод моментов, источник возбуждения, входной импеданс, антенна.

### MODELING THE ANTENNA INPUT IMPEDANCE BY THE METHOD OF MOMENTS

Dmitry V. Klyukin<sup>1</sup>, engineer, yuhoo11@mail.ru)

Alexander V. Demakov<sup>2</sup>, associate professor, PhD, demakov\_av@tu.tusur.ru

Anton A. Ivanov<sup>3</sup>, junior researcher, anton.ivvv@gmail.com

Sergey P. Kuskenco<sup>4</sup>, associate professor, doctor of technical sciences, ksergp@mail.ru

<sup>1,3</sup>Research Laboratory «FSEMC» TUSUR, Russia, Tomsk

<sup>2,4</sup>TUSUR, Russia, Tomsk

*Abstract.* The paper presents a comparison of excitation source models when modeling antennas by the method of moments. By using a set of adjacent edges when specifying the impact, it is possible to obtain correct results when the computational grid of the antenna model is more frequent. This is shown on the example of a symmetric electric vibrator.

*Keywords:* numerical methods, method of moments, gap source, input impedance, antenna.

При автоматизированном проектировании антенн широко используется метод моментов (МоМ) [1]. Согласно методу, проводящие поверхности проектируемой антенны заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения электромагнитного поля этими токами для заданных граничных условий. Для аппроксимации криволинейных границ поверхностей геометрических моделей антенны часто используется их представление в виде треугольной полигональной сетки, а для описания тока в ячейках сетки – базисные функции RWG [2]. Вычисление плотности распределения токов  $\mathbf{I}$  на поверхности модели выполняется путем сведения задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений вида  $\mathbf{ZI}=\mathbf{V}$  с матрицей порядка  $N$  и

заданным вектором воздействия  $\mathbf{V}$ . При этом структура часто возбуждается источником напряжения  $V_{in}$ , приложенным к бесконечно малому зазору  $\Delta$  между двумя смежными треугольниками сетки с общим ребром  $m$  длиной  $l_m$  (рис. 1) [3]. Входной импеданс антенны  $Z_{in}$  определяется отношением  $V_{in}$  к значению тока в ребре  $m$ , что может приводить к некорректным результатам при уменьшении шага дискретизации сетки. Для повышения точности вычислений используются модели, основанные на использовании набора смежных треугольников для введения  $V_{in}$  в исследуемую структуру [4, 5]. Однако для разработки универсального метода задания возбуждения целесообразен сравнительный анализ этих моделей на примере моделирования входного импеданса антенны. Цель работы – выполнить этот анализ.

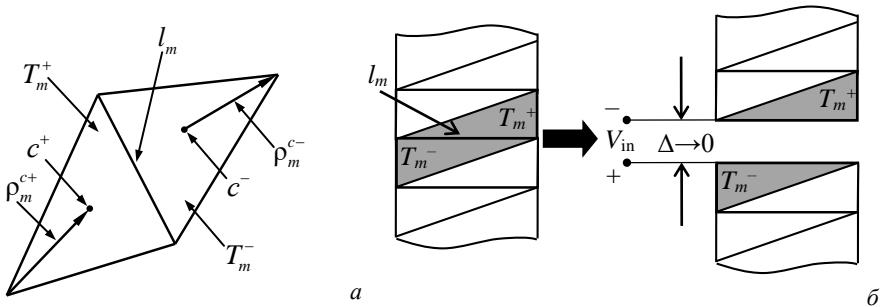


Рисунок 1 – Два смежных треугольника с общим ребром (а) и модель источника возбуждения (б)

Известна модель источника возбуждения в виде плоского проводника прямоугольной формы с шириной  $W$ , устанавливаемого в зазор исследуемой структуры [4]. Электрическое поле в зазоре может быть представлено как

$$\mathbf{E}_z = \frac{V_{in}}{W} \left[ u \left( z + \frac{W}{2} \right) - u \left( z - \frac{W}{2} \right) \right] \mathbf{n}_z,$$

где  $u(\cdot)$  – функция Хевисайда,  $\mathbf{n}_z$  – единичный орт, направленный вдоль оси  $z$ .

Элементы  $V_m$  вектора воздействия для всех пар треугольников внутри модели источника вычисляются как

$$\begin{aligned} V_m = & \frac{l_m V_{in}}{2W} \left[ u \left( z^{c^+} + \frac{W}{2} \right) - u \left( z^{c^+} - \frac{W}{2} \right) \right] (\boldsymbol{\rho}_m^{c^+} \cdot \mathbf{n}_z) + \\ & + \frac{l_m V_{in}}{2W} \left[ u \left( z^{c^-} + \frac{W}{2} \right) - u \left( z^{c^-} - \frac{W}{2} \right) \right] (\boldsymbol{\rho}_m^{c^-} \cdot \mathbf{n}_z), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\boldsymbol{\rho}_m^{c^+}$  – вектор, направленный от свободной вершины треугольника  $T_m^+$  к его центру,  $\boldsymbol{\rho}_m^{c^-}$  – вектор, направленный от центра треугольника  $T_m^-$  к его свободной вершине,  $z^{c^+}$  и  $z^{c^-}$  – координаты  $z$  точек  $c^+$  и  $c^-$  (рис. 1а).



Входной импеданс антенны  $Z_{in}$  определяется как

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_k l_k},$$

где  $k=1, 4$  или  $5$  – номер базисной функции (рис. 2а).

Обобщением данной модели является случай, когда на границе источника и антенны располагаются несколько треугольников [5]. При этом значения  $V_m$  для всех пар треугольников внутри источника вычисляются по (1), а  $Z_{in}$  – как

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{\sum_p I_p l_p},$$

где  $p$  – номера базисных функций на смежных треугольниках, общие ребра которых лежат на границе между источником и антенной.

Выполнена реализация моделей источников возбуждения [3–5] в математическом пакете GNU Octave [6]. Для их сравнения использована модель плоского симметричного электрического вибратора (диполя) на частоте 75 МГц (длина волны  $\lambda=4$  м) [4]. Вычисления  $Z_{in}$  антенны выполнены при  $W=0,025$  м и изменении шага дискретизации сетки  $\lambda/40$  и  $\lambda/250$ , что соответствует размещению одной (рис. 2а) и четырех пар (рис. 2б) смежных треугольников на границе между источником и антенной.

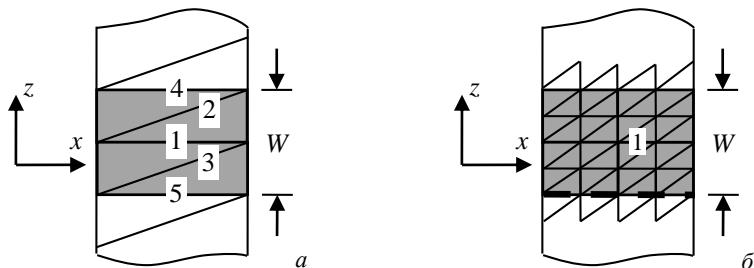


Рисунок 2 – Источник возбуждения диполя при дискретизации  $\lambda/40$  (а) и  $\lambda/250$  (б)

Для верификации полученных результатов использована система EMPro [7], в которой для рассматриваемой дипольной антенны получено  $Z_{in}=97,54+i39,4$  Ом.

При грубой дискретизации (рис. 2а) напряжение  $V_{in}=1$  В задавалось в ребре 1 (модель из [3]) и ребрах 1–5 (модель из [4]). Полученные значения входного импеданса сведены в табл. 1. Видно, что обе модели дали близкие к EMPro значения. При этом наименьшее расхождение наблюдается при использовании модели из [3], для которой разница  $Z_{in}$  составила  $2,96-i0,82$  Ом.

При частой дискретизации (рис. 2б) напряжение  $V_{in}=1$  В задавалось в ребре 1 (модель из [3]) и во все 48 ребер, расположенных внутри зазора (модель из [5]). Из полученных результатов видно, что использование

одного смежного ребра для задания воздействия при частой сетке приводит к некорректным результатам (табл. 1). При этом результаты, полученные с помощью модели [5], близки к значению, вычисленному в EMPro (разница  $Z_{in}$  составила 5,49–i8,89).

Таблица 1 – Значения  $Z_{in}$  диполя при изменении модели возбуждения

Сетка	$N$	Модель возбуждения	Число ребер в источнике	$Z_{in}$ , Ом
Грубая	67	[3]	1	$94,58 + i40,22$
	67	[5]	5	$90,63 + i43,68$
Частая	1502	[3]	1	$4e-4 + i1,41$
	1502	[5]	48	$92,05 + i48,29$

В результате, на примере диполя показано, что модель из [4, 5] дает корректные результаты при любом шаге дискретизации сетки. Тем не менее, наименьшие различия значений входного импеданса относительно системы EMPro получены для модели из [3] при грубой расчетной сетке. Однако применение данной модели при учащении сетки приводит к некорректным результатам. В дальнейшем целесообразно исследовать применение этих моделей к более сложным структурам антенн в диапазоне частот. Полученные результаты могут быть использованы при разработке САПР для проектирования антенн и СВЧ-устройств.

*Исследование поддержано Министерством Науки и Высшего Образования (проект FEWM-2020-0039).*

#### Список литературы

1. Makarov S. N. Antenna and EM modeling with MATLAB. New York: John Wiley & Sons, 2002. 288 p.
2. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1982. Vol. 30. No. 3. P. 409–418.
3. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetic. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2008. 272 p.
4. An enhanced gap source model / W. Ding, et al. // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61. No. 3. P. 1266–1272.
5. Du P., Fu W.J. Comparison of two feed models considering gap width for antennas // Proceedings of IEEE Asia-Pacific conference on antennas and propagation (APCAP). 2018. P. 23–24.
6. GNU Octave [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gnu.org/software/octave/> (дата обращения: 10.10.2021).
7. Система EMPro [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html> (дата обращения: 10.10.2021).

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ede47aa6.15199092

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ**

**Максим Борисович Колесник**, студент кафедры электромеханики,  
kolmax2001@mail.ru

**Сергей Николаевич Иванов**, д.т.н., доцент, профессор

Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре

*Аннотация. Приведено сравнительное описание наиболее популярных и профессиональных пакетов по 3D-моделированию, использующих при решении задач метод конечных элементов. Обоснован выбор использования на данном этапе исследований пакета SolidWorks Simulation. Приведены его основные достоинства. Спроектирована 3D-модель реального функционирующего асинхронного двигателя и доработана для выполнения операций по линейному перемещению. Произведён статический анализ на прочность асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента с помощью подключаемого модуля SolidWorks Simulation. Проведён непосредственный анализ полученного результата напряжённно-деформированного состояния двигателя. Сделаны выводы о его пригодности к работе с осевыми нагрузками. Определены основные направления последующих исследований асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках.*

*Ключевые слова: напряжённно-деформированное состояние, SolidWorks Simulation, статический анализ, напряжения.*

### **ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR UNDER AXIAL LOADS**

Maxim B. Kolesnik, Student, Electromechanics Department, kolmax2001@mail.ru

Sergei N. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor

Komsomolsk-on-Amur State University, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur

*Abstract. A comparative description of the most popular and professional 3D modeling packages using the finite element method in solving problems is given. The choice of using the SolidWorks Simulation package at this stage of research is justified. Its main advantages are given. A 3D model of a real functioning asynchronous motor has been designed and modified to perform linear displacement operations. A static analysis of the strength of an asynchronous motor with linear displacement of the actuator using the plug-in module SolidWorks Simulation was performed. A direct analysis of the obtained result of the stress-strain state of the engine is carried out. Conclusions are drawn about its suitability to work with axial loads. The main directions of subsequent research of asynchronous motors with a short-circuited rotor under axial loads are determined.*

*Keywords: stress-strain state, SolidWorks Simulation, static analysis, stresses.*

**Введение.** Электрический привод (ЭП) играет большую роль в реализации задач повышения производительности труда в разных отраслях

народного хозяйства, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. В статье рассматривается возможность применения электропривода на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента, конструктивное исполнение и принцип действия которого описаны в [1-2]. Применение такого типа ЭП может найти широкое применение на железной дороге, в авиастроении, строительстве, сельском хозяйстве и др.

Анализ конструкции электропривода на основе асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента показал, что используемое в нём сопряжение типа «винт-гайка» является наиболее слабым звеном привода, и для выбора размерных соотношений передаточных элементов была разработана методика, основу которой составили технические и эксплуатационные характеристики электромеханических преобразователей [3]. При этом определяющим критерием выбора размерных соотношений задаётся механическая устойчивость с учётом всех воздействующих усилий.

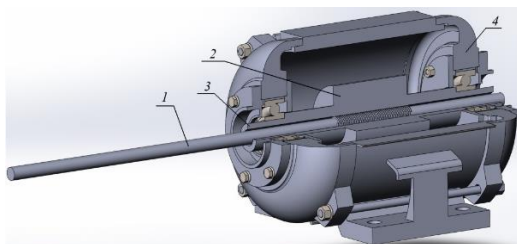
Основной задачей, решаемой в данной статье, являлось определение возможности использования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при работе с осевыми нагрузками путём проведения анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов в пакете SolidWorks Simulation.

**Обоснование выбора программы.** Среди существующих пакетов программ, позволяющих производить расчёты на прочность и тепловые расчёты, следует отметить программные пакеты MSC Nastran, Ansys и SolidWorks. После обзора данных программ был сделан выбор в пользу пакета SolidWorks Simulation. Основными достоинствами программы являются удобный интерфейс, позволяющий быстро её освоить, наличие русскоязычной версии, автоматическое и ручное создание конечного элемента сеток (трёх- и шестиузловые треугольники, четырёх- и десятиузловые тетраэдры), а её модели могут быть легко интегрированы в CAD/CAM/CAE-системы различных уровней [4].

**Объект исследования.** Для проведения исследования в программе SolidWorks была создана модель, соответствующая типовому асинхронному двигателю. Для осуществления операций по линейному перемещению модель была конструктивно модифицирована – в роторе предусмотрено технологическое отверстие, в котором нарезана трапециевидная резьба для последующей установки исполнительного элемента (тяги). Конструктивное исполнение модифицированного двигателя представлено на рис. 1.

**Статический анализ.** Конструктивно двигатель представляет собой сложный механизм, и для того, чтобы оценить его способность выдерживать осевые нагрузки, необходимо учесть много внутренних и внешних факторов, поэтому для повышения эффективности получения результата задача была разделена на два этапа:

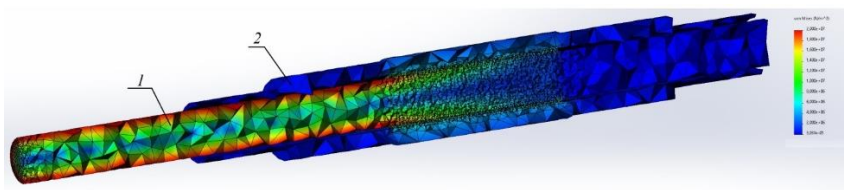
1. Анализ передаточного механизма, который конструктивно представляет собой втулку ротора и тягу с нарезанной на их внутренней и внешней стороне соответственно трапецеидальной резьбой.
2. Статический анализ корпуса двигателя.



*Рисунок 1 – Конструкция двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента:  
1 – исполнительный элемент (тяга); 2 – ротор;  
3 – втулка ротора; 4 – корпус двигателя*

Для проведения статического анализа конструкциям на обоих этапах были заданы закрепления, определяющие их степени свободы, соответствующие данной задаче, и приложены внешние нагрузки в виде вращающего момента или силы.

Результат первого этапа исследования представлен на рис. 2. В данном случае вращающий момент приложен к втулке ротора и равномерно распределён по ней.

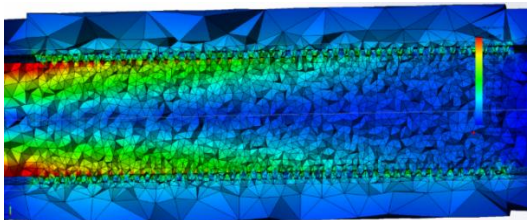


*Рисунок 2 – Статический анализ передаточного механизма типа «винт-гайка»:  
1 – исполнительный элемент (тяга); 2 – втулка ротора*

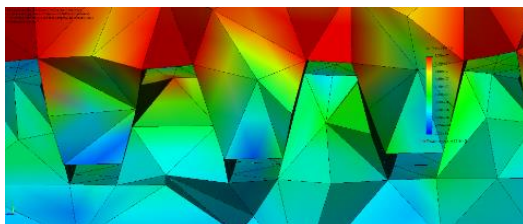
Анализ результатов показал, что наиболее нагруженной частью является исполнительный элемент. На рис. 3 видно, что нагрузка по виткам резьбы распределяется неравномерно и основная нагрузка приложена к первой половине витков, там же и возникают наибольшие напряжения во всей конструкции. На рис. 4 крупным планом показано распределение нагрузки на первых витках резьбового соединения [5].

Результаты второго этапа исследования представлены на рис. 5 и 6. В данном случае внешняя нагрузка приложена к правому (на рис. 5) подшипнику в виде равномерно распределённой силы. Её величина была определена из эпюры напряжений первого исследования. По рис. 5 и 6 следует отметить, что большие напряжения проявляются в местах затяжки болтовых соединений, а

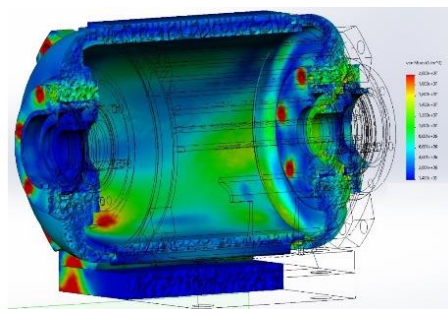
также на лапах, в местах крепления к корпусу двигателя (на рис. 5 – слева, на рис. 6 – справа), это связано с возникновением момента между областью крепления лап к корпусу и местом приложения силы [6].



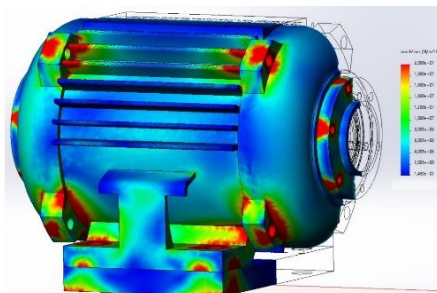
*Рисунок 3 – Витковая область*



*Рисунок 4 – Нагрузка в зубцах*



*Рисунок 5 – Результаты статического анализа корпуса в разрезе*



*Рисунок 6 – Результаты статического анализа корпуса двигателя, вид снаружи*

**Заключение.** Проведённые вычислительные эксперименты показали, что стандартный двигатель может выдерживать осевые нагрузки, но запас прочности по всей конструкции различный, в частности, максимальный запас прочности у корпуса двигателя, существенно меньший – у передаточного механизма. Для обеспечения принципа равнопрочности и повышения эффективности использования рассматриваемой конструкции электропривода необходимо, чтобы весь двигатель имел примерно одинаковый запас прочности, соответственно, его конструкция требует внесения изменений. Для этого необходимо проведение полного факторного эксперимента по определению возникающих напряжений в двигателе, по результатам которого можно установить определяющее и второстепенные проектные параметры [7].

#### Список литературы

1. Колесник, М. Б. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, В. А. Макаренко, Т. К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 44-50.

2. Колесник, М. Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № IV-1 (47). – С. 14-19.

3. Ivanov, S. N. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K.K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.

4. Иванов, С. Н. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Горбунов, Т. С. Титова, В. В. Никитин, И. Г. Киселев // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.

5. Колесник, М. Б. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49) – С. 29-36.

6. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

7. Колесник, М. Б. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, Ю. Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.

*Материал принят к публикации 07.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eded4718.16248970

## ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ПЕЧАТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

**Михаил Олегович Лапшов**, аспирант, michaelapshov@yandex.ru

**Сергей Владимирович Прытков**, к.т.н., доцент кафедры «Светотехника»

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева  
Россия, Саранск

*Аннотация. В статье рассматривается применение САПР для методов печатной электроники. Приведены аргументы в пользу необходимости создания прикладного САПР, для ускорения процесса разработки и проектирования в печатной электронике. Проведен анализ применения печатной электроники в разработке «умной» одежды.*

*Ключевые слова: печатная электроника, САПР, шелкография, трафаретная печать, фотовывод, носимые электронные устройства, умная одежда.*

### APPLICATION OF CAD IN PRINTED ELECTRONICS

Mikhail O. Lapshov, graduate student, michaelapshov@yandex.ru

Sergey V. Prytkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Lighting Engineering

Mordovian University N.P. Ogareva, Russia, Saransk

*Abstract. The article discusses the use of CAD systems for printed electronics methods. The differences in the use of CAD for printed electronics in comparison with traditional ones are described. Arguments are given in favor of the need to create an applied CAD system to speed up the development and design process in printed electronics.*

*Keywords: printed electronics, CAD, silk-screen printing, screen printing, photo output, wearable electronic devices, smart clothes.*

В последние годы одним из перспективных направлений развития носимых устройств считается печатная электроника. Данная технология на минимизацию материальных и производственных затрат, и программное обеспечение, включая САПР несколько отличаются от тех, что применяются в традиционной электронике.

Самой распространенной технологией создания печатных электрических схем является шелкография (трафаретная печать). Данная технология широко применяется более 15 лет. Сам процесс создания трафарета зачастую зависит от тех или иных аппаратных средств. Часто приходится конвертировать файлы из формата в формат, при этом качество изображения схемы значительно падает.

При использовании метода трафаретной печати одной из основных технологических операций является засветка сетки трафарета. Данная операция включает в себя создание фотовывода и нанесение УФ-отверждаемой краски на сетку.



Фотовывод представляет собой пленку с рисунком, с нанесенным черными чернилами, которые не пропускают свет от УФ лампы.

Чтобы создать корректный рисунок для трафарета используются различные САПР, такие как КОМПАС и AutoCAD. Затем в программе CorelDRAW определённой цветовой гаммой закрашиваются линии будущего печатного слоя. Перед закрашиванием, необходимо конвертировать файл из САПР в формат dxf, при этом файл в CorelDRAW отображается некорректно. Некоторые линии из файла САПР накладываются друг на друга или вообще отсутствуют, что требует дополнительных затрат по времени на корректирование исходного файла.

Печатная электроника нацелена на минимизацию материальных и производственных затрат, что позволяет существенно снизить стоимость изделий электронной техники, увеличить эффективность их производства, создавать гибкие приборы с улучшенными рабочими характеристиками, повышенной надёжностью и экологической безопасностью. Это особенно важно для крупногабаритной электроники, такой как дисплеи [6] фотоэлектрические преобразователи [2] и датчики большой площади [3]. Подобные результаты могут быть достигнуты совместным применением новых функциональных чернил (со свойствами проводников, полупроводников и диэлектриков) и современных полиграфических платформ (глубокой, флексографской, струйной печати, гравировки). Уже сейчас разработаны и активно внедряются различные типы чернил, начиная от проводников, изоляторов и полупроводников с неорганическими и / или органическими материалами, для печати транзисторов [4], светодиодов [5].

Одним из основных направлений развития технологии печатных электронных устройств является создание электронных элементов, интегрированных непосредственно в одежду. Как известно «носимые» электронные устройства в последнее время привлекают значительное внимание благодаря огромному потенциалу таких качеств, как интерактивность, мобильность, удобство [1]

В 2016 году сегмент умной одежды составлял около 1% рынка носимых устройств. Всего было отгружено 1,3 миллиона устройств. По прогнозу IDC Mobile Device Trackers, этот сегмент продемонстрирует рост в 9,4% к 2021 году.

Согласно прогнозным данным IDC Worldwide Quarterly Wearable Device Tracker в 2021 году будет отгружено 22,3 млн изделий умной одежды. Исследователи рынка умной одежды из Tractica предсказывают, что это число достигнет 26,9 млн единиц в 2022, а совокупный среднегодовой темп роста составит приблизительно 76,6% с 2016 по 2021 гг. Это самый высокий прогнозируемый рост сегмента на всем рынке носимых устройств.

Основные требования к устройствам подобного рода это высокая гибкость/растяжимость, долговечности, биосовместимость, гипоаллергенность и малый вес. Исходя из этого крайне важно учитывать

следующие ключевые моменты при создании компонентов и материалов носимых устройств:

- Использование нетоксичных, химически стабильных, низкотемпературных чернил для высокого качества печати.
- Высокое разрешение и однородность печати для повышения проводящих свойств и высокой интеграции других элементов.
- Использование гибких/растягиваемых субстратов для электронных устройств, которые необходимо носить или интегрировать с телом человека.
- Адаптировать конкретную конструкцию устройства для предотвращения растрескивания и скольжения, что обеспечит высокую долговечность.

Таким образом, путем управления процессом печати и правильной подборкой материалов можно изготовить высокопроизводительную износостойкую электронику [7].

В современной промышленности в целом, и в производстве одежды в частности, находит применение огромное число эластичных материалов. Все они обладают обширным спектром свойств, но с точки зрения процесса печати их можно разделить на две категории. Первые — плотные, непроницаемые материалы и композиты, например, резина, латекс, брезент. Вторые — текстильные полотна, полученные прядением из отдельных нитей и волокон. Они имеют пористую, проницаемую для печатного состава структуру. Соответственно принципы, лежащие в основе создания чернил для резины и текстиля, также будут иметь кардинальные различия.

В случае резины и других непроницаемых субстратов мы руководствовались подходом, который хорошо зарекомендовал себя при создании печатных дорожек на гибких подложках. Основными компонентами таких чернил являются проводящие наночастицы и полимерное связующее-адгезив. Главные требования к связующему — прочность, высокая адгезия к субстрату, однородность механических свойств связующего и субстрата.

Применение прикладных программ, которые позволят создавать печатные слои друг за другом без необходимости переноса и конвертации из САПР в графический редактор будет способствовать повышению эффективности производства умной одежды с применением печатной электроники.

### Список литературы

1. Fukuda, K. et al. “Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films.” *Nat. Commun.* 5, pp. 4147, 2014.
2. G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen et al “Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions” *Science*, vol. 270, № 5243, pp. 1789-1791, 2011
3. H. Kim, M. S. Onses, J. B. Lim et. al “High-resolution patterns of quantum dots formed by electrohydrodynamic jet printing for light-emitting diodes.” *Nano Lett.* vol. 15, № 2, pp. 969–973, 2015.

4. J. A. Rogers, et al. "Paper-like electronic displays: large-area rubber-stamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks" Proc. Natl Acad. Sci. USA 98, pp. 4835–4840, 2001.

5. M. Ha, J. Park, Y. Lee, H. Ko "Triboelectric Generators and Sensors for Self-Powered Wearable Electronics" ACS Nano, vol. 9, pp. 3421–3427, 2015.

6. White, M. S. et al. "Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs." Nat. Photonics 7, pp. 811–816, 2013.

7. W. Cui, W. Lu, Y. Zhang, G. Lin, T. Wei, L. Jiang "The formation of gold nanoparticles using hydroquinone as a reducing agent through a localized pH change upon addition of NaOH to a solution of H<sub>2</sub>AuCl<sub>4</sub>" Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 370, № 1-3, pp. 35–41, 2011.

*Материал принят к публикации 08.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997edf3b3c2.73211108

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА В КОМПАС-3D

**Михаил Олегович Лапшов**, аспирант, michaelapshov@yandex.ru

**Сергей Владимирович Прытков**, к.т.н., доцент кафедры «Светотехника»

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева  
Россия, Саранск

*Аннотация. В статье приведена разработка промышленного светодиодного светильника ДПП-139. Представлены основные этапы проектирования. Для создания 3d-модели использовалась программа КОМПАС-3d.*

*Ключевые слова: КОМПАС-3d, осветительный прибор, промышленное освещение, климатическое исполнение.*

### DESIGNING A LIGHTING DEVICE IN THE KOMPAS-3D

Mikhail O. Lapshov, graduate student, michaelapshov@yandex.ru

Sergey V. Pрытков, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Lighting Engineering

Mordovian University N.P. Ogareva, Russia, Saransk

*Abstract. The article describes the development of an industrial LED lamp DPP-139. The main stages of design are presented. To create a 3D model, the KOMPAS-3d program was used.*

*Keywords: KOMPAS-3d, lighting device, industrial lighting, climatic design.*

Светильники для промышленных зданий должны создавать хороший световой поток, с учетом большой площади и высоты помещений. Они обеспечивают комфортные условия труда для сотрудников.

Кроме того, светильники на промышленных объектах необходимы для организации аварийного освещения, осветительные приборы которого оснащаются источниками бесперебойного питания.

Разработку нового светодиодного светильника невозможно осуществить без детального исследования рынка существующих на данный момент

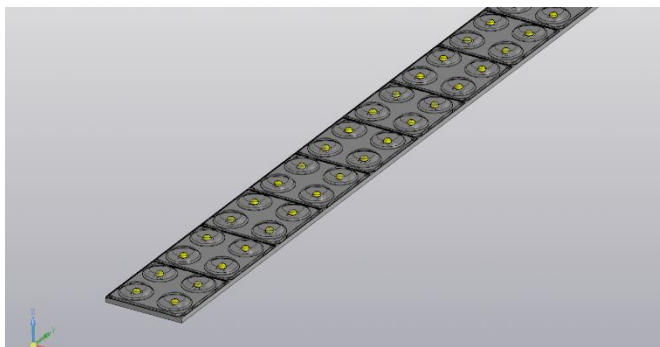
световых приборов, чтобы разработанный СП смог составить конкуренцию уже имеющимся моделям. К тому же к светильникам для промышленного освещения предъявляются достаточно строгие требования. Для облегчения проектирования нового осветительного прибора, разработчики используют современные технологии, в том числе такие компьютерные программы как: КОМПАС-3D, DIALux и другие.

Разрабатываемый световой прибор имеет климатическое исполнение У2 [3]: использование в умеренном макроклиматическом районе при эксплуатации на открытом пространстве, от  $-40\text{ C}^{\circ}$  до  $+40\text{ C}^{\circ}$ . Степень защиты светильника IP65. 6 – полная защита от контакта с пылью. 5 – серьезная защита от воды, текущей потоками с любой стороны [1].

Световой прибор предполагается сделать линейным. Светодиоды защитить от воздействия окружающей среды и механических повреждений вторичной оптикой с коэффициентом пропускания не менее 90%. Корпус светового прибора одновременно является радиатором. Данное решение более выгодно в плане теплоэффективности [2]. Система отведения тепла, обеспечит стабильность характеристик на протяжении всего срока службы светильника

На сайте компании Ledil подберем оптику к светильнику из каталога продукции. Оптика должна иметь коэффициент пропускания менее 92% и КСС типа Д (косинусная). Выбрана оптика для промышленного светильника

Для разрабатываемого СП используется 106 светодиодов Cree XLamp XM-L2 [4]. Выбрана схема сд-модуля – 1P53S, схема светильника 1P2S. Печатная плата изготовлена из стеклотекстолита (рисунок 1). Оптика для промышленного светильника вынорана из каталога на сайте компании LEDiL. Выбрана оптика C13499\_STRADA-2X2-CY [1].



*Рисунок 1 – СД с оптикой на печатной плате*

В программе КОМПАС-3D был разработан чертеж разрабатываемого светодиодного светового прибора. Данный чертеж представлен на рисунке 2.

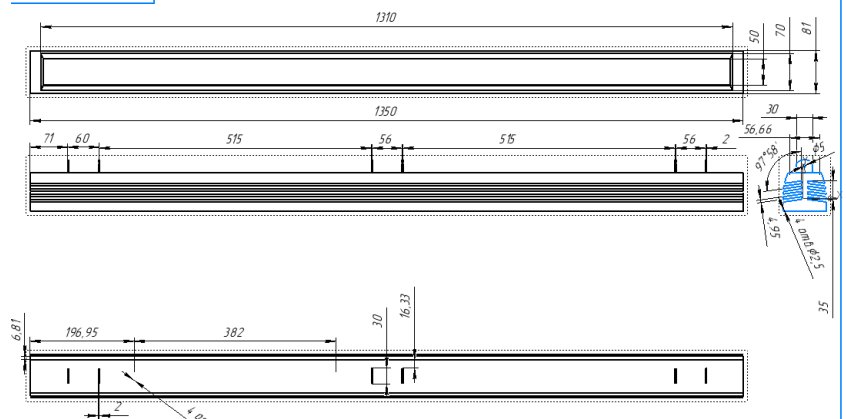


Рисунок 2 – Чертеж светильника

Корпус данного светильника выполняет функцию радиатора для отвода тепла от светодиодов в атмосферу. На рисунке 3 представлена 3-д модель корпуса радиатора.

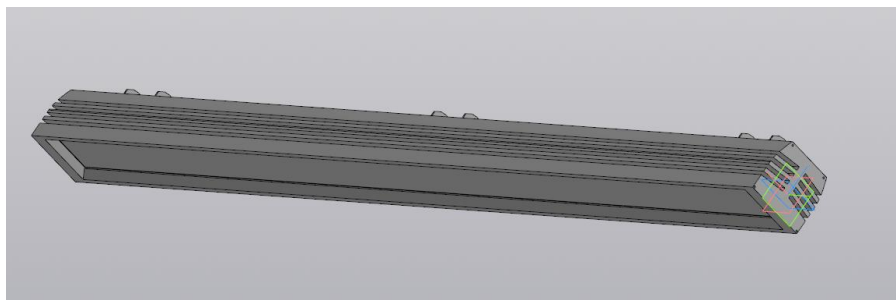


Рисунок 3 – Общий вид корпуса-радиатора

Основной материал светового прибора это АД0 ГОСТ 4784-94. Он имеет много преимуществ:

- Малый вес;
  - Технологичность материала, обеспечивающего необходимую прочность изделия;
  - Большая стойкость к коррозии металла.
  - Большая сеть производств и технологий изделий из алюминия;
  - Высокая теплопроводность материала;
  - Относительно небольшая удельная плотность;
- В таблице 1 привели материалы для всех элементов светильника.

Таблица 1 – Материалы элементов светильника

Материал	Элемент светильника
АД0 ГОСТ 4784-94	Корпус-радиатор
	Корпус для драйвера
	Ли́ра
АМг2 ГОСТ 4784-94	Печатная плата
ПММА	Оптика

При сборке светильника использовались стандартные крепёжные изделия. На рисунке 4 представлен светильник в сборке.

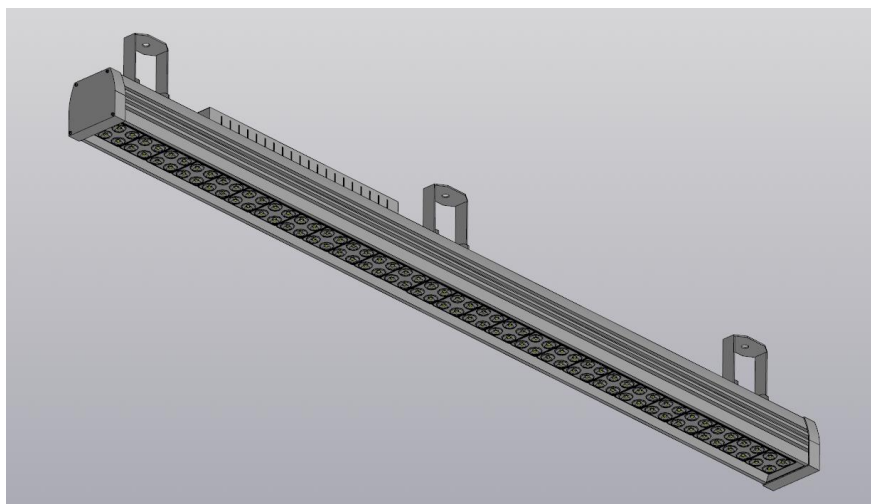


Рисунок 4 – Световой прибор ДПП-139

САПР КОМПАС-3d отличный инструмент для создания моделей световых приборов. С его помощью будущий вес конструкции и спроектировать соединительные узлы для качественной сборки. Грамотно спроектированный светильник — это залог эффективного производства.

#### Список литературы

1. ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-88). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP). – Взамен ГОСТ 14254-80; введ. – 1997-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2011. – 32 с.
2. ГОСТ 17677-82. Светильники. Общие технические условия. – Введен впервые; введ. – 1983-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2011. – 65 с.
3. ГОСТ Р 55706-2013. Освещение наружное утилитарное. Классификация и нормы. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.: ил.
4. Светодиод Cree XLamp XM-L2 – [Электронный ресурс]. – <https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-discrete/xlamp-xm-l2>.

*Материал принят к публикации 08.10.21.*

УДК 621.836.2

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee0669d4.31599336

## УЧЕТ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬСОВЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАЧЕНИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Владимир Александрович Лебедев**

Брянский государственный технический университет, доцент, к.т.н.

Россия, Брянск, lva170487@yandex.ru

*Аннотация. Рассмотрен упрощенный способ учета и регулирования жесткостных характеристик рельсовых направляющих качения станков в объемных конечно-элементных моделях.*

*Ключевые слова: рельсовая направляющая качения, каретка, рельс, тела качения, жесткость, моделирование, конечный элемент.*

### REALIZATION OF THE RIGID CHARACTERISTICS OF ROLLING RAIL GUIDES OF MACHINE EQUIPMENT

Vladimir A. Lebedev

Bryansk State Technical University, docent, Ph.D. of Engineering Sciences, Russia, Bryansk

lva170487@yandex.ru

*Abstract. A simplified method of accounting and regulation of the stiffness characteristics of rolling rail guides of machine tools in volumetric finite element models is considered.*

*Keywords: rolling rail, carriage, rail, rolling elements, stiffness, modeling, finite element.*

К станочному оборудованию, как средству производства изделий машиностроения предъявляют высокие требования, в том числе к точности воспроизведения чертежных размеров деталей. Этому способствуют точность перемещения и позиционирования ответственных подвижных элементов технологического оборудования, точность размеров и жесткость всех элементов его силовых цепей, участвующих в обработке. На общую жесткость конструкции существенно влияет жесткость стыков и особенно подвижных, к которым относятся линейные направляющие станка.

В конструкциях металлорежущих станков в основном используются линейные направляющие скольжения (гидростатические, гидродинамические, граничного, смешанного трения и др.) и качения (тела качения – шарики или ролики). Встречаются конструкции с комбинированными направляющими.

Линейные направляющие качения (рис.1) в сравнении с направляющими скольжения смешанного характера трения (как самыми распространенными) имеют меньшую грузоподъемность, меньшее демпфирование и более сложны в изготовлении, но при этом обладают очень малым коэффициентом трения качения (в пределах от 0,001 до 0,005), независящим от скорости перемещения узла (отсутствуют рывки при трогании с места), меньше интенсивность износа направляющих, они позволяют обеспечить большее ускорение и высокую

точность позиционирования подвижного узла станка [1]. На жесткость рельсовой направляющей качения влияют ее форма, размеры и преднатяг, установленный между кареткой и рельсом. Предварительный натяг определяется микронами, что требует высокой точности их изготовления.

При проектировании станочного оборудования для предварительной оценки характеристик и параметров его узлов и в целом выполняют объемные адекватные поставленным задачам компьютерные модели.

В статье рассмотрен возможный упрощенный способ учета жесткости рельсовых направляющих качения при создании компьютерных конечно-элементных моделей узлов станочного оборудования.

В качестве основного объекта моделирования рассматривалась рельсовая линейная направляющая качения серии HSR с каретками HSR35R нормального класса точности от компании Bosch Rexroth [2] (рис. 1). Данная каретка имеет систему циркуляции тел качения (шариков) без сепаратора. Каретка устанавливается на рельс с предварительным натягом 14 мкм. Углы наклона четырех контактных дорожек к плоскости опирания рельса 45 и -45 градусов, что уравнивает обратную радиальную (вертикальную отрывную) с тангенциальной (боковой) жесткостью направляющей – 1000 Н/мкм (рис. 2) [1]. При этом радиальная (вертикальная прижимная) жесткость немного больше (табл. 1). Максимальная статическая и динамическая грузоподъемность направляющей 61 и 37 кН соответственно.

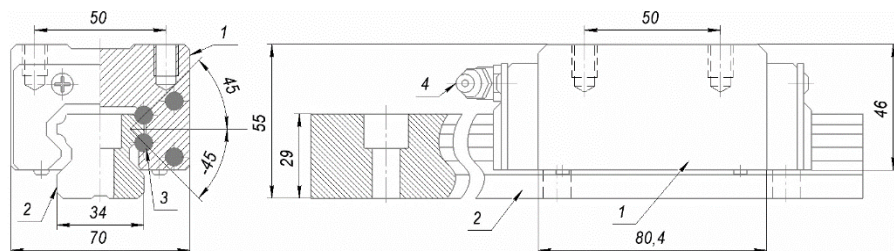


Рисунок 1 – Рельсовая направляющая качения с каретками HSR35R: 1 – каретка; 2 – рельс; 3 – шарики; 4 – смазочный ниппель

Методом конечных элементов разработана расчетная схема рельсовой направляющей качения (рис. 2, 3), которая по своим геометрическим параметрам подобна натурному образцу. Все составные части модели выполнены объемными конечными элементами, соединенными в узлах и по поверхностям взаимодействия.

Для упрощения задачи взаимодействия тел качения с несущим корпусом каретки и рельсом, тела качения имеют форму призм с квадратными основаниями, дорожки качения – прямоугольными плоскостями, эмитирующими поверхности взаимодействия (рис. 2). Качение заменяется скольжением с возможностью задать нужный коэффициент трения.



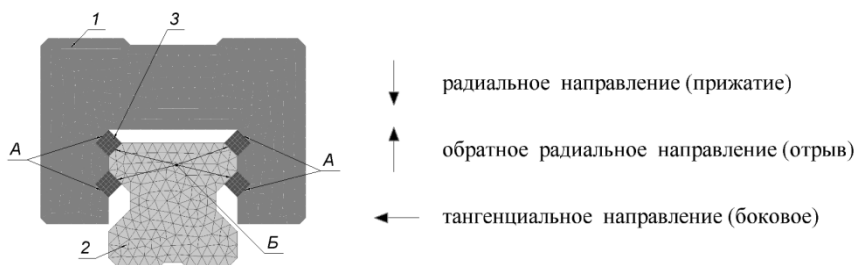


Рисунок 2 – Модель рельсовой направляющей качения: 1 – несущий корпус каретки; 2 – рельс; 3 – тела качения (шарики); А – поверхности взаимодействия тел качения с корпусом каретки; Б – поверхности взаимодействия тел качения с рельсом

Учет жесткостных характеристик осуществлялся следующим способом. Механические характеристики конечных элементов несущего корпуса каретки и рельса схожи со сталью ( $E = 2,1 \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>,  $G = 8,08 \times 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\mu = 0,3$ ). Механические характеристики конечных элементов тел качения задавались отдельно для верхней пары тел ( $E = G = 0,25 \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>) и для нижней ( $E = G = 2,1 \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>), исходя из предварительных расчетов с последующим подбором величин. Натяг между контактирующими поверхностями (А и Б) не задавался. Взаимодействие по контактным поверхностям А (рис. 2) происходит по методу СКЛЕИВАНИЕ (жесткое сцепление поверхностей во всех направлениях). Взаимодействие по контактным поверхностям Б происходит по методу КОНТАКТ СКОЛЬЖЕНИЯ (поверхности опираются друг на друга со скольжением, могут расходиться и создавать зазор). Коэффициент трения скольжения между поверхностями Б не учитывался.

Усилие прикладывалось к верхним плоскостям корпуса каретки, распределенной по площади силой 1000 Н при каждом нагружении (рис. 3). Расчеты носили статический линейный характер.

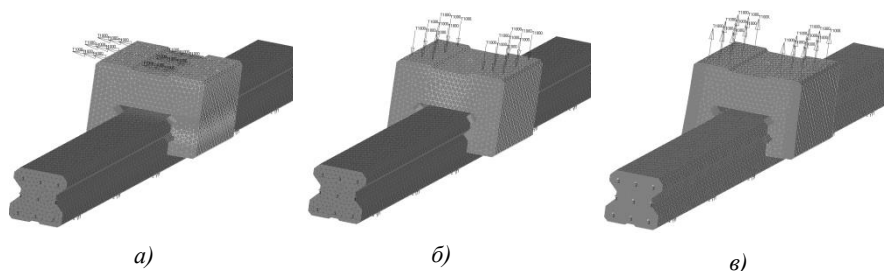


Рисунок 3 – Нагружения рельсовой направляющей тангенциальной (а), радиальной (б) и обратной радиальной (в) силой (распределенной по поверхности)

Закрепление рельса осуществлялось от вертикальных перемещений по нижним опорным поверхностям, от боковых – по нижней кромке боковой поверхности, от осевых – по торцевой поверхности. Болтовое прижатие рельса

к опорной поверхности не моделировалось. В зависимости от направления нагрузки закрепление узлов несущего корпуса каретки выполнялось либо в радиальном, либо в осевом направлении.

Оценка жесткостных характеристик (табл. 1) рельсовой направляющей качения осуществлялась отдельно для каждого направления нагружения на основе величин деформационных смещений верхних плоскостей корпуса каретки.

*Таблица 1 – Жесткостные характеристики натурального образца и модели рельсовой направляющей качения HSR (HSR35R)*

Усилие (1000 Н)	Жесткость, Н/мкм	
	Натурный образец	Упрощенная конечно-элементная модель
Тангенциальное направление	1000	910
Радиальное направление	1200	1430
Обратное радиальное направление	1000	660

Жесткостные характеристики натурального образца и модели рельсовой направляющей качения по своим величинам близки и несколько расходятся (на 34%) в направлении обратном радиальному. Расхождение результатов объясняется расширением ветвей корпуса каретки (при стремлении оторвать ее от рельса), чему препятствует предварительный натяг натурального образца и притягивание плиты при ее монтаже. Для повышения жесткости ветвей рассмотренной конечно-элементной модели каретки можно ввести элементы усиления на уровне верхней пары тел качения внутри или снаружи корпуса.

Данный способ учета и регулирования жесткостных характеристик рельсовых направляющих качения позволяет в упрощенном виде получить адекватные модели направляющих элементов подвижных узлов станочного оборудования.

#### **Список литературы**

1. Лурье А. М. Рельсовые направляющие качения. Характеристики продукции разных производителей. Рекомендации по применению [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-302.pdf>, свободный. – (дата обращения: 07.10.2021).

2. Технология линейных перемещений. Справочное руководство / Bosch Rexroth AG [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://pkasykt.ru/images/files/catalog-bosch/Bosh-Rexort10.pdf>, свободный. – (дата обращения: 02.10.2021).

*Материал принят к публикации 16.10.21.*

УДК 675.026

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee0de776.48134911

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЖИРОВАНИЯ КОЖИ ДЛЯ ВЕРХА ОБУВИ НА ОСНОВЕ СЛОЖНОГО ЭФИРА**

**Хилола Норбек қизи Махаммадиева**, базовый докторант  
khilola.norbekovna@mail.ru

**Махбуба Бадриевна Шамсиева**, доцент

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности  
Узбекистан, Ташкент

*Аннотация. В статье представлены результаты исследований по определению оптимальных параметров процесса жирования кожи с помощью полнофакторного эксперимента. Согласно критерию Кохрена, отклонения в исследуемом случае оказались однородными.*

*Ключевые слова: процесс жирования, полно-факторный эксперимент, температура, продолжительность, рН-среда, критерия Кохрена.*

### **MATHEMATICAL EXPERIMENTAL PLANNING AND DETERMINATION OF RATIONAL VALUES OF SKIN FAT PARAMETERS FOR TOP SHOES BASED ON ESTER**

Khilola Norbek kizi Makhammadiyeva, basic doctoral student, khilola.norbekovna@mail.ru  
Makhbuba Badriyeva Shamsiyeva, assistant professor  
Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Uzbekistan, Tashkent

*Abstract. The article presents the results of research to determine the optimal parameters of the process of fattening the skin using a full-factor experiment. According to Cochran's criterion, the deviations in the case under study turned out to be uniform.*

*Keywords: fatliquoring process, full-factor experiment, temperature, duration, pH-environment, Cochran's criterion.*

Интенсивное развитие производства материалов требует сокращения сроков технологий, что успешно решается с помощью статистических методов планирования экстремальных экспериментов. Эти методы позволяют оптимальным способом решать экспериментальные задачи параметрического характера, а также описывать исследуемые элементы в форме математической модели [1]. Одним из важных моментов является оптимальный выбор параметров, сообщающих объективное представление о материале или технологическом режиме [2].

В экспериментальных исследованиях часто важные характеристики технологических процессов состоят из случайных величин, распределение которых близко к нормальному закону. Поэтому для сокращения количества экспериментальных исследований целесообразно использовать метод математического планирования экспериментов [3].

Исходя из вышеизложенного, с целью изучения процесса жирования на основе сложного эфира при производстве кожи для верха обуви, для полнофакторного эксперимента в качестве выходящих факторов выбрали следующие параметры процесса жирования, такие как  $X_1$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $X_2$  - продолжительность, в час;  $X_3$  – рН среда.

Значения выбранных выходящих факторов приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Значения выбранных выходящих факторов*

Наименования фактора	Кодовые значения	Натуральные значения факторов			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Температура	$X_1$	60,0	62,5	65,0	2,5
Продолжительность	$X_2$	1,0	1,5	2,0	0,5
рН среда	$X_3$	6,5	7,0	7,5	0,5

Таким образом, для изучения влияния удлинения на готовую кожу было выбрано три фактора, влияющих на процесс жирования.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры «Конструирование и технология изделий из кожи», а также в СП ООО «O'zbek-Turk Test Markazi».

На основе матрицы планирования экспериментов опыты были повторены три раза для каждого условия. Количество экспериментов в этом случае составляют:

$$N = m^k = 2^3 = 8, \quad (1)$$

где  $N$  – число опытов;  $m$  – число уровней каждого фактора;  $k$  – число факторов.

Результаты и дисперсия экспериментальных исследований выходящего фактора приведены в таблице 2.

Результаты, полученные в экспериментах, были занесены в столбец 8 таблицы 2 путем вычисления среднего арифметического значения повторения. В этом случае среднее арифметическое результатов определяются следующим образом:

$$\bar{Y} = \frac{Y_{i1} + Y_{i2} + Y_{i3}}{3} \quad (2)$$

Дисперсия результатов рассчитывалась после определения среднего арифметического выходящих факторов. Значения дисперсии определялась следующей формулой:

$$S_i^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} . \quad (3)$$

где n – количество повторений опытов при одних и тех же условиях.

Таблица 2 – Значения дисперсии

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}$	S <sup>2</sup> {Y}
1	+	+		38,8	37,9	38,5	38,4	0,21
2	-	+		32,1	31,8	32,3	32,07	0,06335
3	+	-		36,9	36,4	36,1	36,47	0,16335
4	-	-		29,1	28,8	29,3	29,07	0,29335
5	+	+		37,7	37,9	37,4	37,67	0,06335
6	-	+		28,6	28,8	28,1	28,5	0,13
7	+	-		34,6	34,2	33,9	34,23	0,12335
8	-	-		24,5	23,8	24,1	24,13	0,12335
Всего							260,54	1,1701

Расчет значений дисперсии выходящего фактора:

$$S_1^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(38,8-38,4)^2 + (37,9-38,4)^2 + (38,5-38,4)^2}{2} = 0,21;$$

$$S_2^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(32,1-32,07)^2 + (31,8-32,07)^2 + (32,3-32,07)^2}{2} = 0,06335 ;$$

$$S_3^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(36,9-36,47)^2 + (36,4-36,47)^2 + (36,1-36,47)^2}{2} = 0,16335 ;$$

$$S_4^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(29,1-29,07)^2 + (28,8-29,07)^2 + (29,3-29,07)^2}{2} = 0,29335 ;$$

$$S_5^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(37,7-37,67)^2 + (37,9-37,67)^2 + (37,4-37,67)^2}{2} = 0,06335 ;$$

$$S_6^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(28,6-28,5)^2 + (28,8-28,5)^2 + (28,1-28,5)^2}{2} = 0,13 ;$$

$$S_7^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(34,6-34,23)^2 + (34,2-34,23)^2 + (33,9-34,23)^2}{2} = 0,12335 ;$$

$$S_8^2\{Y\} = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} = \frac{(24,5 - 24,13)^2 + (23,8 - 24,13)^2 + (24,1 - 24,13)^2}{2} = 0,12335.$$

Была исследована однородность значений дисперсии, рассчитанных с использованием критерия Кохрена [3]. Критерий Кохрена выражается следующим образом:

$$G_x = \frac{S_i^2\{Y\}_{\max}}{\sum_{i=1}^N S_i^2\{Y\}} = \frac{0,29335}{1,1701} = 0,2507 \quad (4)$$

где  $G_x$  – расчетное значение критерия Кохрена;  $S_i^2\{Y\}$  – максимальное значение дисперсии результатов испытаний;  $\sum_{i=1}^N S_i^2\{Y\}$  – сумма значений дисперсии.

По литературным данным [1; 23-25], вычисленное значение критерия Кохрена сравнивается со значением, выбранным из таблицы. В этом случае условие должно быть выполнено. Значение критерия Кохрена, выбранного из таблицы, составляет 0,5% на следующих уровнях:

$$G_{\text{табл.}} = \{f_1 = N = 8, f_2 = m - 1 = 3 - 1 = 2\} = 0,5157. \quad (5)$$

Следовательно, в рассматриваемом случае дисперсии однородны. Потому что,  $0,2507 < 0,5137$  это условие было выполнено.

В заключение необходимо отметить, если в рассматриваемом случае дисперсии однородны, то это указывает на то, что исследуемая величина  $Y$  подчиняется закону, которая предполагает нормальное распределение результатов эксперимента. Исследования продолжатся в этой сфере.

#### Список литературы

1. Френкс Р. Математическое моделирование в химической технологии. Перев. с англ. М.: Химия, 1971. 272 с.
2. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. СПб.: БХВ - Петербург, 2011. 384 с.
3. Спиридов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

*Материал принят к публикации 16.09.21.*

## МЕТОДИКА ЭКСТРАКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДЯЩИХ ЧЕРНИЛ

**Наталья Сергеевна Труфанова**, аспирант, trufanovan1997@gmail.com

**Сергей Александрович Артищев**, научн. рук., доцент каф. КУДР, к.т.н.

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, Россия, Томск

*Аннотация. В данной работе рассматривается методика экстракции параметров, которая позволяет проводить расчет узлов с учетом свойств материала, используемых в технологии принтерной печати. В результате проведения экстракции параметров были выявлены реальные параметры материала.*

*Ключевые слова: печатная электроника, экстракция, свч-узел, электрические параметры, микрополосковая линия.*

### TECHNIQUE FOR EXTRACTION OF ELECTRIC FREQUENCY PARAMETERS OF CONDUCTIVE INK

Natalia S. Trufanova, Postgraduate, trufanovan1997@gmail.com

Sergey A. Artishchev, Scientific advisor, Associate Professor KUDR, cand. tech. science  
TUSUR, Russia, Tomsk

*Abstract. This article discusses a method for extracting parameters that allow you to calculate the nodes taking into account the properties of the material used in the technology of printing on a printer. As a result of the extraction of the parameters, the real parameters of the material were revealed.*

*Keywords: printed electronics, extraction, microwave units, electrical parameters, microstrip line.*

Печатная электроника – электроника, создаваемая с использованием принтерных способов последовательного послойного нанесения электропроводящих, диэлектрических, резистивных слоев заданной топологии. Применение печатных способов нанесения материала позволит обеспечить более быстрый процесс изготовления компонентов и СВЧ-узлов благодаря исключению многих этапов свойственных традиционной технологии.

При печати планарных компонентов было выявлено, что электрические параметры зачастую не соответствуют расчетным [1]. Предположительно, это может быть связано как с разбавлением материала [2], так и с отклонением параметров чернил от заявленных. Это в свою очередь накладывает определенные трудности при проектировании компонентов и узлов СВЧ-техники.

Одним из решений данной проблемы является определение параметров материалов экспериментальным путем. Экстракция параметров заключается в

обнаружении параметров, влияющих на потери сигнала. Экстракция основана на расчетно-экспериментальном методе проектирования, сущность которого заключается в изготовлении макета исходя из результатов расчета и моделирования. Для проведения экстракции параметров материала была разработана методика.

Разработанная методика экстракции включает следующее:

1. Разработка моделей в САПР для учета влияния параметров материала;
  - 1.1. Расчет геометрических размеров микрополосковой линии (МПЛ);
  - 1.2. Построение схемы МПЛ на основе рассчитанных геометрических размеров;
  - 1.3. Построение частотных зависимостей модулей коэффициентов передачи и отражения;
  - 1.4. Построение топологии МПЛ на основе рассчитанных геометрических размеров;
2. Печать тестовых образцов;
3. Измерения частотных зависимостей напечатанных образцов;
4. Сравнительный анализ измеренных частотных зависимостей и результатов модели;
5. Подбор параметров модели для обеспечения совпадения с измеренными характеристиками;
6. Анализ полученных зависимостей.

Для проведения экстракции параметров был выбран САПР AWR Design Environment 14. В качестве объекта для экстракции параметров была выбрана полимерная серебросодержащая паста ПСП-2 [3]. В качестве подложки использовалась ВК-100 [4]. Первым этапом был проведен расчет ширины линии при волновом сопротивлении 50 Ом по формуле приведенной ниже.

$$\rho = \frac{377H}{W\sqrt{\varepsilon} \left[ 1 + 1,735 \cdot \varepsilon^{-0,0724} \left( \frac{W}{H} \right)^{-0,836} \right]},$$

где  $\rho$  – волновое сопротивление, Ом;

$H$  – толщина подложки, мм;

$W$  – ширина линии, мм;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость подложки.

В результате вычисления ширина линии равна 0,9 мм. Для подтверждения расчета ширины был проведен синтез геометрических размеров в программе TXLINE AWR Design Environment 14.

Следующим этапом была построена схема МПЛ для исследования частотных зависимостей. Задавались полученные геометрические размеры линии и параметры подложки: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 9,8$ , тангенс угла диэлектрический потерь  $\text{tg}\delta = 0,0004$  и толщина  $H = 1$  мм (рисунок 1).



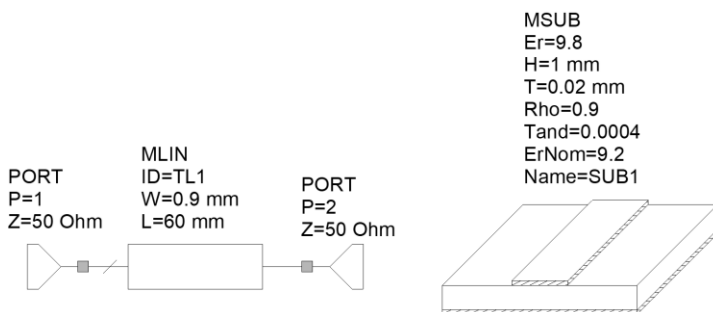


Рисунок 1 – Модель МПЛ

По результатам построения схемы была изготовлена МПЛ методом принтерной печати. Измерение частотной зависимости модуля коэффициента передачи проходило на векторном анализаторе цепей Планар Обзор-804. Полученные значения S-параметров были импортированы в AWR и построены графики сравнения характеристик модели и измерения МПЛ (рисунок 2).

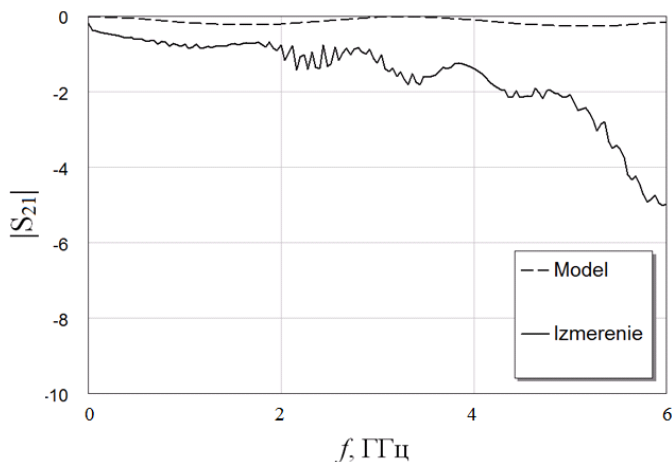


Рисунок 2 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

Определенное расхождение расчетных и измеренных значений  $|S_{21}|$  на частотах обусловлено тем, что при расчете учитывались теоретические параметры материалов, а не действительные значения, полученные при подготовке чернил. Исходя из этого, необходимо было провести экстракцию параметров так, чтобы модель соответствовала измеренным характеристикам. Для экстракции частотных параметров была построена МПЛ, которая учитывает: волновое сопротивление, относительную эффективную диэлектрическую проницаемость, потери. В результате экстракции удалось добиться схожести частотных характеристик при значениях, показанных на рисунке 3.

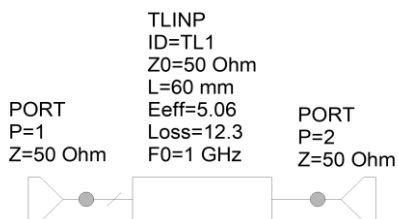


Рисунок 3 – Модель МПЛ после экстракции

Полученная частотная зависимость модуля коэффициента передачи приведена на рисунке 4.

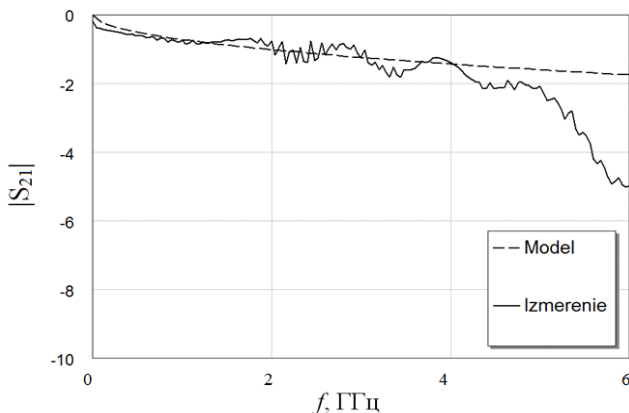


Рисунок 4 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

В результате экстракции параметров были определены реальные частотные параметры МПЛ. Полученные параметры могут применяться для проектирования иных СВЧ-узлов.

#### Список литературы

1. Труфанова, Н.С., Труфанова А.С. Исследование возможности изготовления планарных компонентов методом протерной печати. Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2021». Томск: «В-Спектр». 2021. Ч. 1. С. 162–164.
2. Труфанова А.С, Труфанова Н.С. Определение пропускной способности поршневого дозатора проводящих паст. Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2020». Томск: «В-Спектр». 2020. Ч. 1. С. 157–160.
3. ТУ 6365-007-59839838-2004 Пасты полимерные. – М: ООО «НПП ДЕЛЬТА-ПАСТЫ», 1993. – 17 с.
4. Подложки [Электронный курс]. – Режим доступа: <https://www.polikor.net/katalog/podlozhki.html> (дата обращения: 25.09.20).

Материал принят к публикации 11.10.21.

УДК 621.787

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee1df720.45382099

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ

**Наталья Рудольфовна Туркина**

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, доц. каф. Механики деформируемого твердого тела,  
к.т.н., доцент  
Россия, Санкт-Петербург, tourkinat@mail.ru

**Александр Николаевич Чукарин**

Ростовский государственный университет путей сообщения, заведующий  
кафедрой Основы проектирования машин, д.т.н., профессор  
Россия, Ростов-на-Дону, opm@rgups.ru

*Аннотация. С помощью программного пакета ANSYS рассмотрены вопросы прочности сверлильной головки и распределения температуры, произведен анализ конструкции современного инструмента для глубокого сверления отверстий, так же был проведен модальный анализ для исключения возможных резонансных явлений.*

*Ключевые слова: глубокое сверление, режущий инструмент, конечно-элементный анализ, ANSYS.*

### FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TOOLS FOR DEEP DRILLING TECHNOLOGY

N.R. Turkina, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Associate Professor of the Department of Mechanics of Deformable Solids, Ph.D.  
Russia, St. Petersburg, tourkinat@mail.ru

A.N. Chukarin, Rostov State Transport University, Head of the Department of Fundamentals of Machine Design, Doctor of Technical Sciences, Professor Russia, Rostov-on-Don, opm@rgups.ru

*Abstract. Using the ANSYS software package, the issues of strength of the drill head and temperature distribution were considered, the design of a modern tool for deep hole drilling was analyzed, and modal analysis was carried out to exclude possible resonance phenomena.*

*Keywords: deep drilling, cutting tools, finite element analysis, ANSYS.*

В данной работе было рассмотрено моделирование свойств режущего инструмента марки CORODRILL 800 для обработки отверстий диаметром 65 мм, изготовленного шведской фирмой Sandvik Coromant. Этот инструмент имеет сборную конструкцию, и состоит из сверлильной головки, которая имеет прямоугольную резьбу и центрирующие пояски для укрепления наружной и внутренней трубы. Сверлильная головка состоит из двух частей, корпуса и хвостовика объединенных в одну литую деталь. Инструмент трехлезвийный, двустороннего резания, работающий с делением ширины среза и определенностью базирования с двумя жесткими неподвижными направляющими. Три твёрдосплавные режущие пластины закрепляются механически, с помощью винтов. Корпус изготовлен точным литьем из стали марки 40ХФЛ с последующей механической обработкой и термообработкой

© Туркина Н.Р., Чукарин А.Н., 2021

САПР и моделирование в современной электронике. С. 58 – 63.

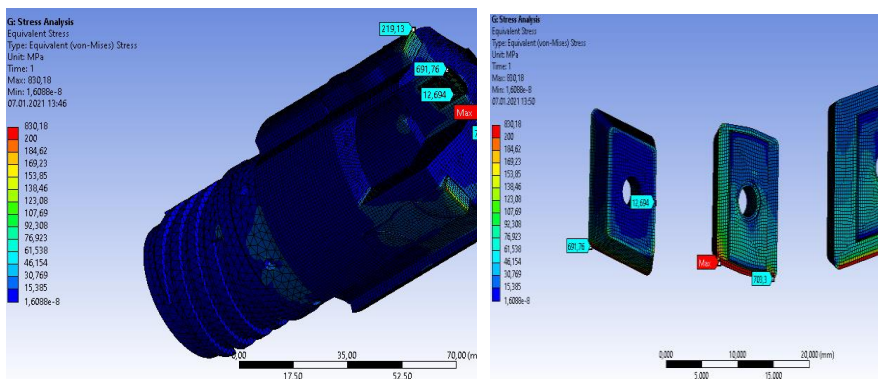
до 27-35 НРС. Предел прочности материала - 650 МПа. Режущие пластины изготовлены из зарубежного аналога твердого сплава марки T15K6. Пластины сменные, после износа не перетачиваются, геометрию в зависимости от материала и режимов резания меняют подбором и сменой пластин. Предел прочности материала составляет 1176 МПа.

Для анализа инструмента необходимо было сначала определить силы, действующие на него. При разработке технологического процесса для определения режимов резания и необходимой мощности станка были рассчитаны усилия подачи и крутящий момент резания, позволяющие быстро определить необходимые параметры, которые гарантируют стабильность резания и не вызовут поломки инструмента и оборудования [1].

Первым шагом в компьютерном анализе является построение 3D-модели исследуемого объекта. Исходя из довольно сложной геометрии исследуемой модели, наиболее предпочтительным для анализа программным комплексом является ANSYS - продукт фирмы «ANSYS Inc» [2]. В данном случае для анализа прочности возможно применить модуль STATIC STRUCTURAL. Для этого в программе ANSYS WORKBENCH необходимо создать новый проект и импортировать геометрию в рабочую среду. В разделе Engineering data были внесены параметры, такие как плотность, модуль Юнга, предел прочности и т.д. для сплава T15K6, из которого изготовлены режущие пластины и направляющие, и стали 40ХФЛ - материал корпуса [3].

В разделе CONNECTIONS телам необходимо было задать способ крепления тел. В данном случае пластинам был задан способ крепления BONDED, при котором детали неподвижно скреплены друг с другом. Так же в данном модуле имеет смысл разделить корпус на две части, применив команду CONTACT REGION. Этот шаг в дальнейшем, при построении сетки конечных элементов, позволит задавать различные размеры фрагментов, что позволит без уменьшения точности сократить время расчета. Далее в разделе MESH 3D модель была разбита на конечные элементы. Программа ANSYS позволяет настроить различные параметры сетки, такие как размер, форма и метод формирования элемента. В местах наиболее подверженных деформациям сетка сделана как можно мельче, в данном расчете минимальный размер конечного элемента был задан для пластин и составил 0,3 мм, тогда как для хвостовой части, где высоких нагрузок не ожидается, достаточно 3 мм.

После построения сетки необходимо задать силы резания, действующие на инструмент и поддержки, ограничивающие перемещения. В этой работе целесообразно задать поддержку CYLINDRICAL SUPPORT для поверхности резьбы хвостовика. Эта операция позволит ограничить перемещение во всех направлениях. Далее командой SOLVE запускается расчет и через некоторое время во вкладке RESULTS можно было увидеть результаты расчетов (рисунок 1 а, б):



а)

б)

Рисунок 1 – Результаты расчета инструмента в программе ANSYS: а - диаграмма напряжений, б - диаграмма деформаций режущих пластин

Из данных диаграмм видно, что самыми нагруженными элементами инструмента являются режущие пластины. Из приведенной диаграммы видно, что самая нагруженная пластина – центральная. Максимальные напряжения возникают на ее кромке составляет 830 МПа. Напряжения в периферийной и промежуточной пластине несколько меньше, и составляют примерно 632 МПа и 691 МПа соответственно. Предел прочности материала Т15К6, из которого изготовлены режущие элементы, составляет 1176 МПа. Можно сделать вывод, что твёрдосплавные пластины имеют 30% запас прочности и не разрушатся в процессе резания. Корпус выполнен из стали марки 40ХФЛ, предел прочности данного материала составляет 650МПа. Из полученных данных можно сделать вывод, что обеспечен шестикратный запас прочности.

Программный пакет ANSYS позволяет проводить анализ по различным параметрам прочности. На рисунке 2 приведен расчет деформаций, возникающих при работе инструмента, из которого видно, что максимальные деформации возникают в периферийной режущей пластине и составляют 0,025 мм. Максимальные деформации центральной и средней пластине составляют 0,016 мм и 0,008 мм соответственно. Как видно из приведенного расчета, перемещения незначительны и не могут значительно повлиять на точность обработки.

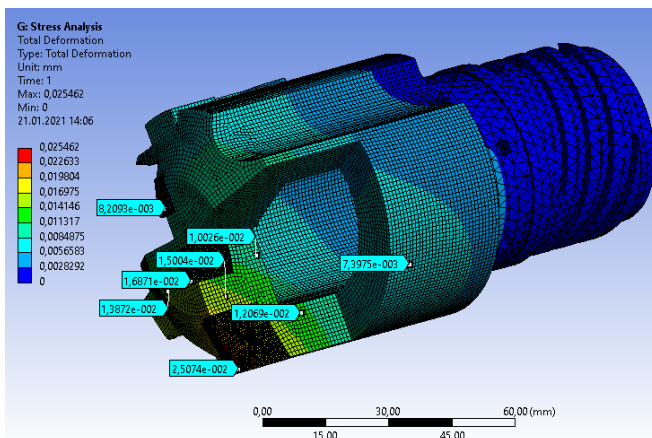


Рисунок 2 – Диаграмма деформаций

Далее в работе был использован модуль Explicit Dynamics с целью моделирования процесса резания. Данный модуль требует значительных аппаратных ресурсов и некоторых упрощений. Исходя из результатов работы в STATIC STRUCTURAL, можно сделать вывод, что значительные напряжения испытывают только режущие пластины, поэтому направляющие и корпус инструмента в расчете участвовать не будут.

Для расчета во вкладке GEOMETRY были импортированы 3D модели пластин, а также построена модель заготовки. В данном случае это пластина 80x80x20 из стали марки 20X. Далее геометрия была разбита на конечные элементы. Сетка конечных элементов в модуле EXPLICIT DYNAMICS и расчет, из которого можно определить распределение температуры, приведен на рисунке 3.

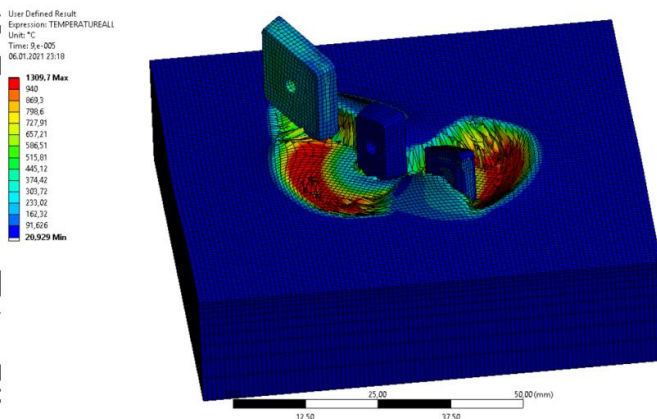
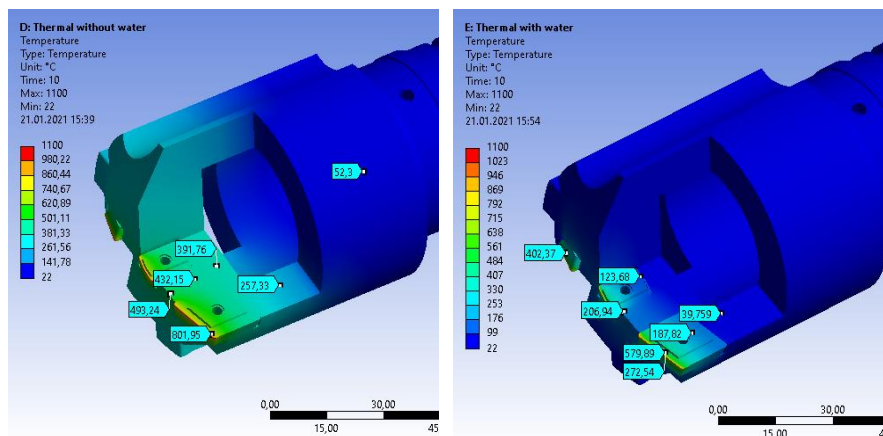


Рисунок 3 – Распределение температуры при сверлении металла

Из диаграммы видно, что основная часть температурной нагрузки остается в заготовке или уходит со стружкой. Самым горячим участком инструмента является режущая кромка, температура которой составляет примерно 1100 °С.

Далее для анализа температуры инструмента был использован модуль STEADY-STATE THERMAL, который позволяет произвести анализ установившегося нестационарного теплового поля на основе решения уравнения стационарной теплопроводности. Начальные температурные параметры взяты из диаграммы на рисунке 3. Результаты полученных расчетов представлены на рисунке 4.



а)

б)

Рисунок 4 – диаграмма распределения температуры: А - без применения охлаждающей жидкости, Б - при работе с охлаждением

Из данных диаграмм можно сделать вывод, что температура на режущей кромке составляет 1100 °С, но нерабочая режущая кромка твердосплавной пластины греется значительно меньше, ее температура составляет 123 °С. Температура корпуса будет максимальной в гнездах под твердосплавные пластины и составляет 493 °С, что приемлемо для режущего инструмента. Резьбовая часть инструмента не подвержена нагреву. Отметим, что инструмент данного типа не может работать без применения охлаждающей жидкости. При ее подаче температура инструмента значительно падает. При сверлении с подачей охлаждающей жидкости максимальна температура корпуса составляет 206 °С. Остальные поверхности корпуса не нагреются свыше 40 °С.

Далее в работе был произведен модальный анализ, где были рассчитаны собственные частоты инструмента. В таблице 1 показаны соответствия форм колебаний их частоте.

Таблица 1 – Формы и частоты собственных колебаний

Форма колебаний	1	2	3	4	5	6
Частота	2351,5 Гц	2424,7 Гц	5588,9 Гц	7830,4 Гц	8241,3 Гц	9045,7 Гц

Из полученных данных можно сделать вывод, что в системе режущий инструмент – заготовка резонансных явлений не возникнет. Первая форма собственных частот сверлильной головки составляет 2351 Гц, что на порядки выше частоты вращения заготовки 6 Гц (360 об/мин). Первая мода собственных частот заготовки 74 Гц, что тоже значительно меньше собственных частот инструмента.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Программное обеспечение ANSYS возможно использовать для разработки инструмента для глубокого сверления, а также анализа работы инструмента при различных режимах резани. Оно позволяет отказаться от сложной измерительной аппаратуры и не задействует производственное время станка при исследовании процессов резания.

2. Самая нагруженная режущая пластина – центральная. Напряжения на ее режущей кромке составляет 830 МПа. Напряжения в периферийной и промежуточной пластине несколько меньше, и составляют 632 МПа и 691 МПа соответственно, что значительно меньше предела прочности твердого сплава Т15К6, который составляет 1176 МПа. Разница в напряжениях между пластинами не значительная. Данный факт указывает на то, что стойкость примерно одинаковая. При появлении признаков износа хотя бы на одной из режущих кромок, необходимо менять сразу весь комплект режущих пластин.

3. Температура, возникающая в процессе резания довольно высокая, на режущих кромках составляет 1100°C, но большая ее часть уходит вместе со стружкой. На инструмент фактор повышенной температуры влияет незначительно, так как при работе с охлаждающей жидкостью корпус не нагреется выше 206 °С, а хвостовик не подвержен нагреву.

4. Анализ собственных частот показал, что резонансных явлений в исследуемой конструкции не возникает.

#### Список литературы

1. Детали машин: учебник для вузов / Н. А. Бильдюк и др.; ред. В. Н. Ражиков. - СПб.: Политехника, 2015. - 699 с.
2. ANSYS HELP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ansyshelp.ansys.com/> (Дата обращения: 06.01.2021).
3. Туркина Н.Р., Шершнева О.И. Прочностной расчет конструкций на основе программного комплекса «Справочник конструкционных материалов» // Дизайн. Материалы. Технология. 2019. № 4 (56). С. 46 - 49.

*Материал принят к публикации 08.10.21.*



УДК 69.003.13

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee25a6b0.56816093

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ

**Владимир Александрович Турко**

ГНУ «Центр системного анализа и стратегических исследований

НАН Беларуси», научный сотрудник, соискатель

Республика Беларусь, Минск, orthodox.com.by@yandex.by

*Аннотация. Описан программный комплекс системно-динамической оптимизации экономической эффективности проектов: программное обеспечение (ПО) для подсчета интенсивности и определения состава трафика по видеоизображению; финансово-экономическая модель по комплексному анализу объектов придорожного сервиса, которая, на основе ввода исходных данных осуществляет прогнозирование результатов финансово-хозяйственной деятельности объекта и позволяет провести оценку целесообразности инвестиций в строительство/реконструкцию/модернизацию, а также позволяет оценить максимально возможный объем инвестиций; техническое решение по сбору видеоаналитики.*

*Ключевые слова: цифровая трансформация, комплекс системно-динамической оптимизации, видеоаналитика.*

### AUTOMATED COMPLEX OF ECONOMIC EFFICIENCY OF PROJECTS

Vladimir A. Turko

State scientific institution « Center for System Analysis and Strategic Research of the National Academy of Sciences of Belarus», scientific officer, applicant

Republic of Belarus, Minsk, orthodox.com.by@yandex.by

*Abstract. This is how the software package for system-dynamic optimization of the economic efficiency of projects is described: software for calculating the intensity and determining the composition of traffic from a video image; a financial and economic model for a comprehensive analysis of roadside service facilities, which, based on the input of initial data, predicts the results of the financial and economic activity of the object and allows evaluating the feasibility of investments in construction/reconstruction/modernization, and also allows evaluating the maximum possible amount of investment; a technical solution for collecting video analytics.*

*Keywords: digital transformation, complex of system-dynamic optimization, video analytics.*

Снижение цен на видеорекамеры с высоким разрешением, постоянное расширение возможностей для бизнеса, потребность в автоматизированном контроле за процессами, появление новых кейсов в связи с эпидемией коронавируса – все это ведет к стремительному росту сегмента видеоаналитики во всем мире. Поэтому системы видеоаналитики сегодня наиболее востребованы в сферах: развитие придорожного сервиса (анализ трафика для оценки экономической целесообразности размещения новых

объектов: гостиниц, АЗС, автомоек, парковочных мест, объектов общепита и др.; оценки соотношения количества посетителей к общему потоку (конверсия)); дорожного строительства (улучшение пропускной способности дорог, определение состава транспортного потока, подсчет интенсивности трафика на заданном участке дороги; прогнозирования развития транспортных моделей, управление дорожным движением на основе данных, анализ текущей ситуации на дорожном объекте, составление плана дорожно-строительных работ, прогнозирование качества дорожного полотна и др.); логистики (оптимизация логистических процессов: уменьшение себестоимости, увеличение объемов и скорости транспортировки, снижение объемов расхода топлива, определение рациональных маршрутов поставки и т. д.); маркетинга наружной рекламы (сбор данных для расчета стоимости рекламного места вдоль дорог, анализ эффективности рекламных кампаний) и др. Все вышеперечисленное является аналитическим материалом для принятия решения по оценке экономической эффективности. В рамках расчета эффективности инвестиций определяется бюджет проекта на предынвестиционную и инвестиционную стадии проекта. Оценка эффективности инвестиций определяется на полный жизненный цикл проекта, включающий предынвестиционную, инвестиционную, эксплуатационную и ликвидационную стадии.

В ближайшее время эксперты ожидают существенный рост мирового рынка видеоаналитики [1]. В период 2021–2025 гг. все аналитические системы будут массово внедрены в сектор розничной торговли (больше на 50 % по сравнению с 2020 г.), в транспортную сферу (на +40 % больше), в медицину и здравоохранение (на 30 % больше). Кроме того, на 20 % увеличится использование систем видеоаналитики в производстве. Уже давно видеонаблюдение превратилось из простого охранника в инновационное решение, включающее в себя функции обеспечения защиты объектов и решения бизнес-задач. Поэтому перспективными задачами видеоаналитики выступают: глубокая интеграция с другим программным обеспечением; разнообразие дополнительных возможностей на базе нейросетей и машинного обучения; получение детальных отчетов в режиме самообслуживания (без участия оператора). Роботизация и автоматизация процесса управления данными, в том числе и потоковой аналитики.

По оценке исследовательского агентства, Gartner, рынок видеонаблюдения и видеоаналитики будет меняться следующим образом:

- в 2021 г. произойдет массовое внедрение видеоаналитики в торговлю, медицину, транспортную сферу и на производственные предприятия;

- в 2022 г. технологии искусственного разума будут широко применяться, но лишь 10 % специалистов-аналитиков смогут использовать весь ее потенциал. Это говорит о том, что технологии уйдут далеко вперед, но на трудовом рынке будет недостаток кадров-аналитиков;

- к 2023 г. из Топ-500 крупнейших мировых компаний 90 % значительно расширят свои программы по работе с видеоданными;

– к 2025 г. порядка 80 % товаров, содержащих в себе электронные компоненты, будут иметь встроенные средства аналитики (возможно и видеоаналитики).

Потребители проявляют интерес к тем видеоаналитическим сервисам, которые помогают снижать затраты бизнеса и добиваться конкурентного превосходства. Поэтому именно в такие сервисы и будут вкладываться производители средств аналитики.

Сегменты рынка, на котором предполагается выполнение проекта:

– дорожно-строительные организации. Для строительства, улучшения и реконструкции дорожных сетей необходимо обладать статистическими данными о трафике, которые помогут проанализировать ситуацию на заданном участке дороги за любой период. Информация о загруженности дорожной полосы и статистике по категориям транспортных средств помогает прогнозировать качество дорожного полотна, составлять планы дорожно-строительных работ;

– придорожный сервис. Программный комплекс анализирует трафик на участке автодороги для оценки целесообразности размещения новых объектов придорожного сервиса;

– логистические компании. Данные о составе транспортных потоков и загруженности дорог могут помочь снижению себестоимости перевозок, оптимизации транспортных маршрутов и повышению экономической эффективности автопарка;

– рекламные агентства. При оценке эффективности показа рекламы и расчете стоимости рекламного места вдоль дорог необходимо знать интенсивность трафика на заданном участке дорожной сети;

– выполнение международных соглашений по достижению Целей устойчивого развития: «Цель 9.1.2. Объем пассажирских и грузовых перевозок в разбивке по видам транспорта».

Программный комплекс включает: программное обеспечение (ПО) для подсчета интенсивности и определения состава трафика по видеоизображению; финансово-экономическую модель по комплексному анализу объектов придорожного сервиса, которая на основе ввода исходных данных осуществляет прогнозирование результатов финансово-хозяйственной деятельности объекта и позволяет оценить целесообразность инвестиций в строительство, реконструкцию, модернизацию, а также максимально возможный объем инвестиций; техническое решение по сбору видеоаналитики.

Предлагаемое автором ПО является эффективным инструментом для автоматического сбора данных об интенсивности и составе транспортного потока, не использует для подсчета физические датчики и не требует пусконаладки системы специалистами. ПО работает с широким спектром видеокамер и при сложных погодных условиях. Точность оценки достигает 99 %. Автоматический анализ осуществляется по всем направлениям и полосам движения в кадре. Транспорт классифицируется в соответствии с ГОСТ

32965-2014. ПО определяет среднюю скорость потока и сигнализирует о заторах на дороге. Обеспечивается высокая производительность при достаточно низких системных требованиях. Предлагаемое ПО построено на базе искусственного интеллекта (нейросети глубокого обучения) и предназначено для автоматического анализа автомобильного трафика по видеоизображению. Получение видеопотока возможно как с установленных в городе дорожных камер, так и с переносной камеры на штативе. Специальное конфигурирование под каждую камеру не требуется. Возможен также подсчет по записанному ранее видеофайлу.

*Финансово-экономическая модель (ФЭМ)* по комплексному анализу объектов придорожного сервиса представляет собой оптимизационную задачу для нахождения экстремума функции (показатели эффективности инвестиций). На основе ввода исходных данных она осуществляет прогнозирование результатов финансово-хозяйственной деятельности объекта и позволяет провести оценку целесообразности инвестиций в строительство, реконструкцию, модернизацию, а также оценку максимально возможного объема инвестиций. Разработанная ФЭМ наделена *режимом самообучения* для определения диапазона нормальности интенсивности движения в определенной локации (рисунок 1). Режим самообучения построен на следующих принципах: по мере насыщения статистикой по данному показателю у модели есть возможность определить диапазон нормальности для каждой локации. Так, для нахождения минимального  $a_i^{min}$  и максимального  $a_i^{max}$  значений алгоритм автоматизировано определяет диапазон нормальности интенсивности движения трафика.

После определения диапазона нормальности модель соотносит полученное значение со средним значением для вводимых новых данных по объекту. Если вводимое значение объекта-оценки превышает усредненный показатель для данной локации, ему присуждается поправочный коэффициент, равный 1 %, если нет, то 0 %. По аналогии с определением поправочного коэффициента для интенсивности движения по типам автотранспортных средств также определяется экономическая эффективность и для других показателей. Финансово-экономическая модель построена на модульной основе, т. е. внесение дополнительных параметров и показателей не приведет к переписыванию всего программного кода ФЭМ.

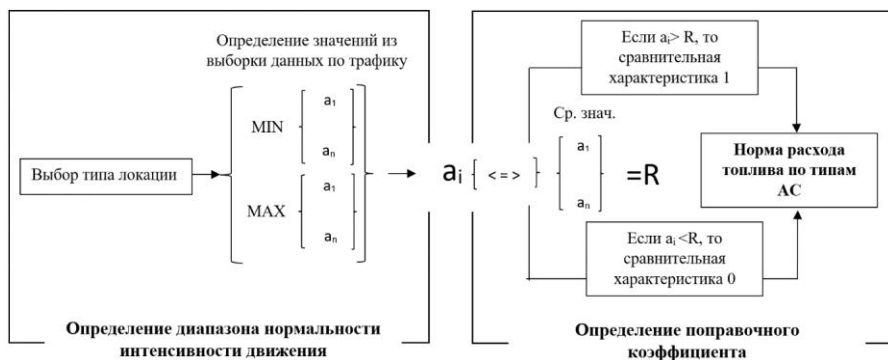


Рисунок 1 – Схема режима самообучения для определения диапазона нормальности интенсивности движения

*Техническое решение по сбору видеоаналитики:* получение видеопотока возможно как с установленных в городе дорожных камер, так и с мобильного офиса в режиме реального времени.

Полученные в результате анализа данные могут быть использованы для улучшения пропускной способности автомобильных дорог, определения состава и интенсивности потока, выстраивания оптимальных транспортных маршрутов, построения и прогнозирования моделей транспортных потоков, финансирования инвестиционных проектов национального значения, способствующих повышению экономического потенциала страны и содействующих экономическому росту. Могут быть использованы для построения «зеленых» коридоров на всей дорожной сети республики, внедрения инновационных решений в отраслях экономики и технологий «умных городов», а также обеспечения информационной безопасности таких решений.

### Список литературы

1. Разнообразие видеоаналитики — главный тренд 2021 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://faceter.cam/ru/blog/raznoobrazie-videoanalitiki-glavnyj-trend-2021-goda/>. – Дата доступа: 17.09.2021.

Материал принят к публикации 21.09.21.

UDC 004.932.72

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee310750.12735248

## **PROBLEMS OF BIOMETRIC IDENTIFICATION IN ACCESS SYSTEMS**

**Umidjon Yu. Akhundjanov**, PhD student, axundjanov@mail.ru

**Valery V. Starovoitov**, Chief Researcher, Dr. Sci., Professor

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarus, Minsk

*Abstract. Handwritten signature recognition is a biometric method that can be used in many aspects of life when it is necessary to use personal signatures, for example, when cashing a check, signing a credit card, authenticating a document, etc. Innovative approaches to solving static signatures that have been introduced into the literature increase every year.*

*Keywords: recognition, biometrics, handwritten signature.*

### **INTRODUCTION**

Biometric authentication systems are among the most reliable and effective methods of verifying the user's identity. Biometric data includes, for example, fingerprints, photos of the retina and iris, a picture of the geometry of the face, samples of voice and handwriting, three-dimensional photography, etc. [1].

In general, biometric identification systems are divided according to the principle of operation into two main types: static and dynamic.

#### **1) Static (physiological characteristics)**

- *Fingerprints*
- *The iris of the eye*
- *Retina of the eye*
- *Vein pattern*
- *Face*
- *Hand geometry*
- *Heart rate*
- *DNA*

#### **2) Dynamic (behavioral characteristics)**

*Handwriting and signature dynamics*

- *Heart rate*
- *Voice and speech rhythm*
- *Gesture recognition*
- *Speed and features of working on the computer keyboard*
- *Gait*

The problem of verifying a handwritten signature is related to image recognition problems. The main difficulties with signature recognition are related to the fact that a legitimate user can sign in different ways, depending on their emotional and mental

state, or even have several variants of their signature. An attacker can also attempt to forge a signature [2].

Handwriting examinations can effectively detect forgery, but these types of examinations are expensive and cannot be carried out in real time within the framework of authentication systems.

Static (off-line), offline handwriting recognition is performed after a sample text has been created and recorded in digital form. The optically captured image data is then converted into a bitmap. Offline signature processing has about 40 functions, including the analysis of the center of gravity, edges, and curves for authentication. In the off-line method, stable dynamic characteristics are absent due to the uniqueness of the signature difference due to age, illness, geographical location and, perhaps, to some extent, the emotional state of the person, exacerbates the problem. Thus, the offline signature recognition method is complex.

### DATA COLLECTION

Data collection can be performed in two ways: first of all, signature databases are available from open sources (via the Internet). If necessary, images are obtained by scanning signatures.



Figure 1 – Example of raw images of signatures.

### IMAGE PREPROCESSING

When preprocessing an image, various operations are performed on the caption image, such as converting a color image to gray, removing noise, determining a threshold value, thinning, detecting borders, and cropping. When binarized, the color image is converted to a black-and-white image, meaning the caption pixel will be "1" and the background pixel will be "0".

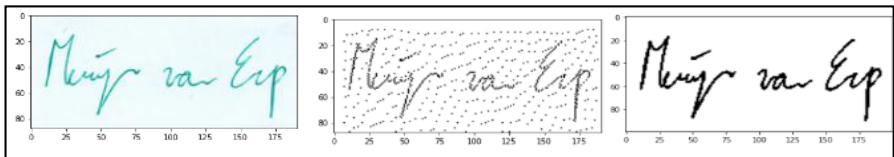


Figure 2 – Pre-processing examples

## FEATURE EXTRACTION

At the feature extraction stage, we extract some features of the signature image. Different algorithms are used to extract features. The extracted signature image features at this stage are inputs to the learning and recognition stages. Features can be classified as global, grid, and masking.

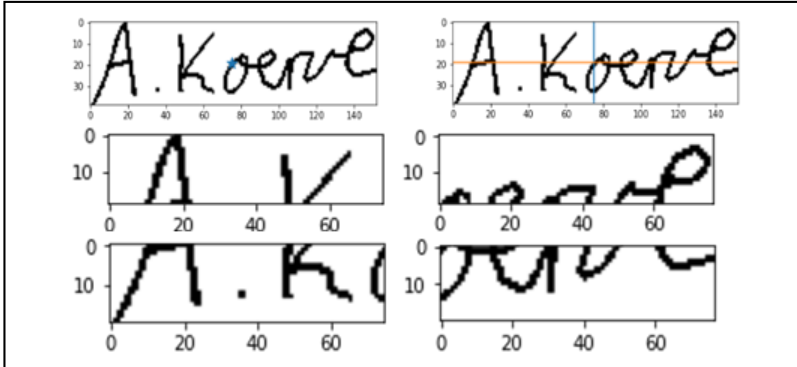


Figure 3 – Feature extraction examples

## CLASSIFICATION

When a new signature is used, its characteristics are extracted and compared to those already stored in the database. If the characteristics match, it is classified as genuine, otherwise-as a fake.

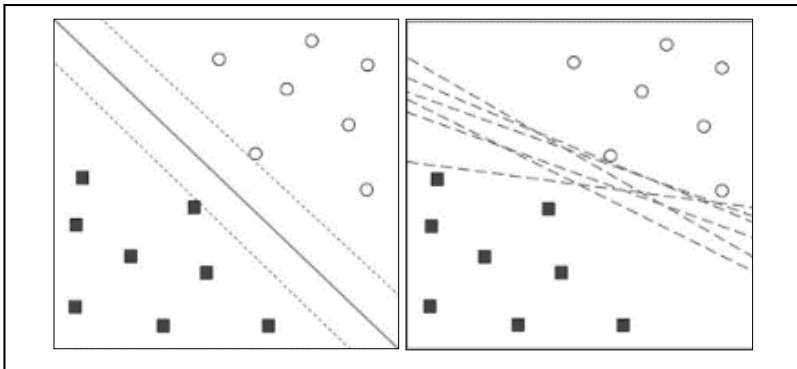


Figure 4 – SVM (support vector machine) classification

Consider them:

1) Arbitrary forgery: A signature written by a person who does not know the form of the original signature is an arbitrary forgery.



2) Accidental forgery: A signature written by a person who does not know the form of the original signature is an accidental counterfeit.

3) Qualified counterfeit: The third type, called qualified counterfeit, is represented by a suitable copy of the genuine signature model.

4) Imitation of a forgery: the forger has access to a sample of the genuine signature with which he practices making copies.

5) Cut and paste forgery: An authentic signature is cut from one document and placed on a forged document and then copied. If the lighting and resolution are set correctly, the document will look authentic.

### CONCLUSION

It should be noted that a lot of work has already been done in the field of signature verification, but there are still many problems in this area. There are basically two problems with the signature verification method. The non-repetitive nature of variations in the caption image due to illness, age, and geographical location. To some extent, due to the emotional state of the person, there is a variation of the signature. Another problem is related to security considerations. It is very difficult to make the signature database of the original documents available for signature verification. More research is needed in the field of offline signature verification and online signature verification, although the accuracy obtained with the available systems is not very good.

The described aspects are still the objects of research on the base, and, therefore, the practical application of identification by handwritten signature in automated systems is still problematic.

### REFERENCES

1. Behrouz Vaseghi, Somayeh Hashemi."Off line signatures Recognition System using Discrete Cosine Transform and VQ/HMM," Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ISSN 1991-8178,6(12): 423-428, 2012

2. Ахунджанов У. Ю. Статическая преобразование подписи с применением классификаторов SVM / KNN // Современные проблемы и их решения информационно-коммуникационных технологий и телекоммуникаций: Сборник докладов республиканской научно-технической онлайн конференции. Фергана: 2020. – С.12 – 14.

*Материал принят к публикации 23.09.21.*

## ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Борис Иванович Павленко**

Брянский государственный технический университет, студент  
Россия, Брянск, bor-pavlenko@yandex.ru

*Аннотация. Статья посвящена обзору наиболее актуальных технологий изготовления прототипов печатных плат. Рассматриваются достоинства и недостатки различных технологий, описывается необходимое оснащение для их реализации.*

*Ключевые слова: печатные платы, прототипы, технологии изготовления.*

### RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS

Boris I. Pavlenko

Bryansk State Technical University, student, Russia, Bryansk, bor-pavlenko@yandex.ru

*Abstract. The article is devoted to description of actual rapid prototyping technologies for printed circuit boards. The advantages and weaknesses of various technologies are considered, the necessary equipment for their implementation is described.*

*Keywords: printed circuit boards, prototyping technologies, fast prototyping.*

Современная культура производства предоставляет разработчикам новые возможности и ставит перед ним новые задачи, решать которые без применения систем автоматизированного проектирования (САПР) становится сложно, неразумно, а зачастую и невозможно. Тем не менее, САПР является лишь одним из этапов реализации, по завершении которого необходимо приступить к изготовлению прототипа. Только реальный прототип может дать наиболее полное представление о возможных проблемах и ошибках, допущенных при проектировании [1].

Ассортимент технологий изготовления прототипов печатных плат на сегодняшний день очень широк: начиная от наиболее доступной ЛУТ, заканчивая технологиями, включающими в себя лазерные станки [2]. Архаичные технологии вроде нанесения защитной маски лаком от руки достойны упоминания, но не более.

*Лазерно-утюжная технология* является примером наиболее бюджетного способа изготовления прототипов печатных плат. Доступность оборудования и невысокая стоимость необходимых расходных материалов привели к тому, что эта технология стала наиболее распространённой в сфере любительской разработки электронных устройств. Тем не менее, как и другие методы изготовления прототипов здесь так же важно понимание процессов и тщательное соблюдение алгоритмов. Только в этом случае можно рассчитывать на приемлемое качество конечного образца.

К очевидным плюсам, несомненно, относится низкая стоимость начала применения и высокая скорость реализации, а также широкие возможности по выбору реагентов.

К минусам стоит отнести следующие моменты.

Требуются навыки. Результат напрямую зависит от накопленного опыта изготовителя.

Минимальной шириной дорожек декларируются 0.5 мм, однако на практике стабильно добиться такой точности можно только при использовании качественных, выверенных материалов и технологии производства.

В силу особенности технологии изготовление двусторонних печатных плат становится нетривиальной задачей. Так как в этом случае требуется совмещать рисунки масок обеих сторон вручную, а зачастую и практически вслепую. Совмещение сквозных отверстий в плате становятся серьёзным вызовом.

Металлизация переходных отверстий зачастую осуществляется с помощью проволоки малого сечения.

Затруднительно изготавливать платы со стороной свыше 15 см без использования особых нагревательных инструментов.

Невозможность мелкосерийного выпуска. Каждая изготавливаемая плата делается в единственном экземпляре, и для изготовления нового необходимо повторить весь цикл производства, начиная с печати.

*Нанесение фоторезистивного слоя и применение фотошаблонов* требует прежде всего изготовление самих фотошаблонов. Наиболее дешёвым вариантом в этом случае является печать фотошаблонов бытовыми принтерами на прозрачной плёнке. Применяются как струйные, так и лазерные. Струйные принтеры при этом обладают рядом преимуществ.

Во-первых, плотность рисунка. Светопроницаемость шаблона из плёнки – одна из главных проблем этой технологии. И рисунок, напечатанный струйным принтером, в среднем, выходит гораздо плотнее, чем на лазерном. Разумеется, различными методами можно бороться (например, наложением нескольких одинаковых фотошаблонов друг на друга) за плотность рисунка. Но все они заметно усложняют процесс. Два подряд распечатанных листа совершенно необязательно будут абсолютно идентичны.

Во-вторых, искажение рисунка. Печать на лазерном принтере подразумевает нагрев до высоких температур. В результате материал испытывает температурные деформации, а как следствие рисунок получается искажённым. Некоторые программные продукты позволяют вносить перед печатью корректировки. Но определять их приходится опытным путём, а изменение материала или температурных условий приводит к заранее непредсказуемому результату.

Экспонирование проводится как естественным солнечным светом, так и с помощью специального оборудования. На этом этапе важное значение имеет

боковой засвет, что особенно актуально для тонких дорожек и малых просветов.

В целом, плюсы можно выделить следующие:

- невысокая стоимость и широкий выбор оборудования и расходных материалов;
- возможность изготовления двусторонних плат;
- возможность повторного использования единой изготовленного фотошаблона.

Из минусов стоит отметить:

- возможные искажения рисунка при изготовлении фотошаблона;
- необходимость вручную совмещать фотошаблон и реперные точки на плате;
- минимальная ширина дорожек на плате около 0.3 мм ограничивается возможностями принтера (600-1200 dpi);
- хранение компонентов.

*Прямое нанесение защитной маски* позволяет сразу после печати перейти к этапу травления. Сюда можно отнести как разного рода плоттеры, наносящие рисунок определённым инструментом, так и специальные полимерные принтеры [3]. Отдельным подтипом можно включить принтеры, печатающие топологию токопроводящим полимером с включением серебра. В любом случае, это особое оборудование, работающее с плоским материалом.

Преимуществом технологии является малое количество промежуточных этапов перед травлением, а также наглядность процесса. Минусам стоит отнести необходимость приобретения специального оборудования или серьёзной реконструкции офисного, а также невысокое разрешение печати – как следствие, минимальная ширина дорожек около 1 мм. Помимо этого, не стоит списывать со счетов расходы на полимер и растворитель для последующего его удаления.

*Лазерное создание топологии* включает в себя экспозицию лазером фоторезистивного слоя, или прямое удаление меди с фольгированного стеклотекстолита. Эта технология подразумевает высокую точность, сложность и, как следствие, стоимость оборудования [4]. При подготовке оборудования требуется учитывать большое количество факторов, одной только фокусировкой лазерного луча настройки не ограничиваются. Сложность настройки и повышенные требования к персоналу, его эксплуатирующему, можно отнести к недостаткам метода. Однако, наладив станок, можно повторно получать практически неограниченное количество копий с высокой повторяемостью и возможностью плотного размещения компонентов.

Подводя итоги, можно сказать, что изготовление качественных и высокотехнологичных прототипов требует хорошо оснащённой лаборатории и высоко квалифицированный персонал, способный воплощать инженерные задумки в реальные решения.

Мы предлагаем следующую последовательность технологических операций с использованием следующего оборудования:

- 1) сверление отверстий на станке с ЧПУ;
- 2) щеточная очистка плат с помощью специальной установки;
- 3) металлизация отверстий методом гальванического осаждения меди;
- 4) создание топологии с помощью лазерного станка или нанесения маски фоторезистом.

Указанная методика позволяет в лабораторных условиях университета обеспечивать следующие проектные нормы:

односторонние печатные платы толщиной 1,5 и 2 мм;

однослойные двусторонние платы толщиной 1,5 мм;

металлизация отверстий;

минимальный зазор проводников — 0,3 мм;

минимальная ширина проводника — 0,3 мм.

### Список литературы

1. *Горячев Н.В., Юрков Н.К.* – Опыт применения систем сквозного проектирования при подготовке выпускной квалификационной работы // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 534-540.

2. *Сивагина Ю.А., Кочегаров И.И., Юрков Н.К.* Прототипирование печатных плат в лаборатории вуза // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 90-90; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33721> (дата обращения: 17.10.2021).

3. *Боброва, Ю.* Обзор технологических возможностей трехмерной печати в производстве печатных плат / Ю. Боброва, О. Смирнова, Д. Мануков // Технологии в электронной промышленности. – 2019. – № 7(115). – С. 38-45.

4. *Семенов, П.* Технологические прорывы в производстве и макетировании печатных плат на Productronica-2017 / П. Семенов, В. Городов, М. Шальнева // Технологии в электронной промышленности. – 2018. – № 2(102). – С. 32-39.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

**СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

**SECTION «INFORMATIONAL MEASURING SYSTEMS»**

УДК 681.518.9; 621.384.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee40fe27.23365640

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЙ ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ  
КАЛИБРОВКИ ЭТАЛОННЫХ МЕР НАНОМЕТРИИ**

**Сергей Сергеевич Анцыферов**, профессор, д.т.н.

**Ксения Наильевна Фазилова**, ассистент, fazilova@mirea.ru

МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва

*Аннотация. Контроль функционирования системы управления процессами калибровки эталонных мер нанометрии осуществляется на основании ранее разработанной методологии, включающей в себя построение фазового пространства функционирования системы, построение допустимых границ области функционирования, определение текущего состояния системы.*

*Ключевые слова: контроль функционирования системы, аппроксимация, когнитивная модель, технологический процесс.*

**COGNITIVE SYSTEMS FUNCTIONING DYNAMICS MODEL**

Sergey S. Antsyferov, Professor, Doctor of Technical Sciences

Ksenia N. Fazilova, assistant, fazilova@mirea.ru

MIREA - Russian Technological University, Russia, Moscow

*Abstract. Monitoring of the functioning of the control system for the calibration of nanometry reference measures is carried out on the basis of a previously developed methodology, which includes the construction of the phase space of the system functioning, the construction of acceptable boundaries of the functioning area, and the determination of the current state of the system.*

*Keywords: system functioning control, approximation, cognitive model, technological process.*

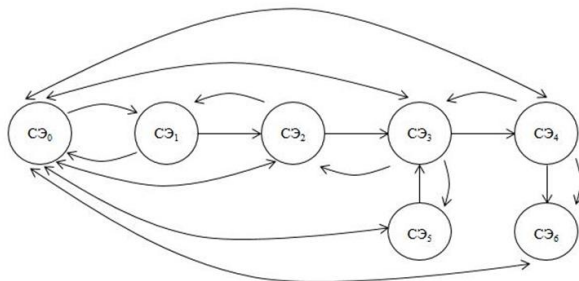
Для наблюдения и измерения параметров наноструктурированных объектов широко используются системы зондовой нанометрии. Системы зондовой нанометрии выполняют функции не только наблюдения, но и измерения параметров наноструктурированных объектов. В силу этого, они нуждаются в соответствующем метрологическом обеспечении и прежде всего в методах и технических средствах калибровки эталонных мер. Следует отметить, что качество существующих систем калибровки эталонных мер [1] необходимо постоянно контролировать, что гарантирует, в свою очередь, достижение необходимых показателей точности.

Контроль функционирования связан, согласно ранее разработанной методологии [2-3], с выполнением таких операций, как установление диапазона допустимых значений вероятностей эффективности

функционирования структурных элементов (СЭ) системы, построение фазовой диаграммы функционирования системы и определение допустимых границ области функционирования.

По положению точек в фазовом пространстве может осуществляться контроль функционирования системы. В случае «выхода» той или иной точки за пределы установленных границ области принимаются соответствующие решения о коррекции тех или иных параметров технологических процессов.

Согласно разработанной методологии система аппроксимируется когнитивной моделью (рис. 1).



*Рисунок 1 – Структурная схема системы управления процессами калибровки эталонных мер нанометрии*

Каждый СЭ данной системы содержит локальную систему знаний, средства накопления или коррекции ее в процессе эксплуатации, а также средства обмена с другими элементами.

Функции СЭ:

**СЭ₀** – контроль функционирования системы управления калибровкой эталонных мер нанометрии.

**СЭ₁** – подготовка поверхности неоднородных мер высоты для измерений средствами нанометрии.

Метод подготовки: предварительное магнетронное напыление пленки хрома (при измерении средствами интерферометрии) или островной пленки золота (при измерении средствами зондовой нанометрии).

Показатели эффективности:

\* мера равномерности коэффициента отражения по всей поверхности меры. Вероятность достижения требуемого значения меры равномерности коэффициента отражения по всей поверхности меры  $P=0,95$ ;

\* сохранение пропорций и структуры рельефных элементов. Вероятность обеспечения требуемых пропорций  $P=0,95$ .

Вероятность эффективности СЭ₁ – 0,9.

**СЭ₂** – оценка шероховатости поверхности калибровочных мер.

Метод оценки: измерение с помощью стилусного профилометра AlphaStep D-600 путем сканирования поверхности мер алмазной иглой (стилусом) и последующей обработки профиля. Измерения должны

проводиться при минимально возможном значении скорости сканирования стилуса по поверхности меры (~0,01 мм/сек) и минимально возможном значении силы прижима стилуса к поверхности (~0,03 мг).

\* Параметр Ra (Raw) является универсальным показателем, дающим наиболее полную характеристику шероховатости поверхности с учетом всех точек. Вероятность обеспечения требуемого значения параметра Ra P=0,95;

\* Параметр Rz выводит среднее арифметическое последовательных значений разности высот пиков и долин, взятых на длине оценивания L, отражая таким образом высоту неровностей профиля по 10 точкам. Вероятность обеспечения требуемого значения параметра Rz P=0,95.

Вероятность эффективности СЭ<sub>2</sub> – 0,9.

СЭ<sub>3</sub> – измерение высоты эталонной меры путем компарирования методом стилусной профилометрии, определение отношения значений высот аттестуемой меры и меры сравнения.

Метод измерения:

Измерения в режиме компарирования проводятся с помощью стилусного профилометра Alpha-Step D-600, калибровка которого была проведена в соответствии с руководством по эксплуатации с помощью меры высоты ступени KTS-4500 QS (фирмы VLSI) с паспортным значением высоты равным  $451,2 \pm 2,9$  нм, расширенная неопределенность измерений 2,9 нм указана для доверительной вероятности P = 0,95.

СЭ<sub>4</sub> – измерение высоты меры сравнения методом трехмерной реконструкции в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

Метод измерения:

Трехмерная реконструкция производилась в РЭМ S-4800, стереоизображения фиксировались при углах наклона меры  $\pm 150$  и увеличении  $\times 20K$ .

Показатель эффективности:

\* среднее квадратическое отклонение результатов измерений от среднего арифметического. Вероятность достижения требуемого значения – 0,95;

\* значение относительной стандартной неопределенности измерений параллакса. Вероятность достижения требуемого значения – 0,95.

Вероятность эффективности СЭ<sub>4</sub> – 0,9.

СЭ<sub>5</sub> – калибровка стилусного профилометра.

Калибровка проведена в соответствии с руководством по эксплуатации с помощью меры высоты ступени KTS-4500 QS (фирмы VLSI) с паспортным значением высоты равным  $451,2 \pm 2,9$  нм, расширенная неопределенность измерений 2,9 нм указана для доверительной вероятности P = 95 %.

Вероятность эффективности СЭ<sub>5</sub> – 0,95.

СЭ<sub>6</sub> – калибровка РЭМ.

Увеличение РЭМ S-4800 было предварительно откалибровано с помощью периодической меры модели 150-D2 (период 144 нм), прошедшей калибровку в РТВ (Германия) методом оптической дифрактометрии с относительной погрешностью менее 0,1%.



Показатель эффективности:

\* точность определения увеличения РЭМ. Вероятность достижения требуемого значения – 0,9.

\* точность определения углового положения гониометрического столика. Вероятность достижения требуемого значения – 0,9.

Вероятность эффективности СЭ<sub>6</sub> – 0,81.

Используя предложенную методику, полагая при этом  $P_{min}=0,95$ ,  $P_{max}=0,98$ ,  $N=6$ ,  $\Delta L > 0$ ,  $\Delta J > 0$  найдем граничные значения  $\Delta H=0,05-1,6$ ;  $\Delta \dot{H}=0,05-0,97$ ;  $\Delta L=0,53-0,98$  (рис. 2). При построении области функционирования системы, параметры задавались исходя из достижения наивысшей точности измерения высоты эталонной меры, достигаемой методами интерферометрии ( $\pm 2$  нм).

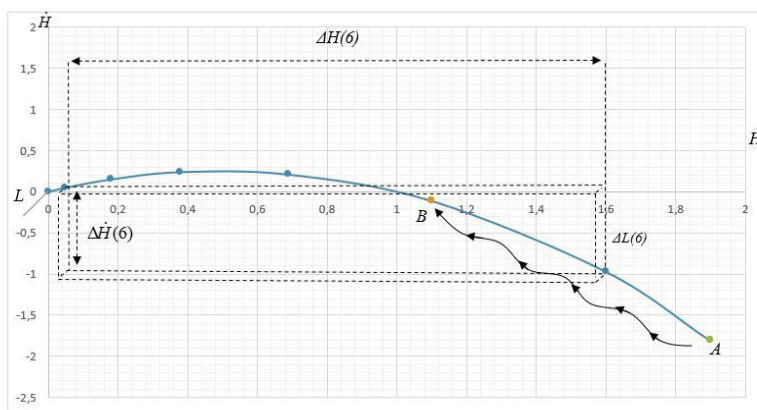


Рисунок 2 – Положение точек в фазовом пространстве

Использование методики контроля качества функционирования системы управления процессами калибровки эталонных мер обеспечило возможность достижения точности измерения высоты эталонной меры, сопоставимой с точностью эталонного метода интерферометрии.

### Список литературы

1. Antsyferov S.S., Karabanov D.A., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Reference gage calibration methods of probe nanometry systems // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1889. – Issue 4. – P. 042034.

2. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Method for controlling the cognitive systems functioning in non-equilibrium stability mode // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1679. – Issue 3. – P. 032068.

3. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н. Методика оценки эффективности структурных элементов когнитивных систем в реальном масштабе времени // Нелинейный мир. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 33-41.

Материал принят к публикации 11.10.21.

## ВЫБОР КЛЮЧЕВЫХ ДАННЫХ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРЕДНАЗНАЧЕНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

**Кирилл Александрович Батенков**

Академия ФСО России, сотрудник, доцент, д.т.н.

Россия, Орёл, [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru)

*Аннотация. Показано, что обычно ключевые показатели эффективности отражают взаимосвязь между ключевыми бизнес-целями и функционированием телекоммуникаций. Подчеркивается, что ключевые рабочие характеристики непосредственно обеспечивают ключевые бизнес-цели.*

*Ключевые слова: качество обслуживания, телекоммуникационная услуга, критерий качества, параметр качества, качество функционирования.*

### KEY DATA SELECTION FROM POINT OF VIEW OF COMMUNICATION SYSTEM PURPOSE

Kirill A. Batenkov

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, employee, docent, doctor of technical sciences, Russia, Oryol, [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru)

*Abstract. It is shown that usually key performance indicators reflect the relationship between key business goals and the functioning of tele-communications. It is emphasized that the key performance characteristics directly provide the key business goals.*

*Keywords: quality of service, telecommunications service, quality criterion, quality parameter, quality of functioning.*

Одной из наиболее сложных задач, связанных с управлением сетями и услугами, является фиксация части данных как ключевых с точки зрения предназначения системы связи (обычно коммерческих целей). Руководители поставщиков услуг организуют свою работу в строгом соответствии с коммерческими целями. Обычно ключевые показатели эффективности отражают взаимосвязь между ключевыми бизнес-целями и функционированием телекоммуникаций. Так, на ключевые бизнес-цели воздействуют ключевые рабочие характеристики, измеряемые ключевыми показателями эффективности.

До середины семидесятых годов прошлого века контроль эффективности был преимущественно связан с техническими вопросами – развитием сети, повышением качества услуг, профессиональной подготовкой технического персонала и т. п. С изменением акцента с технических на финансовые проблемы и выживаемость более важное значение стало придаваться финансовым показателям, включающим доходность, ликвидность, тарифы, составление счетов, денежные сборы и т. д.

Ключевые бизнес-цели стандартны для телекоммуникационной индустрии [1]. Беглый взгляд на ежегодные отчеты любого оператора сетей

или услуг обнаруживает соответствующие показатели в той или иной форме. Доход (экономический рост и гарантии) и снижение издержек обычно имеют наивысший приоритет. Перечень ключевых бизнес-целей не является окончательным, но включает в себя наиболее универсальные формулировки [2].

Ключевые бизнес-цели коррелируют со сферами торгово-промышленной деятельности, затрагивающими интересы любой компании. Обобщенно ключевые бизнес-цели имеют пять категорий:

- рост доходов (поддержание);
- снижение издержек;
- улучшение работы с клиентами;
- соблюдение государственных требований;
- снижение технологических и ресурсных затрат.

*Ключевые рабочие характеристики* – обобщенные характеристики, обеспечивающие ключевые бизнес-цели. Например, готовность услуг или сети в будущем может гарантировать рост доходов. Однако доступность сети может быть необходимым условием со стороны государственных требований для обеспечения услуги [3, 4].

Ключевые рабочие характеристики непосредственно обеспечивают ключевые бизнес-цели и могут быть количественно измерены в режиме реального времени [5, 6]. К ним относят: готовность; ограничение воздействия сбоев сети; целостность; защита (контроль); качество обслуживания клиентов (при общении с персоналом); простой; уведомления; надежность; повторяемость; результативность и производительность.

#### **Список литературы**

1. ГОСТ Р 57330–2016. Системы технического обслуживания и ремонта. Ключевые показатели эффективности. – Введ. 2017–12–07. – М.: Стандартинформ, 2017. – 31 с.
2. Rec. E.419. Business oriented key performance indicators for management of networks and services. – 2006–02. – Geneva: ITU-T, 2006. – 16 p.
3. Батенков К. А. Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи // Труды СПИИРАН. 2016. № 2 (45). С. 75–101.
4. Батенков К. А., Батенков А. А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 2018. № 3 (58). С. 128–159.
5. Батенков К. А. Числовые характеристики структур сетей связи // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53). – С. 5–28.
6. Батенков К. А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 5. С. 1093–1118.

*Материал принят к публикации 21.09.21.*

УДК 621.315.611

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee5142f0.21613507

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА

**Марина Николаевна Дубяго**, ст. преподаватель, w\_m88@mail.ru

**Николай Константинович Полуянович**, к.т.н., доцент, nik1-58@mail.ru

Южный федеральный университет, РФ, Таганрог

*Аннотация. Установлено, что наибольшее распространение в прогнозировании термических процессов в силовых кабельных сетях находят методы, основанные на искусственных нейронных сетях (НС). Проведен анализ влияния различных функций активации НС на ошибку прогноза термофлюктуационных процессов в силовых кабельных сетях. Установлено, что минимум ошибки прогнозирования термических процессов в силовых кабельных сетях является НС с функцией активации  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{purelin}$  в выходном слое.*

*Ключевые слова: информационные системы, нейронные сети, моделирование, электроэнергетика, прогнозирование.*

### NEURAL NETWORK INFORMATION-MEASURING SYSTEM IN TASKS OF RESOURCE PREDICTION

Marina N. Dubyago, Senior Lecturer, w\_m88@mail.ru

Nikolai K. Poluyanovich, cand.tech.sc., Associate Professor, nik1-58@mail.ru

Southern Federal University, Russian Federation, Taganrog

*Abstract. It was established that methods based on artificial neural networks (НС) find the most widespread in predicting thermal processes in power cable networks. Analysis of influence of various functions of НС activation on forecast error of thermoflux processes in power cable networks was carried out. It is established that the minimum error of thermal processes prediction in power cable networks is НС with function of  $\text{logsig}$  activation in hidden layer and  $\text{pureline}$  in output layer.*

*Keywords: information systems, neural networks, mode-leasing, electric power industry, forecasting.*

Перспективной является задача развития распределенной энергетики с разработкой информационных систем, позволяющих осуществить интеграцию децентрализованных генерирующих мощностей в централизованную электрическую сеть. Одним из основных элементов будущей энергетики – Smart Grid являются активно-адаптивные электрические сети. Прогнозирование нагрузочной способности кабельных сетей (КС) является одним из значимых элементов Smart Grid [1].

В ходе эксплуатации КС её изоляция подвергается тепловым, электрическим, химическим, механическим, атмосферным и другим видам воздействий. Вследствие чего изменяются технические характеристики изоляционных материалов [2]. Одной из важнейших характеристик СКЛ в системе электроснабжения является их нагрузочная способность, которая

определяется тепловым режимом [3]. Решить данную проблему можно, если прибегнуть к мониторингу температуры кабеля в процессе его работы.

Целью работы являются автоматизация процесса мониторинга и снижение степени присутствия человека в непосредственной близости от диагностируемого высоковольтного оборудования без потери при этом информации о текущем техническом состоянии оборудования за счёт применения специализированной системы мониторинга состояния изоляции КС [1].

Объектом исследования являются образцы силового кабеля АПв Пу г-1х240/25-10 [4]. В качестве выборки данных использовался массив значений послонных температур в процессе работы исследуемых образцов КС, рис.1 [5].

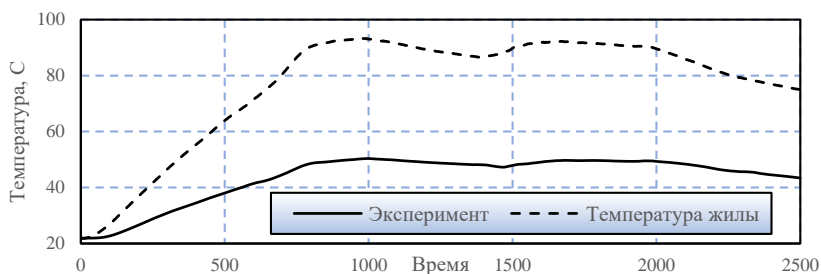


Рисунок 1 – Экспериментальная температура на поверхности СКЛ, и прогнозируемая температура жилы кабеля.

График изменения тока жилы СКЛ при динамической нагрузке представлен на рис 2.

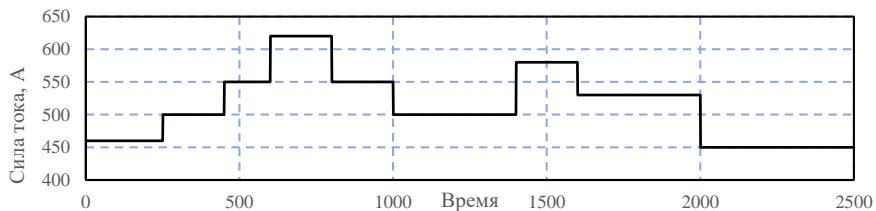


Рисунок 2 – График изменения тока жилы СКЛ при динамической нагрузке

Для построения НС, которая будет решать задачу прогнозирования температурных режимов КС, необходимо выбрать правильную конфигурацию слоев и типов функций активации в них. НС выбрана с обратным распространением ошибки как система с наиболее широким применением, при этом сеть имеет 3 входа, количество слоев – 2, в первом слое (скрытом) – 10 нейронов, во втором (выходном) – 1 нейрон. Функция активации подбиралась экспериментальным путем, при анализе результатов использовалось значение среднеквадратического отклонения.

**Подбор функции активации.** При моделировании прогнозирования термических процессов НС с функцией активации  $\text{tansig}$  в обоих слоях среднеквадратическое отклонение составило 6.13 %. Такая система вполне

приемлема для текущего исследования, хотя и с меньшей точностью, поскольку интенсивный рост и падение температуры жилы СКЛ происходят довольно часто, что пагубно сказывается на состоянии изоляции СКЛ.

Моделирование НС с функцией активации  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{tansig}$  в выходном показала среднеквадратическое отклонение прогноза 8.7 %. Численно точность прогноза снизилась, и, судя по графику, система недостаточно точно установила взаимосвязь между входными и выходными данными.

НС выставила не совсем корректные веса нейронов, поэтому данная система плохо подходит для решения задачи прогнозирования температурных режимов СКЛ в связи с низкой точностью прогноза.

Моделирование системы с функциями активации  $\text{logsig}$  в обоих слоях показало крайне высокую погрешность прогноза. Среднеквадратическое отклонение прогноза составило 30.6 %. На графике видно, что система неправильно настроила веса нейронов, спрогнозировав лишь примерное направление изменения температуры жилы СКЛ. Такая конфигурация системы не подходит для задачи прогнозирования термических процессов в СКЛ.

Моделирование НС с конфигурацией  $\text{logsig} - \text{purelin}$  дало достаточно достоверные данные. Система показала готовность к скачкам температур в исследуемом образце СКЛ. Среднеквадратическое отклонение прогноза составило 5.2 %, что является лучшим результатом из исследованных конфигураций нейросетей. Данная система подходит для решения задачи прогнозирования термических процессов в СКЛ.

На рис. 3 и таблице 1 приведены сводные результаты анализа результата прогноза исследованных конфигураций НС.

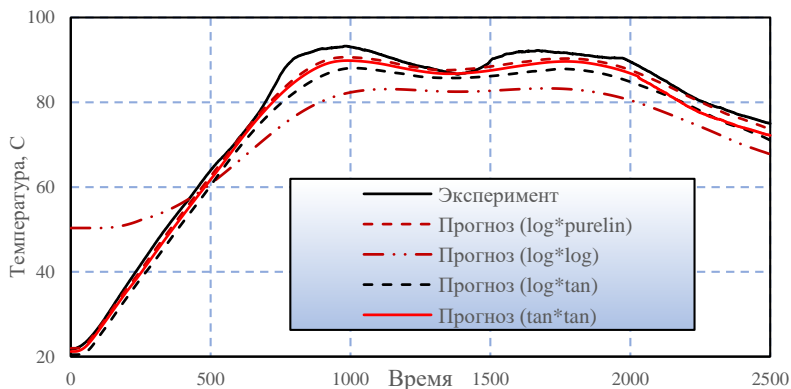


Рисунок 3 – Результаты анализа прогноза исследованных конфигураций НС

Таблица 1 – Результаты прогноза исследованных конфигураций НС

Тип функции активации (передаточной) НС в (скрытом / выходном) слоях		Значение среднеквадратического отклонения	
		ε, °С	ε, %
Конфигурация слоев НС	Сигмоидальная / линейная	4.89	5.2%
	Гиперболический тангенс / гиперболический тангенс	5.71	6.13%
	Сигмоидальная / гиперболический тангенс	8.13	8.7%
	Сигмоидальная / сигмоидальная	28.6	30.6%

**Вывод.** Использование метода обратного распространения ошибки для корректировки весовых коэффициентов позволяет отказаться от больших объемов вычислений, необходимых при прямом вычислении градиента, благодаря учету структуры НС и отказу от многократного вычисления откликов нейронов на каждом шаге градиентного метода оптимизации. Из рассмотренных алгоритмов обучения НС для решения задачи прогнозирования ресурса СКЛ, самую высокую точность имеет Ливенберга-Марквардта. Минимум ошибки прогнозирования термических процессов в СКЛ показала НС с функцией активации:  $\text{logsig}$  - в скрытом слое и  $\text{purelin}$  - в выходном слое.

#### Список литературы

1. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Бурьков Д.В. Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов. Инженерный вестник Дона, №3 (2017).
2. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Ростов-на-Дону-Таганрог, 2019.
3. Полуянович Н.К. Энергетическая электроника. Пособие по решению задач и методические указания / Таганрогский радиотехнический университет, Кафедра теоретических основ электротехники. Таганрог, 2001.
4. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable. В сборнике: Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012. 2012. С. 418-422.
5. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишхопов В.Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов. Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17. № 3 (90). С. 117-127.

Материал принят к публикации 13.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee595646.84715756

## ОБНАРУЖЕНИЕ СКАЧКОВ В ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ С ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫМИ ОПОРНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

*Александр Сергеевич Пустошилов*

Сибирский федеральный университет, ст. преподаватель  
Россия, Красноярск, alphasoft@inbox.ru

*Аннотация. В работе показан простой способ обнаружения скачков в фазовых измерениях (в том числе и в одночастотных измерениях) навигационных приемников с высокостабильными (водородными) опорными генераторами за счет использования аппроксимации полиномами высоких степеней.*

*Ключевые слова: фазовые измерения, ГНСС, скачки в фазовых измерениях, полиномиальная аппроксимация.*

### DETECTING CYCLE SLIPS IN CARRIER-PHASE MEASUREMENTS OF NAVIGATION RECEIVER WITH HIGH STABLE REFERENCE GENERATORS

Alexander S. Pustoshilov

Siberian Federal University, senior lecture, Russia, Krasnoyarsk, alphasoft@inbox.ru

*Abstract. The paper shows a simple method for detecting cycle slips in the carrier-phase measurements (including single frequency measurements) of navigation receivers with highly stable (hydrogen) reference oscillators by using approximation by high-degree polynomials.*

*Keywords: carrier-phase measurement, GNSS, cycle slips, polynomial approximation.*

**Введение.** В настоящее время широкое распространение получило использование фазовых измерений в высокоточной спутниковой навигации. Однако их использование требует решить несколько задач, одна из которых это обнаружения скачков (проскоков счета циклов) в таких измерениях. Проблемам присутствия скачков в фазовых измерениях навигационных приемников и способам их обнаружения посвящено множество работ как российских, так и зарубежных авторов, например [1–4]. В работе [5] были рассмотрены два способа обнаружения скачков в одночастотных фазовых измерениях в зависимости от качества опорного генератора навигационного приемника. Данная работа будет посвящена детализации особенностей обнаружения скачков в фазовых измерениях для навигационных приемников с высокостабильными опорными генераторами с использованием линейной полиномиальной фильтрации медленноменяющегося тренда. Будет показана устойчивость предлагаемого метода к небольшим пропускам (отсутствием измерений) в данных.

**Предлагаемый метод.** В работе [5] было предложено использовать следующую модель измерений навигационного приемника:

$$y(t_i) = x(t_i) + s(t_i) + n(t_i),$$



где  $x(t_i)$  – кусочно-постоянная функция скачков в фазовых измерениях,  $s(t_i)$  – медленноменяющийся гладкий тренд,  $n(t_i)$  – остаточный шум измерений.

Для случая, когда навигационный приемник использует высокостабильный опорный генератор, предлагается следующий алгоритм обнаружения скачков:

1. Строится матрица линейной фильтрации, исключаящая медленноменяющийся тренд  $s(t_i)$  из измерений  $y(t_i)$ :

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} - \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^T,$$

где  $\mathbf{I}$  – это единичная матрица,  $\mathbf{M}$  – это матрица, в ряды которой записаны дискретные ортогональные полиномы Хана до степени  $d$ , метод расчета которых описан в работах [6–7].

2. После чего вектор измерений  $\mathbf{y}_i = y(t_i)$  умножается на матрицу  $\mathbf{F}$ :

$$\mathbf{fy} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{y}.$$

3. По результатам фильтрации  $\mathbf{y}_F$  вычисляются первые разности по времени:

$$d\mathbf{fy}_i = \mathbf{fy}_{i+1} - \mathbf{fy}_i.$$

4. Выполняется поиск положений значений вектора  $d\mathbf{fy}$ , которые превышают заданный пороговый уровень (выбирается из соображений ожидаемой величины разрыва кусочно-постоянной функции).

Для отработки предложенного алгоритма были использованы 1-секундные измерительные данные станции из сети IGS[8] – OH13 подключенной к водородному стандарту частоты. Был выбран интервал измерений (рисунок 1), на котором отсутствовали скачки в фазовых измерениях. После чего на этот интервал добавлялся модельный скачок, а также имитировался пропуск в данных. На всех рисунках линией показан график результатов фильтрации  $\mathbf{fy}$ , точками результаты вычисления разности  $d\mathbf{fy}$ .

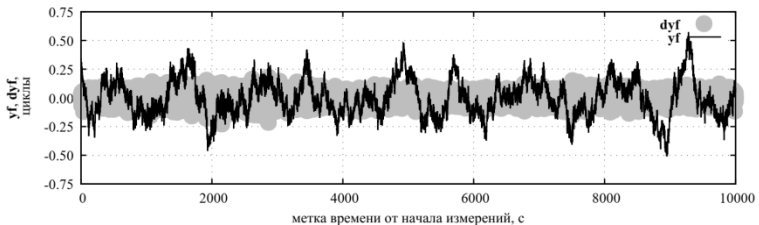


Рисунок 1 – Результаты применения алгоритма (размер базиса  $d = 15$ ) поиска к измерениям спутника R07 станции OH13 19 мая 2019 г.

В данные (рисунок 1) вносится модельный скачок величиной в 1 цикл и имитируется пропуск в данных длительностью 30 секунд, после чего повторно выполняется процедура поиска скачков (рисунок 2).

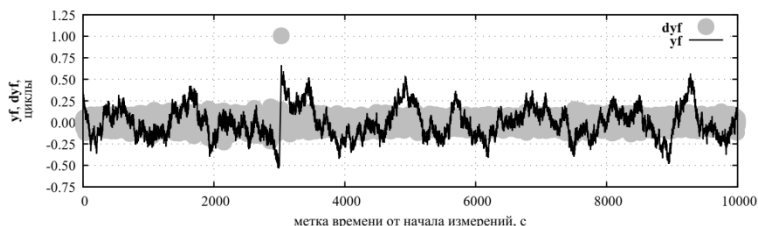


Рисунок 2 – Результаты применения алгоритма (размер базиса  $d = 15$ ) поиска к измерениям спутника R07 станции ОН13 19 мая 2019 г. (с модельным скачком в момент пропуска длительностью 30 секунд)

Как видно из рисунка 2 данный алгоритм обнаруживает величину и положения разрыва в фазовых измерениях, даже в отсутствии 30 секунд измерений. Так как данный алгоритм выполняет только линейные операции с данными, мы можем на модельных данных оценить зависимость оценки величины разрыва (скачка) от интервала пропуска в измерениях. Для этого в модельном скачке величиной в 1 цикл будем имитировать отсутствие части измерений и применять предложенный алгоритм. Результаты оценки величины разрыва показаны на рисунке 3.

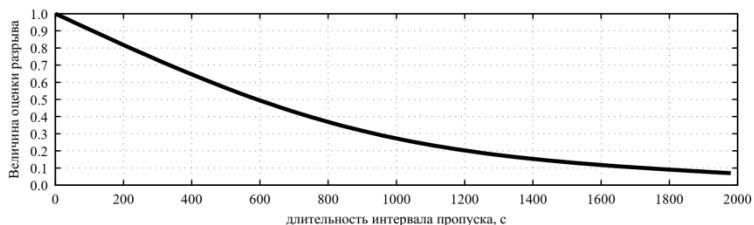


Рисунок 3 – Зависимость оценки величины разрыва от длительности пропуска в измерениях

Как видно из рисунка 3 с увеличением интервала отсутствия измерений оценка происходит с большей ошибкой и при величине пропуска в 600 секунд (10 минут), недооценка составляет порядка 0,5. Исходя из графиков (рисунок 1 и 2) ширина шумовой составляющей приблизительно 0,2-0,3 цикла, такой величины оценки алгоритм будет достигать при интервале пропуска более 900 секунд (15 минут) и как видно из рисунка 4 предложенный алгоритм не может обнаружить смоделированный скачок.

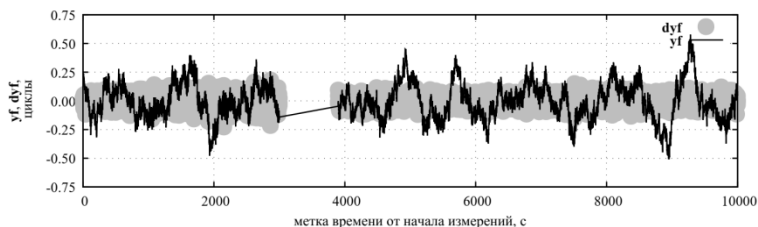


Рисунок 4 – Результаты применения алгоритма (размер базиса 15) поиска к измерениям спутника R07 станции ОНЗ 19 мая 2019 г. (с модельным скачком в момент пропуска длительностью 900 секунд)

**Заключение.** Предложенный метод позволяет обнаруживать скачки в фазовых измерениях навигационных приемников с высокостабильными опорными генераторами даже в случае небольших пропусков в измерениях (менее 10 минут).

#### **Благодарности.**

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020-0011).

#### **Список литературы**

1. Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical research letters*. 1990;17(3):199–202. DOI: 10.1029/GL017i003p00199
2. Безменов И. В., Блинов И. Ю., Наумов А. В., Пасынок С. Л. Алгоритм определения скачков в комбинации Мельбурна-Вуббена, образованной из кодовых и фазовых данных измерений в глобальных навигационных спутниковых системах. *Измерительная техника*, 2019, № 5, с. 25-30. doi:10.32446/0368-1025it.2019-5-25-30
3. Farooq S. Z., Yang D., Jin T., Ada E. N. J. Survey of Cycle Slip Detection & Correction Techniques for Single Frequency Receivers. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2018, с. 957-961, doi:10.1109/ICCT.2018.8599879.
4. Farooq S. Z., Yang D., Jin T., Ada E. N. J. CS detection and correction techniques for RTK positioning using single-frequency GNSS receivers: trends and comparison, *Radar Sonar & Navigation IET*, т. 13, №. 11, 2019, с. 1857-1866. doi:10.1049/iet-rsn.2019.0084.
5. Пустошилов А. С., Царев С. П. Обнаружение разрывов в фазовых измерениях одночастотных навигационных приемников при различной нестабильности опорных генераторов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):144–161. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.004.
6. Tsarev S. P., Kytmanov A. A. Discrete orthogonal polynomials as a tool for detection of small anomalies of time series: a case study of GPS final orbits. <https://arxiv.org/abs/2004.00414> (дата обращения: 01.06.2020).
7. High degree least squares polynomial fitting using discrete orthogonal polynomials. <https://github.com/sptsarev/high-deg-polynomial-fitting> (дата обращения: 01.06.2020)
8. Crustal Dynamics Data Information System NASA’s Archive of Space Geodesy Data [https://cddis.nasa.gov/Data\\_and\\_Derived\\_Products/CDDIS\\_Archive\\_Access.html](https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/CDDIS_Archive_Access.html) (дата обращения: 01.06.2020).

Материал принят к публикации 01.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee615800.49870308

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

**Оксана Александровна Топчий**

Брянский государственный технический университет, аспирант  
Россия, Брянск, o.topchy@mail.ru

*Аннотация. Описаны исследования в плоскости разработки программных средств приемного устройства для системы дистанционного мониторинга электромагнитной активности в атмосфере. Проведены экспериментальные исследования и выполнен спектральный анализ электромагнитных сигналов с помощью разработанной программы в среде LabVIEW.*

*Ключевые слова: дистанционный мониторинг, рамочная скрещивающаяся приемная антенна, спектральный анализ, определение направления на источник сигнала.*

### RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE USING REMOTE MONITORING

Oksana Al. Topchy

Bryansk State Technical University, postgraduate student, Russia, Bryansk, o.topchy@mail.ru

*Abstract. The development of software for a receiving device for a system for remote monitoring of electromagnetic activity in the atmosphere is described. Experimental studies were carried out and spectral analysis of electromagnetic signals was made using the developed program in LabVIEW.*

*Keywords: remote monitoring, crossed loop antenna, spectral analysis, finding of direction to the signal source.*

В настоящее время разработка дистанционных систем мониторинга для наблюдения за электромагнитными явлениями в атмосфере (молниями, короткими замыканиями, обрывами в воздушных линиях электропередачи и т.п.) представляют огромный интерес и для науки, и для промышленности.

Цель данной работы – проведение исследований для практической разработки программных средств по наблюдению за электромагнитными процессами в атмосфере и возможностью определения места их возникновения.

Важным элементом системы мониторинга является приемная антенна [1]. Исследования проводились с помощью двойной рамочной скрещивающейся антенны, представляющей собой две неподвижные взаимно-перпендикулярные рамки, принимающие электромагнитный сигнал по двум каналам звуковой карты компьютера (рис.1). Сконструированная приемная антенна и разработанная программа в среде проектирования виртуальных

приборов *LabVIEW* [2] рассчитаны для работы в низкочастотном диапазоне до 30 кГц.

Так как полотна антенны расположены друг относительно друга под углом  $90^\circ$ , то по сигналам двух каналов определяется направление на место возникновения электромагнитного разряда. Угол направления на сигнал находится из отношения двух амплитуд сигналов обоих каналов приемной антенны:  $\alpha = \arctan(U_x/U_y)$  [3].

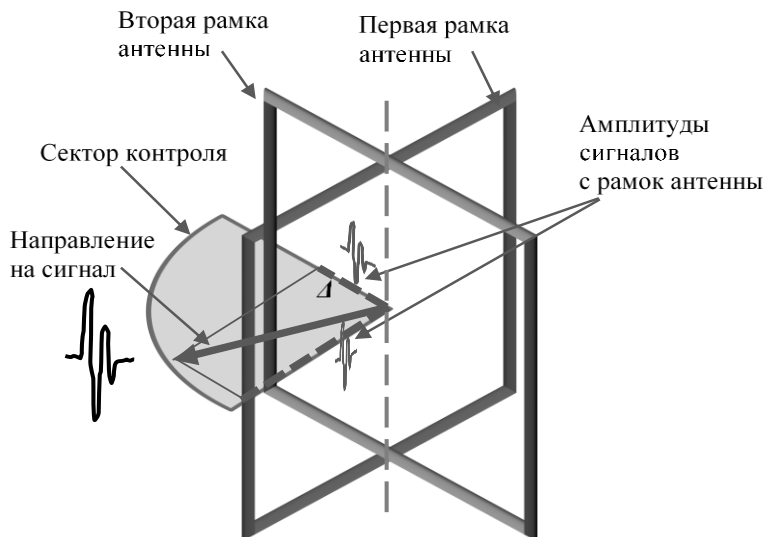


Рисунок 1 – Схематичное изображение двойной рамочной скрещивающейся антенны

На рис. 2 представлен рабочий вид программы *LabVIEW* для мониторинга электромагнитной активности среды с результатами обработки наблюдаемых сигналов. Программа записывает электромагнитные сигналы окружающей среды, которые поступают с приемной антенны, анализирует их и выполняет разложение в ряды Фурье. Полученный спектр сигнала отображается на экране анализатора, определяющего основную частоту и частоты гармоник сигнала, их амплитуды. Рядом представлен экран спектрографа, который показывает спектрограмму электромагнитного сигнала.

В режиме определения направления сигналы окрашиваются на ленте спектрограммы цветом, который соответствует градусу на цветной части палитры (рис.4, а).

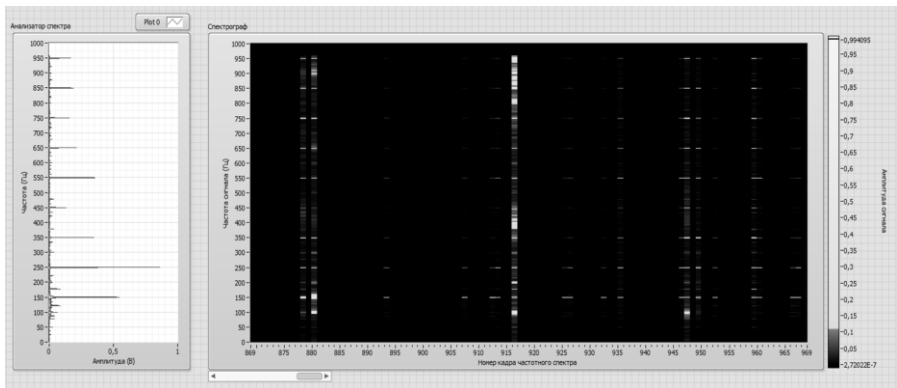


Рисунок 2 – Рабочий вид программы LabVIEW для мониторинга электромагнитной активности среды с результатами обработки наблюдаемых сигналов

На рис.3-4 показаны результаты мониторинга грозовой активности в Брянской области 29 мая 2021 года с 6:30 до 7:00 ч. с помощью приемной антенны и разработанной программы получены: осциллограммы записи грозовых разрядов; спектры полученных сигналов, определение направления на источник сигналов и построение спектрограмм полученных сигналов.

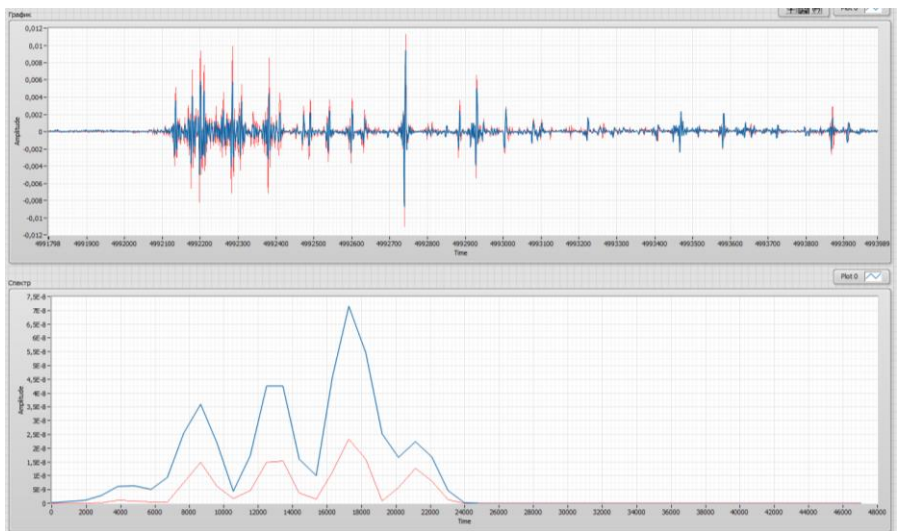
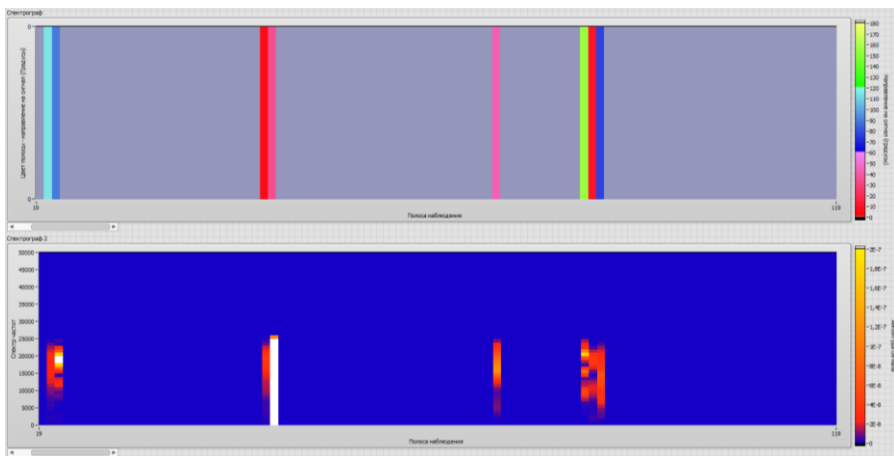
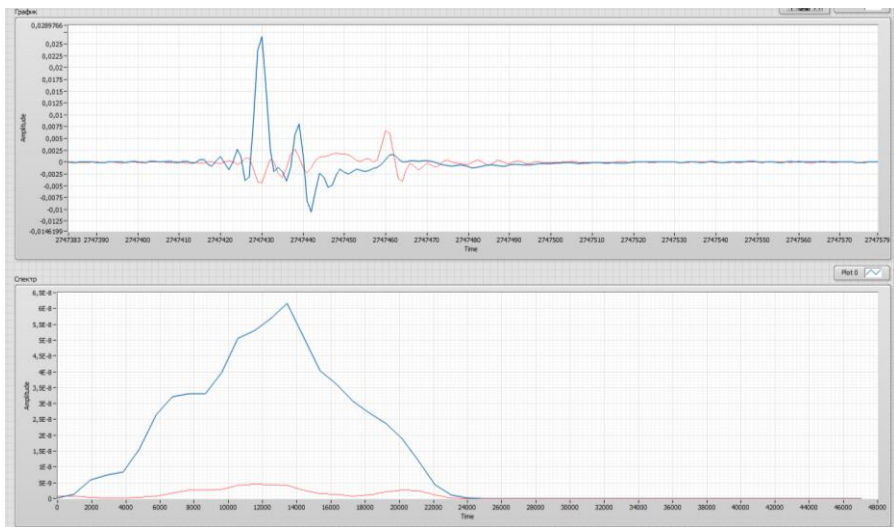


Рисунок 3 – Мониторинг грозы в Брянской области 29.05.21 в 6:35 (AM) с помощью приемной антенны и разработанной программы: а – осциллограмма записи грозовых разрядов; б – построение спектра полученных сигналов



*Рисунок 4 – Мониторинг грозы в Брянской области 29.05.21 в 6:35 (АМ) с помощью приемной антенны и разработанной программы: а – определение направления на источник сигналов; б – построение спектрограммы полученных сигналов*

На рис.5-б представлены результаты записи сигнала в ясную погоду. По прогнозу погоды, в радиусе 500 км сохранялась сухая, без дождей и гроз, погода.



*Рисунок 5 – Запись сигнала в ясную погоду с помощью приемной антенны и разработанной программы: а – осциллограмма записи; б – построение спектра полученного сигнала*

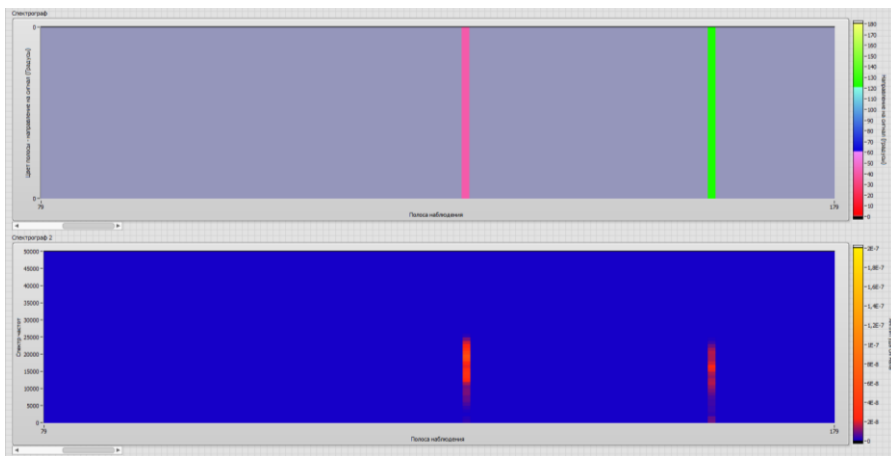


Рисунок 6 – Спектрограмма (б) и направление (а) на записанный сигнал в ясную погоду

В ходе проведенных исследований были разработаны программные средства приемного устройства в среде *LabVIEW* для наблюдения и записи электромагнитных сигналов для системы дистанционного мониторинга электромагнитной активности в атмосфере. Проведены экспериментальные исследования записи электромагнитных возмущений природного и не природного характера рамочной антенной, выполнен спектральный анализ наблюдаемых сигналов. Получены спектрограммы осциллограмм наблюдаемых сигналов и моделирование определения направления на источник сигнала.

Сейчас, в процессе усовершенствования программы по определению направления на электромагнитный сигнал и определения расстояния до него, попутно пробуются возможность определения вида сигнала.

Проведенные исследования могут быть использованы для разработки дистанционного способа определения мест повреждений, сопровождающихся дуговыми разрядами, в воздушных линиях электропередачи.

#### Список литературы

1. Ротхаммель К. Антенны. / К. Ротхаммель. – М.: «Энергия», 1979. – 320 с.
2. Федосов В.П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / В.П. Федосов, А. К. Нестеренко/ под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
3. Кузес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. – М.: Издательство «Советское радио», 1964. – 640 с.

Материал принят к публикации 18.10.21.



УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee6abfe1.10540781

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «IM VIEW» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**Артем Сергеевич Третьяков**

Белорусско – Российский университет, ст. преподаватель  
Республика Беларусь, Могилев, loggie121@gmail.com

*Аннотация. Приведены основные сведения о программном обеспечении «IM View», необходимом аппаратном обеспечении для его корректной работы. Обозначены основные направления дальнейшего развития программы.*

*Ключевые слова: программное обеспечение, асинхронный электродвигатель, тепловентиляционный режим, модуль.*

### **UPGRADING OF IM VIEW SOFTWARE FOR RESEARCH OF THERMAL VENTILATION MODES OF INDUCTION MOTORS**

Artem S. Tretiakov

Belarussian-Russian university, senior lecturer, Republic of Belarus, Mogilev, loggie121@gmail.com

*Abstract. The basic information about "IM View" software, necessary hardware for its correct operation is given. The main directions of further development of the program are outlined.*

*Keywords: software, induction motor, thermal ventilation mode, module.*

Одним из параметров, определяющим долгий и безотказный срок службы асинхронного электродвигателя, является тепловентиляционный режим. Для идентификации тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей было разработано программное обеспечение «IM View» [1].

Данное программное обеспечение написано на кроссплатформенном фреймворке QT5, и может быть портировано под любую современную операционную систему. Программа содержит пять основных модулей:

1. Модуль исходных данных.
2. Модуль идентификации параметров схемы замещения исследуемого асинхронного электродвигателя.
3. Модуль электромагнитных процессов.
4. Модуль тепловентиляционных процессов.
5. Модуль выходных данных.

Модуль исходных данных представляет собой базу данных на основе технологии SQLite v3, в которой хранятся исходные данные для последующих расчетов (паспортные данные двигателей, настроечные коэффициенты, и т.д.).

Модуль идентификации параметров схемы замещения исследуемого асинхронного электродвигателя предназначен непосредственно для

определения реальных параметров Т-образной схемы замещения с их последующей передачей в следующие модули.

Модуль электромагнитных процессов представляет собой математический аппарат, переписанный из системы дифференциальных уравнений в систему разностных уравнений. Данный модуль предназначен для:

1. Снятие сигналов токов и напряжений каждой фазы.
2. Обработка полученных данных в зависимости от типа решаемой задачи.
3. Определение составляющих потерь энергетической диаграммы испытуемого асинхронного электродвигателя.
4. При отсутствии датчика скорости – восстановление сигнала скорости с помощью наблюдателя состояния.
5. Вычисление электромагнитного момента и т.д.

Модуль электромагнитных процессов предназначен для:

1. Экспериментальное определение температур на основе датчиков температуры.
2. Расчет температур отдельных узлов испытуемого асинхронного электродвигателя на основе данных предыдущих модулей.
3. Определение параметров вентиляционной схемы замещения.
4. Возможность выбора тепловой схемы замещения при расчете температур и т.д.

Модуль выходных данных представляет собой итоговый файл. Объединяющий все стадии текущего эксперимента, в котором отображаются все измеренные параметры.

Для работы программы используется специализированное аппаратное обеспечение:

1. Блок ввода аналоговых сигналов (снятие сигналов тока, напряжения, и скорости в реальном времени).
2. Цифровые приборы для измерения температур и параметров воздушного потока, развиваемого вентилятором испытуемого асинхронного электродвигателя.

Конечная цель программного обеспечения «IM View» - идентификация теплового состояния асинхронного электродвигателя в произвольный момент времени.

В процессе работы над программой были выработаны пути над ее дальнейшим развитием. Каждый модуль получил свой набор улучшений.

Модуль исходных данных получил возможность сохранять полученных данные в виде единого файла-контейнера.

Модуль идентификации параметров схемы замещения исследуемого асинхронного электродвигателя получил более точную и доработанную методику идентификации параметров. Более того, на данный момент ведется разработка адаптивной модели расчета коррекционных коэффициентов на основе регрессионной модели.

Модуль электромагнитных процессов получил целый ряд улучшений:

1. Возможность гибкой настройки отображаемых графиков (отображение, толщина линий, и т.д.).
2. Возможность настройки обработки полученной информации, исходя из решаемой задачи.
3. Расчет составляющих потерь энергетической диаграммы асинхронного электродвигателя в режиме реального времени.
4. Учет потерь в стали и эффекта вытеснения тока и т.д.

Более того, для работы с рядом цифровых приборов, имеющих интерфейс RS-485, был реализован протокол Modbus для их корректной работы.

Модуль тепловентиляционных процессов сейчас получает самый большой пакет обновлений:

1. Возможность выбора режима расчетов.
2. Возможность выбора тепловой схемы замещения для ее последующих расчетов.
3. Гибкая настройка параметров расчета тепловых и вентиляционных параметров.

В программе предполагается несколько режимов ее работы:

1. Демо-режим (демонстрация работы программы).
2. Режим работы с аппаратным обеспечением с учетом наличия или отсутствия датчика скорости.
3. Использование так называемой внутренней модели, имитирующей работу асинхронного электродвигателя.
4. Возможность загружать данные из ранее полученных файлов.

Также планируется в дальнейшем реализация сеансов – работа программы, в течение которой полностью обрабатывается ее алгоритм для идентификации тепловых и вентиляционных параметров без возможности изменения исходных данных.

Последним пунктом программы, который на данный момент только прорабатывается, является алгоритм для идентификации остаточного теплового ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя

#### **Список литературы**

1. *Третьяков, А.С.* Разработка программного обеспечения IM VIEW для исследования тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей / А. С. Третьяков // Информационные технологии и системы 2020 (ИТС 2020) = Information Tehnologies and Systems 2020 (ITS 2020): материалы междунар. науч. конф., (Республика Беларусь, Минск, 18 ноября 2020 года редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – 220 с.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 004.932

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee7379d1.40655518

## РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ СВЕТОФОРА НА ИЗОБРАЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**Антон Владиславович Холкин**, студент, ltonyhol1@gmail.com

**Никита Валерьевич Андреев**, ст. преп. каф. АСОИУ, nik57643@ya.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. Цель данной работы состоит в разработке интеллектуальной системы по распознаванию сигналов светофора. Для достижения была применена сеть DetectNet, с использованием интерфейса для обучения, который разработан компанией NVIDIA. С их помощью были выявлены недостатки данного подхода, в связи с чем потребовалось рассмотреть другой вариант решения данной задачи.*

*Ключевые слова: компьютерное зрение, классификация, нейронные сети, распознавание объектов, обнаружение объектов.*

### TRAFFIC SIGNAL RECOGNITION ON AN IMAGE USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Anton V. Kholkin, Nikita V. Andreyanov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan

*Abstract. The purpose of this work is to develop an intelligent system for recognizing traffic signals. To achieve this, DetectNet was applied, using an interface for learning, which was developed by NVIDIA. With their help, the disadvantages of this approach were identified, and therefore it was necessary to consider another option for solving this problem.*

*Keywords: computer vision, classification, neural networks, object recognition, object detection.*

На данный момент наблюдается рост популярности автоматизированных систем во многих областях. В большинстве таких систем очень актуально применение компьютерного зрения, а, следовательно, использование нейронных сетей. В результате развития и применения нейронных сетей возможна автоматизация на более высоком уровне многих процессов. Например, создание управляющих машин позволит человеку уйти от автоматизации конкретного оборудования и перейти к комплексной автоматизации производственных активов и сооружений.

В связи с актуальностью автоматизированных систем, было решено разработать модуль распознавания сигналов светофора.

Для достижения поставленной цели, было выбрано два подхода:

1. Нейронная сеть DetectNet
2. Классификатор на основе нейронных сетей

Картинки для разметки и обучения были взяты с видеорегистратора автомобиля. После подготовки изображений для сети DetectNet и отправки их на обучение были получены отрицательные результаты обучения [1, 2].

Картинки были взяты в разное время года, в связи с чем имеются кадры как зимние, так и летние. Но так как выборка оказалась небольшой, а изображение светофора довольно небольшими, была получена проблема с обучением на выборке. Из-за чего обучение проходило с определенными трудностями и достичь положительно результата не удалось. График обучения на изображениях можно увидеть на рисунке 1.

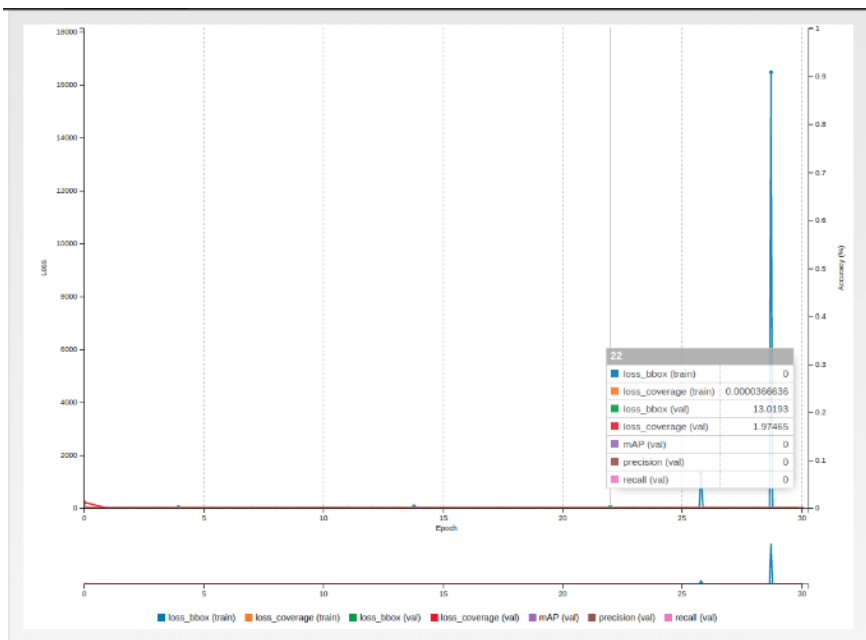


Рисунок 1 – График с результатами обучения нейронной сети

В связи с полученными результатами, было решено преобразовать картинку и классифицировать на ней изображения.

Было решено начать с вырезания нижней части изображения, так как светофор в основном располагается на верхней части кадра. И для начала было решено убрать 40%.

Далее было решено привести изображение к черно-белому формату и применить метод выделения границ для ярких объектов, что помогло выделить возможные области расположения светофоров. Далее для распознавания сигнала светофора было решено обучить классификатор.

Для этого была выбрана TensorFlow – программную библиотеку для машинного обучения [3].

Вырезав изображения с картинок (рисунок 2) для обучения и подготовив описание получившихся групп.



Рисунок 2 – Подготовленные для классификатора картинки светофоров

После чего было обучен и опробован классификатор, точность которого получилась порядка 80% рисунок 3 [3].

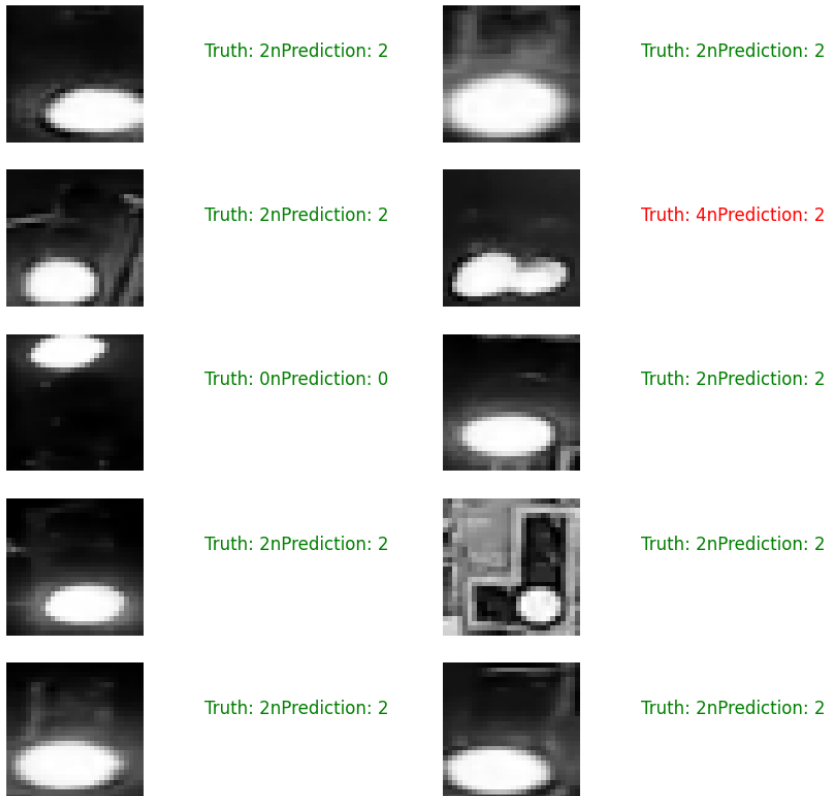


Рисунок 3 – Результат работы классификатора

Но это связано с недостаточным количеством примеров, количество примеров различных сигналов светофора можно увидеть на рисунке 4.

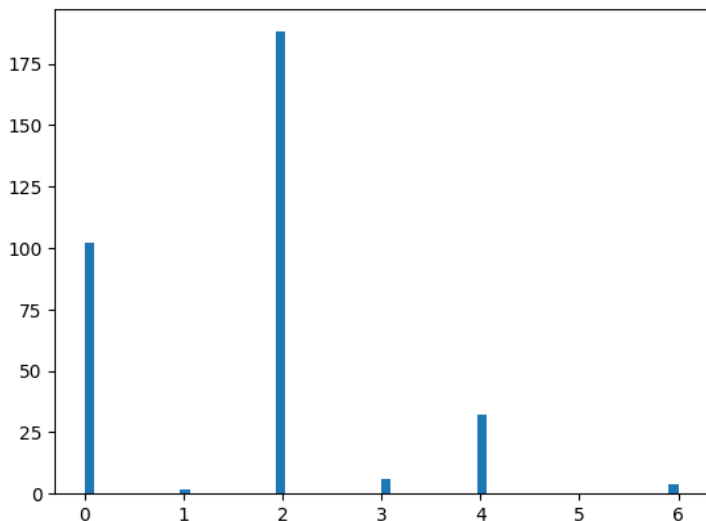


Рисунок 4 – Количество картинок с различными сигналами светофора

В результате проведенного исследования были выявлены важные детали:

1. В случае довольно малого размера изображения без предварительной подготовки можно столкнуться с проблемой при обучении нейронной сети и подбором ее настроек в слоях.

2. Необходимо создание базы данных светофоров, которые располагаются на дорогах России, т.к. европейские светофоры имеют некоторые отличия от российских.

По результатам выполнения работы был разработан алгоритм приведения изображения в нужный вид для подачи на классификатор, а также обучен классификатор для распознавания сигналов светофора, улучшение и доработка данных алгоритмов продолжаются.

Так же в результате разработки стало понятно, что для более точной работы алгоритмов, нужен теггинг существующих светофоров с помощью GPS/GLONASS, применение данных систем поможет улучшить результат.

#### Список литературы

1. NVIDIA DRIVE – Software: [Электронный ресурс] URL: <https://developer.nvidia.com/drive/drive-software#driveworks> (Дата обращения: 10.10.2020)

2. NVIDIA Developer Blog: [Электронный ресурс] URL: <https://developer.nvidia.com/blog/detectnet-deep-neural-network-object-detection-digits/> (Дата обращения: 10.10.2020)

3. Pramod Singh, Avinash Manure. Learn TensorFlow 2.0. Apress. 2020.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 004.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee7b9dd5.70408771

## СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОЗАПУСКОМ АВТОМОБИЛЯ НА ПЛАТФОРМЕ ARDUINO

**Антон Владиславович Холкин**, студент, ltonyhol1@gmail.com

**Гульшат Ильдусовна Гаптуллазянова**, ст. преп. каф. АСОИУ  
gigaptullazyanova@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань

*Аннотация.* В данной статье описывается система дистанционного управления автозапуском автомобиля на платформе Arduino с применением микросхемы ULN2003A (DIP), нескольких реле SRD-12VDC-SL-C, DC-DC конвертеров 2-5А, диодов, резисторов и конденсаторов. Подробно поясняются принципы работы системы, приводится схема сборки, а также основные фрагменты программного кода. Также приводится пути возможной доработки проекта.

*Ключевые слова:* система автозапуска, Arduino Uno, MQTT.

### CAR AUTOSTART REMOTE CONTROL SYSTEM ON THE ARDUINO PLATFORM

Anton V. Kholkin, Gulshat I. Gaptullazyanova

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan

*Abstract.* This article describes a remote car auto-start system based on the Arduino platform using a ULN2003A (DIP) chip, several SRD-12VDC-SL-C relays, DC-DC converters 2-5A, diodes, resistors and capacitors. The principles of the system are explained in detail, the assembly diagram is given, as well as the basic fragments of the program code. Also the ways of possible modification of the project are given.

*Keywords:* autostart system, Arduino Uno, MQTT.

### Введение

В большинстве отечественных автомобилей отсутствует функция дистанционного автозапуска, позволяющая заранее прогреть машину перед поездкой. Покупка и установка дополнительного оборудования для реализации данной функции является дорогостоящей процедурой. Цель данной работы – создать систему дистанционного управления автозапуском автомобиля, используя менее дорогие комплектующие.

Сейчас существует множество различных плат с микроконтроллерами, либо одноплатных компьютеров, подходящих для реализации необходимой системы. В силу меньшей стоимости, а также распространенности как самой платформы, так и модулей для нее, была выбрана Arduino Uno.

### Аппаратная платформа для реализации проекта

Arduino Uno – это название аппаратных и программных средств для создания простых электронных систем автоматизации и робототехники. Система имеет полностью открытую архитектуру и ориентирована на непрофессиональных пользователей. Программная часть Arduino состоит из



интегрированной программной среды (IDE), которая позволяет писать, компилировать программы и загружать их на аппаратное обеспечение [1].

Также для реализации дистанционного управления автозапуском необходимо использовать различные датчики, которые по своему назначению и технической реализации близки к понятию «измерительный прибор». Однако считывающие устройства обычно воспринимаются непосредственно человеком (через дисплеи, этикетки, панели, световые и звуковые сигналы и т.д.), в то время как показания датчиков требуют преобразования в форму, в которой человек может воспринимать информацию об измерении. Датчики могут входить в состав измерительных приборов, обеспечивая измерение физической величины, результаты которого затем преобразуются для восприятия оператором измерительного прибора. В проекте используется датчик температуры DS19B20, способный измерять температуру в диапазоне от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .

Кроме того, для управления системой применяется модуль связи SIM800L, также через него будет осуществляться передача данных термометра (миниатюрный GSM-модем, который можно использовать в различных проектах, таких как охрана дачи или дома, сигнализация в машине и многое другое. Данный модуль, по функционалу не чем не уступает обычному сотовому телефону и с его помощью можно, отправлять SMS сообщения, совершать или принимать телефонные звонки, подключаться к Интернету через GPRS, TCP / IP и многое другое. А также, модуль поддерживает четырех диапазонную сеть GSM / GPRS).

Также для работы всего функционала автозапуска используются микросхема ULN2003A (DIP), реле SRD-12VDC-SL-C, DC-DC конвертер 2-5A, диоды, различные конденсаторы и резисторы [2]. Полная схема сборки показана на рисунке 1.

### **Принцип работы системы**

Система будет запитываться от автомобиля через конвертер, уменьшающий входящее напряжение до необходимого для правильной работы автозапуска.

Связь с системой будет осуществляться через модуль связи SIM800L, который будет передавать информацию от тахометра для определения стадии запуска автомобиля.

Функционирование аналогового тахометра происходит по принципу электронного (цифрового) прибора. В механическом тахометре сигнал от коленчатого вала передается по проводке на специальную микросхему, которая и двигает стрелку по размеченной шкале циферблата и по этим данным мы можем увидеть обороты (RPM). На лягушку педали тормоза будет соединен провод (“Break”) для того, чтобы при нажатии педали, система выключалась.

Для связи с телефоном применяется протокол MQTT, созданный для передачи данных на удалённых локациях, где требуется небольшой размер

кода и есть ограничения по пропускной способности канала. Вышеперечисленные достоинства позволяют применять его в этом проекте.

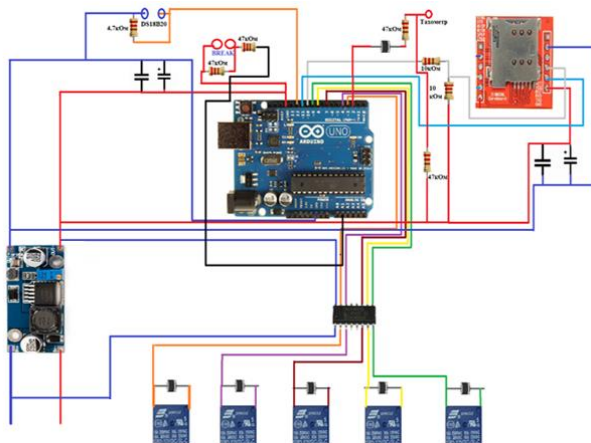


Рисунок 1 – Схема сборки

Для управления системой с телефона необходимо определить ряд команд, отвечающих за выполнение определенных действий. Так, например, команда на запуск автомобиля будет запускать следующую цепочку действий: модуль связи принимает сигнал на запуск; Arduino подает команды на микросхему ULN2003A (DIP), которая подает питание на реле, имитирующие поворот ключа; далее происходит запуск систем автомобиля. Также стоит отметить наличие конденсаторов, с помощью которых получается запастись необходимым количеством энергии для удачного запуска двигателя.

На рисунке 2 показана схема замка зажигания на примере машины Toyota VITZ с указанием важных контактов для подключения системы автозапуска [3].

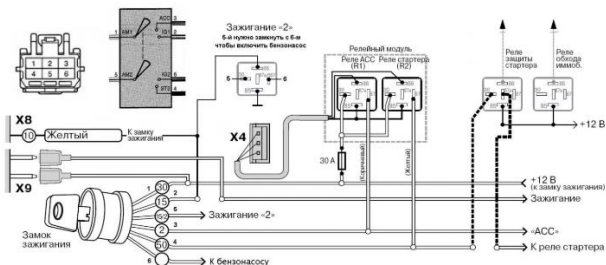


Рисунок 2 – Схема замка зажигания на примере машины Toyota VITZ

### Программная реализация

Для реализации программной составляющей проекта необходимо определить список необходимых библиотек [4]:

1. TinyGsmClient (использование функций GSM-модуля).

2. PubSubClient (обмен сообщениями по протоколу MQTT).
3. SoftwareSerial (реализация последовательных интерфейсов).
4. OneWire (доступ к однопроводным датчикам температуры).
5. DallasTemperature (для работы с температурными микросхемами Dallas).
6. avr/wdt, watchdog (сторожевой таймер для оптимизации энергопотребления).

В таблице 1 представлены основные фрагменты кода программы.

Таблица 1 – Основные фрагменты программного кода

Наименование фрагмента и его описание	Фрагмент программного кода
Код для запуска двигателя с проверкой на текущее количество оборотов двигателя.	<pre> void enginestart() {   if (Calc_RPM() &lt; 600)   {     Serial.println ("Запуск двигателя");     digitalWrite(IMMO, HIGH), delay (500);     digitalWrite(ACC, HIGH), delay (500);     digitalWrite(IGN1, HIGH), delay (500);     digitalWrite(IGN2, HIGH), delay (500);     digitalWrite(STARTER, HIGH), delay (1000);     digitalWrite(STARTER, LOW), delay (3000);     if (Calc_RPM() &gt; 600) {     Serial.println ("Двигатель запущен");     stat = 1;     delay (200);     } } </pre>
Код для остановки двигателя с проверкой на текущее количество оборотов двигателя.	<pre> } Serial.println ("Выход из запуска" ); else if (Calc_RPM() &gt; 600) { Serial.println ("Двигатель уже запущен"); Serial.println ("Выход из запуска" ); } }  void enginestop() {   if (RPM &gt; 600)   {     Serial.println ("Остановка двигателя" );     digitalWrite(IGN2, LOW), delay (200);     digitalWrite(IGN1, LOW), delay (200);     digitalWrite(ACC, LOW), delay (200);     digitalWrite(IMMO, LOW), delay (200);     stat = 0;   }   if (RPM &lt; 600) {     Serial.println ("Двигатель не запущен");   } } </pre>

**Заключение.** В результате выполнения работы была создана система управления автозапуском автомобиля на базе Arduino Uno с полной программной и аппаратной реализацией. В дальнейшем планируется доработать систему, добавив иммобилайзер – противоугонное устройство, препятствующее запуску двигателя при попытке угона.

#### Список литературы

1. Официальный сайт Arduino [Электронный ресурс] – URL: <https://www.arduino.cc/> (Дата обращения: 02.10.2021).
2. Официальный сайт Amperka.ru [Электронный ресурс] – URL: <https://amperka.ru/> (Дата обращения: 02.10.2021).
3. Устройство замка зажигания [Электронный ресурс] – URL: <https://etlib.ru/blog/605-ustrojstvo-zamka-zazhiganiya> (дата обращения: 03.10.2021)
4. Белов А.В. Программирование микроконтроллеров для начинающих и не только / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 352 с.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

UDC 681.518

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee849986.88188810

## GENERAL METHODOLOGY OF EVALUATION AND SELECTION OF COMPONENTS OF AUTOMATED SYSTEMS

**Okhunov Dilshod Mamatjonovich**, candidate of economic sciences

**Okhunov Mamatjon Hamidovich**, candidate of physical and mathematical sciences

Uzbekistan, Fergana, Ferghana branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-kHorezmi, [mamatdilshod@rambler.ru](mailto:mamatdilshod@rambler.ru)

*Abstract. The features of modern control systems are: the multifunctional nature of production; the multi-connectivity of processes and tasks of automated systems; the need to ensure interaction with systems of different levels and the same level, etc. The article discusses the methodology of evaluation and selection of components of automated systems.*

*Keywords: automated system, automated object, economic and mathematical methods and models, information and computing services, expert system, bank of algorithms and procedures, knowledge bank.*

In the process of designing automated systems (AS), a wide range of tasks arise for evaluating and selecting AS components: the selection of functions (tasks) to be automated, economic and mathematical methods and models, algorithms, software and hardware that ensure the implementation of these functions; the selection and evaluation of system-wide design solutions (operating systems and programming systems, database management systems, application software packages, etc.); automated workplaces, etc [1].

The purpose of solving the selection tasks is to ensure compliance between the needs of the automated object and the capabilities of the AS created for them. The needs of the object are expressed through the elements of the AS and are as follows:

- compliance with the parameters of the AS characteristic of the automated object;

- compliance of automated functions with the needs of AS users;

- compliance of the used economic and mathematical methods and models and algorithms for solving the problem with automated functions. This correspondence allows the accelerated receipt of the necessary information, saving machine time;

- compliance of the software tools used with the methods and algorithms for solving the problem;

- compliance of the technical means and systems used with the information and software of the AS [2].

The correspondence between the parameters of the AS and the parameters of the designed AS is achieved by an optimal choice of control functions (tasks) and means to ensure the implementation of these functions. The criterion for this choice is the optimal ratio between savings, revenues and the cost of the AS, eliminating

unnecessary costs for the creation of the AS and significant management losses [2]. The essence of the choice task is to find solutions from a variety of possible options that best correspond to a particular AS.

The following approach is proposed to ensure the systematic evaluation and selection of AS components.

1. To build an organizational and functional model of the complex and its constituent individual local AS, in which, with an indication of all the relationships, all the functions performed by the relevant management body implementing the objectives of the object in all modes of operation with internal and external relationships are reflected.

2. The allocation and formalization of tasks and their complexes is carried out, the space of task attributes is built, their ordering is carried out. Task parameters allow further selection of models and methods for solving problems, software, a set of technical means, etc.

3. For the formation of mathematical models, the formalization of management functions is carried out, i.e. economic and mathematical models are built and the possibilities of their integration into blocks are determined. When constructing models for some AS, it is necessary to rely on the results of theoretical research in this area, as well as apply the experience of using models in other AS, primarily those where similar tasks are solved. When analyzing models, their characteristics such as: functional purpose, economic and mathematical properties, degree of development, etc. are taken into account.

One of the main goals of the analysis of economic and mathematical methods and models in each AS should be the creation of a bank of models designed to facilitate the task of finding and selecting appropriate economic and mathematical methods and models.

4. Selection of a set of algorithms for solving problems and programs that implement a given solution algorithm, AS technical means.

The general approach to the implementation of the tasks of selecting the components of the AS is formed as follows.

Let there be a set of alternative solutions  $\{P_i\}$ . It is necessary to choose a solution  $\{P_k\}$ , that satisfies the formulated requirements and limitations. Moreover, the result of such a choice may not be one solution, but a certain set of  $\{P_j\} \subset P$ , since it is possible that several components of the same name with different characteristics are used in one speaker.

The decision-making process begins with the formulation of the problem, the definition of the objective function of choice, then the analysis is carried out and the ways to achieve the goal are formed that satisfy some given constraints and represent the initial set of alternative solutions formed in one way or another based on information about a particular object.

When forming a set of criteria for comparing alternatives, the consequences of each decision are revealed. The formation of a list of criteria is a complex iterative procedure, the success of which depends on how complete information about the object and its connections with the environment the developers of the AS have.

The objective function of the system can be cost, time or resource type: minimum design costs; minimum design complexity, minimum time for the development and implementation of AS; minimum operating costs, including machine time; minimum loading of technical means; minimum system response to the question; minimum capital costs for the creation of AS, etc.

After defining the objective function, restrictions are set:

a) resource constraints. Under the resources (R) for the creation and design of the automated AS, information and computing services (ICS) are understood:

- cost costs of design;
- complexity of project work;
- the costs of operating the AS and the ICS system;
- capital expenditures, which include the costs of purchasing a complex of technical means (CTM), communications equipment, construction, modernization and repair of buildings and structures and laying communication channels, infrastructure creation, etc.

The resource required to create an AS and an ICS system and carry out design work should not exceed a certain pre-set value  $\overline{R_k}$ .

$$R_k \leq \overline{R_k}$$

b) time constraints associated with the creation of the AS and the ICS system and the timing of design work; the total duration of the process of creating and designing the AS, creating the ICS system, approved in accordance with the established procedure; the duration of individual stages of creating the AS and ICS and design work.

c) restrictions related to the required machine time.

d) logical constraints. They reflect the organizational, informational, technical and technological interrelationships of various components when choosing solutions, i.e. determine their compatibility.

The compatibility conditions of the decisions made can be set as follows:

1) the expression  $\chi_m + \chi_n \leq 1$  indicates the incompatibility of the decisions taken in the case when  $\chi_m$  and  $\chi_n$  correspond to the solutions of  $R_m$  and  $P_n \subset \{P_i\}$

2) the expression  $\sum_{i=1}^J = 1$  shows that only one solution out of the set  $\{P_i\}$  can

be used when creating an AS and an ICS and designing an AC.

The next step is to evaluate alternatives based on the selected criteria and the rating scale. As a result of constructing evaluation scales and evaluating many alternatives on these scales, a lot of estimates are obtained and the problem of choice is solved.

Evaluation and selection of solutions can be carried out by one of the following methods: direct calculations, statistical estimates, expert assessments, experimental verification and modeling.

Practical evaluation of decisions made at specific facilities is carried out using all evaluation methods. At the same time, the practical combination of the methods discussed above is determined by the specific nature of the decisions taken.

For effective implementation and selection of options, it is advisable to develop a special (expert) system based on human-machine methods for solving selection problems, when the solution is achieved with human participation at certain stages of the iterative process implemented by a computer. The decision is made by a group of expert specialists in the "man-machine" dialogue mode.

The system should ensure the process of setting selection tasks, including the formation of a set of criteria and constraints, a set of estimates, the preparation of the necessary information, the choice of a model and a solution method based on the type of selection tasks, the solution of the selection task, as well as the means of collecting and processing information to ensure the collection of the necessary information, the analysis of the developed option and the choice of solutions.

The creation of thematic data banks characterizing automation objects, control functions and means of their implementation, and saturating them with sufficiently complete, reliable and operational information can be considered as a separate information valuable product.

The most complex element of the decision selection system, which is its core, is the BAP - bank of algorithms and decision selection procedures. The formation of the BAP is the process of creating a knowledge bank and requires significant experience from the developer in such areas of knowledge as theory and practice of management activities, information technology, as well as the development of expert systems.

### **References**

1. *S.S. Gulyamov, B.Y. Khodiev, A.A. Musaliev, B.A. Begalov.* Information systems management: - Tashkent, TSEU. 2007 – 333 p .
2. *Okhunov D.M.* Theoretical and methodological aspects of the development of marketing automated information systems. - Tashkent, Fan, 2020– 208 p.

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ»**

SECTION «SIMULATION OF MECHATRONIC SYSTEMS AND ELECTRIC DRIVE  
WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS, ELECTROMECHANICAL  
AND ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND DEVICES»

УДК 621.86

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee8d81c4.71775363

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ  
ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ МЕХАНИЗМОВ  
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

***Кирилл Александрович Гончаров***

Брянский государственный технический университет, зав. каф. «Подъемно-транспортные машины и оборудование», доцент, к.т.н.

Россия, Брянск, ptm\_bstu@mail.ru

*Аннотация. Приведен способ математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором, соответствующих различным ступеням сопротивлений в цепи ротора и аппроксимируемых прямыми, при моделировании неустановившегося движения механизмов подъемно-транспортных машин.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, механические характеристики, электродвигатель с фазным ротором, механизмы подъемно-транспортных машин.*

**MATHEMATICAL MODELING OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF ELECTRIC MOTORS WITH A PHASE ROTOR UNDER STABLE MOTION  
OF MECHANISMS OF LIFTING AND TRANSPORTATION MACHINES**

Kirill A. Goncharov

Bryansk State Technical University, head of the Department "Handling machinery and equipment", associate professor, candidate of technical sciences, Russia, Bryansk, ptm\_bstu@mail.ru

*Abstract. A method of mathematical synthesis of the equations of the mechanical characteristics of an electric motor with a phase rotor, corresponding to various resistance steps in the rotor circuit and approximated by straight lines, when simulating the unsteady movement of the mechanisms of hoisting-and-transport machines, is presented.*

*Keywords: mathematical modeling, mechanical characteristics, electric motor with a phase rotor, mechanisms of hoisting-and-transport machines.*

Моделирование переходных процессов в механизмах подъемно-транспортных машин является актуальной задачей в связи с развитием систем управления электроприводом на основе преобразователей частоты тока питающей сети. При этом «классические» системы управления при



применении электродвигателей с фазным ротором являются более экономичным решением [1], что в совокупности с требованиями, устанавливаемыми к скоростям механизмов и точности позиционирования элементов подъемно-транспортных машин, в определенных проектных случаях является более обоснованным вариантом реализации.

Стоит отметить, что методики подбора сопротивлений в цепи ротора довольно часто не коррелируется с процессами, происходящими непосредственно в механизме [2; 3], а именно:

- с приведенными массами и моментами инерции;
- количеством необходимых ступеней при пуске, каждая из которых реализует ускорение элементов механизма, не превышающее допустимых значений;
- временными отрезками работы электродвигателя на различных ступенях, позволяющими осуществить общий плавный пуск механизма;
- моментами перехода с одной ступени механической характеристики на другую.

В настоящей работе предлагается описание способа математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором, соответствующих различным ступеням сопротивлений в цепи ротора и аппроксимируемых прямыми, при моделировании неустановившегося движения механизмов подъемно-транспортных машин, позволяющего учесть описанные выше факторы.

Вид механической характеристики электродвигателя при моделировании движения любого механизма определяет функцию (уравнение) движущего момента, встраиваемого в соответствующую часть общего уравнения движения, записываемого, в данном случае, в дифференциальной форме. При построении динамической модели механические характеристики электродвигателей с достаточной степенью точности можно аппроксимировать набором прямых, сменяющих друг друга при достижении ротором определенных скоростей. Механическую характеристику электродвигателя с фазным ротором можно представить в виде, показанном на рис. 1.

Каждый участок механической характеристики задается уравнением прямой. Для участков 1 – 4

$$M = A + B \left( \frac{30\omega_{\text{пр}}}{\pi} \right), \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты в уравнении;  $\omega_{\text{пр}}$  – угловая скорость звена привода (вала электродвигателя).

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из уравнения прямой

$$M = A + Bn, \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения вала электродвигателя.

Прямая 1 проходит через две точки с координатами  $[n_c; 0]$  и  $[n_{\text{ном}}; M_{\text{ном}}]$ , где  $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения вала электродвигателя (об/мин),  $M_{\text{ном}}$

– номинальный крутящий момент, развиваемый электродвигателем,  $n_c$  – синхронная частота вращения вала электродвигателя.

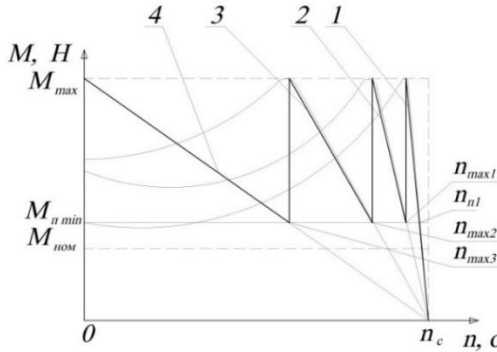


Рисунок 1 – Преобразование механической характеристики электродвигателей с фазным ротором

Прямая (2), соответствующая участку 4, проходит через точки  $[n_c; 0]$  и  $[0; M_{max}]$ .

Минимальный пусковой момент  $M_{n\ min}$  определяется подбором сопротивлений в цепи ротора. При пуске двигателя с пусковым моментом  $M_{п} = M_{max}$  (рис. 1) минимальный пусковой момент  $M_{п\ min}$ , а также параметры  $n_{n1}$ ,  $n_{max2}$ ,  $n_{max3}$  определяются из решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{max} - M_{n\ min}}{M_{max}} = \frac{n_{n1} - n_{max1}}{n_c - n_{max1}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n\ min}}{M_{max}} = \frac{n_{max1} - n_{max2}}{n_c - n_{max2}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n\ min}}{M_{max}} = \frac{n_{max2} - n_{max3}}{n_c - n_{max3}}; \\ \frac{M_{max} - M_{n\ min}}{M_{max}} = \frac{n_{max3}}{n_c}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Прямая 2 (рис. 1) пройдет через точки  $[n_c; 0]$  и  $[n_{max1}; M_{п\ min}]$ , прямая 3 – через точки  $[n_c; 0]$  и  $[n_{max2}; M_{п\ min}]$ . Величину  $n_{max1}$  определяют подстановкой  $M_{max}$  в уравнение прямой для участка 1.

На примере кранового электродвигателя МТН 412-8 (4 пары полюсов,  $n_c = 750$  об/мин,  $M_{ном} = 293,8$  Нм) механическая характеристика для четырех ступеней переключения задается четырьмя уравнениями прямой (рис. 1).

Уравнение прямой, соответствующей участку 1 механической характеристики

$$M_1 = 6296,7 - 8,396 n .$$

Подставляя в это уравнение вместо  $M_1$  параметр  $M_{max} = 882$  Нм, получим  $n_{max1} = 645$  об/мин.

Остальные, необходимые для построения механической характеристики, параметры, определяются решением системы уравнений (3).

$$\begin{cases} \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{n1} - 645}{750 - 645}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{645 - n_{\max2}}{750 - n_{\max2}}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{\max2} - n_{\max3}}{750 - n_{\max3}}; \\ \frac{882 - M_{n\min}}{882} = \frac{n_{\max3}}{750}. \end{cases}$$

Таким образом,  $M_{n\min} = 457,7$  Нм;  $n_{n1} = 695,5$  об/мин;  $n_{\max2} = 547,8$  об/мин;  $n_{\max3} = 360,6$  об/мин.

Уравнение прямой, соответствующей участку 4 механической характеристики

$$M_4 = 881,538 - 1,175 n.$$

Уравнение прямой, соответствующей участку 3 механической характеристики

$$M_3 = 1697,7 - 2,264 n.$$

Уравнение прямой, соответствующей участку 2 механической характеристики

$$M_2 = 3269,56 - 4,359 n.$$

При дальнейшем решении уравнений движения в качестве аргумента в полученных зависимостях целесообразно использовать угловую скорость  $\omega_{пр}$  в соответствии с зависимостью (1).

Предложенный в настоящей работе способ математического синтеза уравнений механических характеристик электродвигателя с фазным ротором позволяет создавать математическое описание различных ступеней механической характеристики на основе критерия равенства крутящих моментов при их переключении, что является достаточным входным условием для подбора величин сопротивлений в цепи ротора.

#### Список литературы

1. Гончаров, К. А. Сравнительный стоимостной анализ комплектаций приводов ленточных конвейеров / К. А. Гончаров // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 15–17 октября 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 101-107.

2. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. Т. 1 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

3. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учебник для вузов/М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.

*Материал принят к публикации 05.10.21.*

УДК 621.313

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ee9c5cb6.54225559

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

**Шахбоз Толибджонович Дадабаев**

Худжандский политехнический институт таджикского технического  
Университета имени академика М.С. Осими, старший преподаватель  
Республика Таджикистан, Худжанд, shahbozdadoboev@mail.ru

*Аннотация. В статье проведено исследование пусковых режимов синхронного электропривода насосной станции, а именно прямой и плавный пуск высоковольтных синхронных двигателей оросительной насосной станции первого подъема. Сделан анализ негативных пусковых факторов синхронных машин на основе компьютерного моделирования объекта исследования. Результаты моделирования наглядно приведены для основных параметров синхронного электропривода, как ее скорость вращения, тока статора, электромагнитный момент на валу и т.д.*

*Ключевые слова: синхронный двигатель, электропривод, прямой пуск, плавный пуск, переходный процесс, MATLAB/Simulink.*

### SIMULATION OF STARTING MODES OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A PUMP STATION

Shakhboz T. Dadabaev

Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University Named after Academician M.S. Osimi,  
Senior Teacher, Tajikistan, Khujand, shahbozdadoboev@mail.ru

*Abstract. The article studies the starting modes of a synchronous electric drive of a pumping station, in direct and soft start of high-voltage synchronous motors of an irrigation pumping station of the first stage. The analysis of negative starting factors of synchronous machines is made on the basis of computer modeling of the research object. The simulation results are clearly shown for the main parameters of a synchronous electric drive, such as its rotation speed, stator currents, electromagnetic torque on the shaft, etc.*

*Keywords: synchronous motor, electric drive, direct start, soft start, transient process, MATLAB / Simulink.*

В статье объектом исследований был принят высоковольтный синхронный электродвигатель (СЭД) насосного агрегата оросительной насосной станции первого подъема. Электроприводом насосных агрегатов служит явнополюсные вертикальные СЭД, а регулированием производительности насосных агрегатов выполняются дискретным путем, т.е. при необходимости включают или отключают некоторые агрегаты станции [3, 4]. Каждый пуск высоковольтного СЭД проходит многократными скачками токов электродвигателя, что приводят к нагревам двигателя и износу токоведущих частей СЭД [5, 7]. Для исследование данного вопроса использован метод компьютерного моделирования на базе системы MATLAB/Simulink. В качестве объекта моделирования используется СЭД

мощностью 8000 кВт и частотой вращения 375 об/мин. Система MATLAB сегодня является самым широко используемым средством компьютерного моделирования среди ученых [1, 2, 8, 9]. Данная система отличается от аналогичных систем, простотой в использовании и наличием широкого выбором элементов и компонентов для различных областей науки. Для моделирования электротехнических или электроэнергетических объектов в системе MATLAB есть отдельная библиотека компонентов SimPowerSystem. В данной библиотеке MATLAB есть отдельные разделы для моделирования, как электрические источники, измерительные приборы, элементы электрических цепей, электрические машины и т.д.

Объект исследования в нашем случае является весьма сложная система, состоящая из синхронного электропривода со своими переходными процессами и насосный агрегат в своей очереди с технологическими процессами [6, 10]. Сложность моделирования СЭД объясняется дополнительными частями двигателя, которых в асинхронных машинах нет, и сложными дифференциальными уравнениями с помощью которых описывается работа СЭД. Эти сложности частично упрощаются с помощью системы MATLAB. На рисунках 1 и 2 приведены модель для исследования прямого пуска СЭД и результаты моделирования.

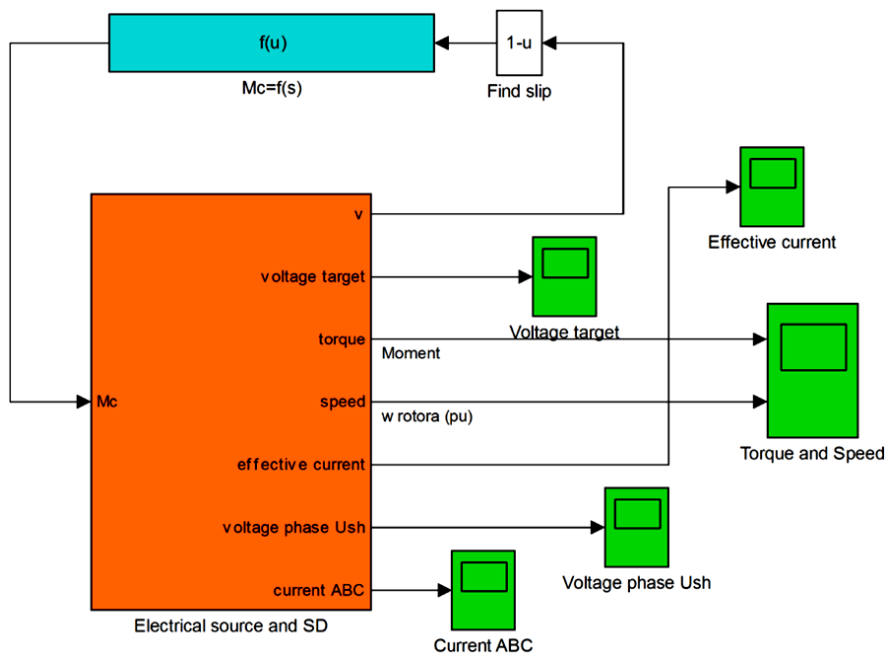


Рисунок 1 – Модель для исследования СЭД при прямом пуске

$M, M_c, I, \omega$

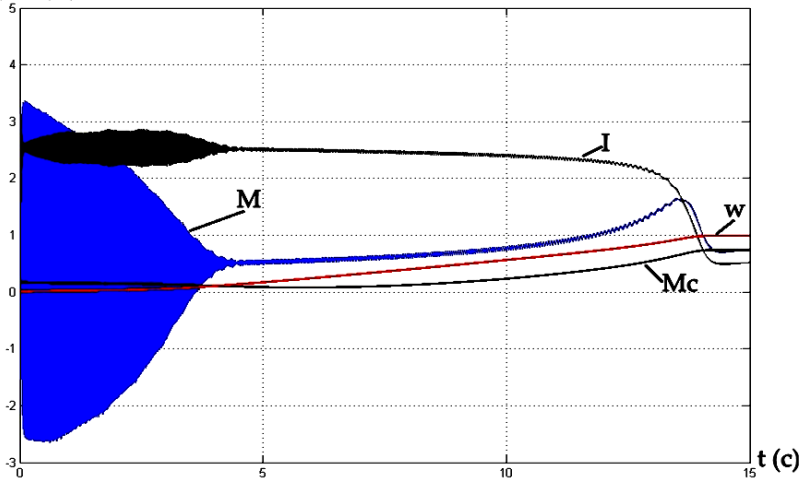


Рисунок 2 – Графики переходных процессов СЭД при прямом пуске

На рисунке 2 видно, что момент и ток СЭД при прямом пуске, имеют нестабильный и скачкообразный характер. Модель для исследования плавного пуска СЭД и результаты приведены на рисунках 3 и 4.

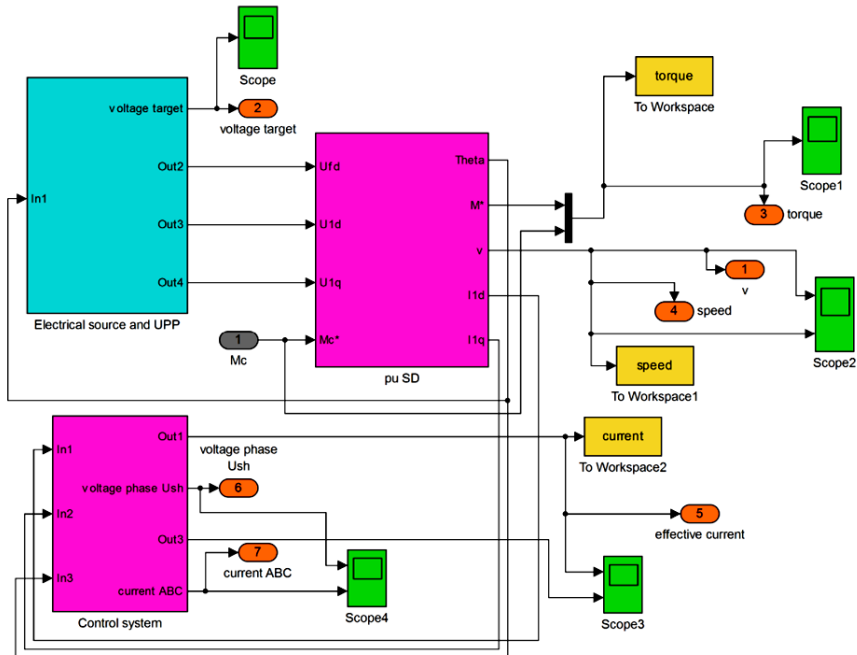


Рисунок 3 – Модель для исследования плавного пуска СЭД

**M, Mc, I, w**

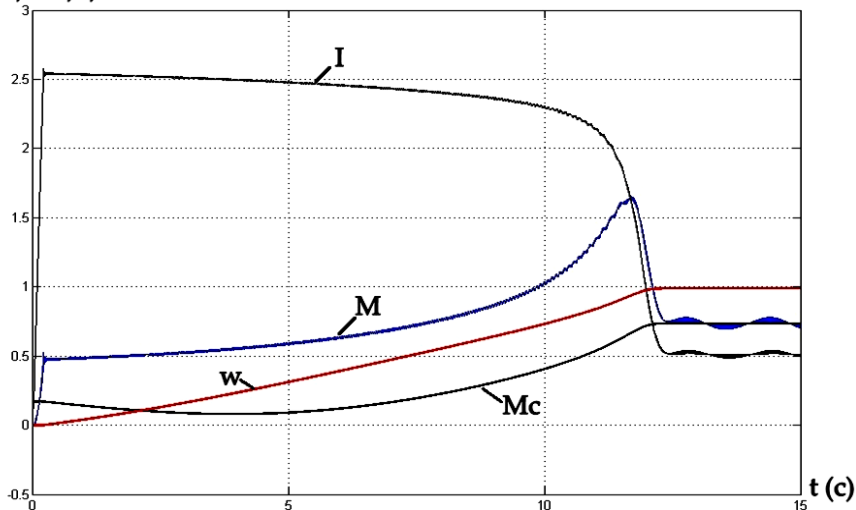


Рисунок 4 – Графики переходных процессов СЭД при плавном пуске

Как показывают результаты моделирования (см. рис. 4) использование плавного пуска дает достаточно благоприятные условия для прохождения пусковых переходных процессов. Плавный пуск получен при помощи устройства плавного пуска (УПП), что дало ограничение пускового тока и скачки амплитуд колебания электромагнитных моментов СЭД. Кроме этого современные УПП имеют следующие функции [4]:

- уменьшение динамических нагрузок на подшипниках электродвигателя;
- улучшение условия эксплуатации электротехнического оборудования;
- существенное снижение тока, потери электроэнергии и отклонения напряжения в сети при пуске СЭД;
- увеличение количества допустимых пусков и осуществление пуска электродвигателей от источников ограниченной мощности;
- повышение надежности и срока службы оборудования.

### Выводы

Моделирование с помощью системы MATLAB позволило исследовать достаточно сложную систему и сложный процесс с достаточно малыми сроками и минимальными финансовыми затратами. Сегодня уже во всю используются компьютерные технологии во всех отраслях науки и техники, где не редко

возникает потребность к детальному исследованию или анализу возникающих проблем. В таких случаях использованный в данной статье метод и система моделирования, в полнее могут помочь в решении этой проблемы. Кроме этого еще один инструмент для исследования сложных проблем, дает возможность для выбора подходящих методов исследования и получения необходимого результата в малые сроки.

*Работа выполнена по государственному проекту Республики Таджикистан «Разработка методов и средств обеспечения энергосбережения в промышленности и быту» (на примере Согдийской области). Регистрационный номер: 0121TJ1278, дата регистрации 18.10.2021 г.*

### Список литературы

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/ С. Г. Герман-Галкин – СПб.: КОРОНА – Век, 2008. -368 с.
2. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, – 2003. - 256 с.
3. Дадабаев Ш.Т. Математическая модель оросительной насосной станции первого подъема. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 3 (178). С. 239-242.
4. Дадабаев Ш.Т. Моделирование режимов пуска высоковольтного синхронного электропривода с устройством плавного пуска // САПР и моделирование в современной электронике: сборник научных трудов I международной научно-практической конференции // под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. Брянск, 2017. С. 91-94.
5. Дадабаев Ш.Т. Обзор и оценка способов управления насосными установками. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 28-30
6. Дадабаев, Ш.Т. Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки/ Ш.Т. Дадабаев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2013. - №11. - С. 29-34.
7. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока/ / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 735 с.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. –М.: ДМК Пресс, 2007. - 288 с.
9. Perelmuter, V.M. Electrotechnical systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems, CRC Press, 2013.
10. Tolibjonovich, D.S., Islomovna, T.M., Saidulloevna, M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. European Journal of Electrical Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>.

*Материал принят к публикации 07.10.21.*



УДК 004.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eea63c14.73269506

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИИ НА ПЛАТФОРМЕ ARDUINO**

**Артур Рамилевич Зарипов**, студент, artur.zar@icloud.com

**Диляра Ниязовна Сафина**, студент, dilyara.safina.20@mail.ru

**Чулпан Шамилевна Габдрахманова**, старший преподаватель

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. Приведены методы проектирования и программирование систем. Была реализована схема работы системы. Была реализована программная часть с использованием программного комплекса Arduino IDE.*

*Ключевые слова: Arduino Nano, Arduino, Arduino IDE.*

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE INDOOR MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM ON THE ARDUINO PLATFORM**

Artur R. Zaripov, student, artur.zar@icloud.com

Dilyara N. Safina, student, dilyara.safina.20@mail.ru

Chulpan Sh. Gabdrakhmanova, senior lecturer

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Russia, Kazan

*Abstract. Methods of design and programming of systems are presented. The scheme of the system was implemented. The software part was implemented using the Arduino IDE software package.*

*Keywords: Arduino Nano, Arduino, Arduino IDE.*

В наше время для каждого человека одной из главных потребностей являются комфортные условия проживания. Для того, чтобы человеку было удобно жить и работать в помещении, основные параметры окружающей среды в нём должны быть в пределах нормы. Среди параметров окружающей среды в первую очередь нужно выделить температуру и чистоту воздуха. В воздухе должно быть минимальное количество пыли, пыльцы и иных примесей. Также очень важной является концентрация углекислого газа в окружающей среде. Так как углекислый газ токсичен, высокая концентрация углекислого газа может привести к головной боли, тошноте и потере сознания.

На сегодняшний день все большую популярность набирают системы, создающие правильный микроклимат и комфортные условия для дома. Одной из таких систем является технология «Умный дом», которая отображает параметры микроклимата на специальном дисплее и позволяет автоматически управлять всеми видами технических устройств в помещениях.

Для того чтобы микроклимат сделать комфортным и правильным, необходимо знать температуру воздуха, влажность и концентрацию

углекислого газа. Для этого используются специальные датчики. Каждый датчик использует специальную технологию для определения количественного показателя состояния окружающей среды [1]. Однако считывать данные с каждого отдельного датчика является неудобным и длительным процессом. Поэтому в данной работе рассматривается система, которая будет измерять основные параметры окружающей среды, считывать информацию с соответствующих датчиков и выводить на специальный дисплей.

Среда разработки программного кода микроконтроллера Arduino – это платформа, состоящая из печатной платы с программируемым микроконтроллером. Язык программирования плат Arduino основан на C и C++. Но у него есть некоторые различия в написании кода, который компилируется и собирается с помощью avr-gcc программ. Avr-gcc – это пакет программ, необходимый при компиляции программного кода для микроконтроллеров AVR [2].

Существует множество различных стандартных библиотек для Arduino. Библиотека – это набор функций, предназначенных для упрощения работы с датчиками, экранами и различными модулями. Чтобы иметь возможность программировать Arduino, необходимо установить интегрированную среду разработки Arduino IDE на свой компьютер, который работает в операционных системах Windows, Mac OS, Linux и которая обеспечивает хорошую функциональность и набор стандартных библиотек для написания программ [2].

### **Разработка схемы работы системы контроля микроклимата**

Проектируемая система должна представлять собой модульную конструкцию, состоящую из различного набора датчиков и компонентов, позволяющих полностью решить поставленную перед ней задачу. А точнее, считывать данные с датчиков и показывать микроклимат помещения.

Система климат-контроля в помещении представлен как некий исполнитель определенных команд. Поэтому для выполнения поставленной задачи необходимо описать общую схему ее работы следующим набором функциональных возможностей:

Считывать данные с датчиков;

Сбор данных;

Анализ данных и расчеты;

Исполнение команд;

Вывод информации.

Совместная работа микроконтроллера и датчиков

Необходимо составить общую схему их подключения, так как для достижения поставленной задачи необходимо обеспечить правильное взаимодействие компонентов с помощью проводных соединений и программного обеспечения.

На рисунке 1 проиллюстрировано схема подключения используемых модулей.

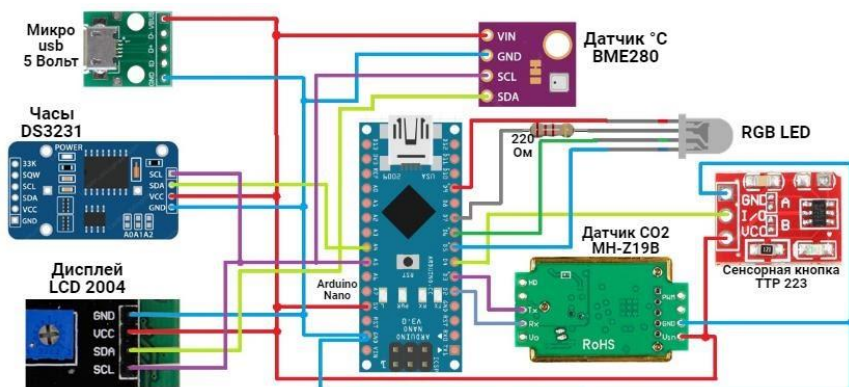


Рисунок 1 – Схематическое изображение подключения используемых модулей

Окончательный результат модульного проектирования системы контроля микроклимата внутри помещения на платформе Arduino можно увидеть на рисунке 2.

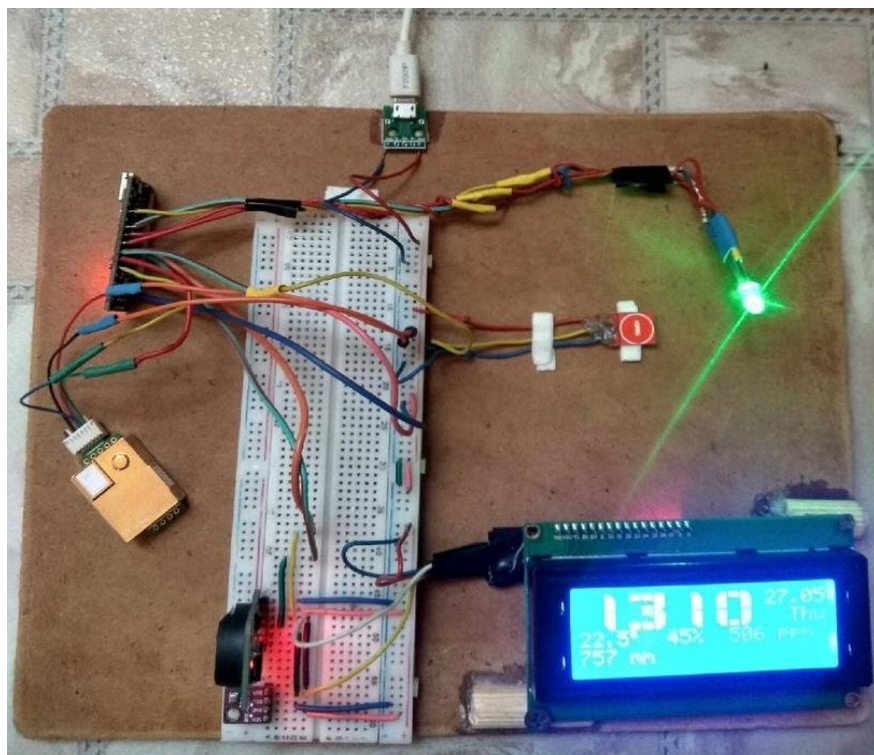


Рисунок 2 – Модульная конструкция системы контроля климатических факторов внутри помещения на платформе Arduino

## **Реализация программного кода**

Основной цикл работы системы заключается в том, что считываем показание с датчиков, затем пересчитываем время, строим график CO<sub>2</sub> в течение часа и дня, далее обновляем показание датчиков на дисплее.

Для отображения больших часов на дисплее необходимо использовать сегменты дисплея (20 столбцов x 4 строки).

Для того, чтобы посчитать время и отобразить его на экран, пишем функцию, которая будет снимать показания с датчика и вычислять время и дату.

Чтобы нарисовать двухстрочные цифры, сначала создаем функцию «case» для рисования цифры времени. Например, чтобы нарисовать цифру 1, нужно использовать на экране 2 сегмента, для этого сначала надо указать курсор с помощью функции `lcd.setCursor(x, y)`, далее вызываем каждый нужный сегмент. Поэтому принципу рисуем все остальные цифры.

Затем, чтобы вывести на экран и принимать текущее время используем функцию «`drawClock`» [2].

### **Заключение**

В процессе выполнения работы были изучены программное обеспечение, методы проектирования и программирование систем управления с использованием микроконтроллера Arduino. Также была реализована схема работы системы с учетом указанных технических особенностей, с использованием выбранного алгоритма, который был модифицирован под требования текущих задач. Затем была реализована программная часть с использованием программного комплекса Arduino IDE и ориентирована на работу с платой Arduino Nano.

### **Список литературы**

1. Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий: учебник / Издательство Ассоциации строительных вузов. О.Д. Самарин. – 2017. – 208с.

2. Белов А.В. Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств: учебник / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2016. – 544 с.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 004.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eeaf719.63067261

## РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

**Артур Рамилевич Зарипов**, студент, artur.zar@icloud.com

**Диляра Ниязовна Сафина**, студент, dilyara.safina.20@mail.ru

**Чулпан Шамилевна Габдрахманова**, старший преподаватель

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. Приведена важность измерения температуры. Обоснован выбор Arduino UNO. Собрано устройство для измерения температуры.*

*Ключевые слова: температура, Arduino, Arduino UNO.*

### IMPLEMENTATION OF AIR TEMPERATURE CONTROL USING THE ARDUINO PLATFORM

Artur R. Zaripov, student, artur.zar@icloud.com

Dilyara N. Safina, student, dilyara.safina.20@mail.ru

Chulpan Sh. Gabdrakhmanova, senior lecturer

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Russia, Kazan

*Abstract. The importance of temperature measurement is discussed. The choice of Arduino UNO is justified. Assembled a device for measuring temperature.*

*Keywords: temperature, Arduino, Arduino UNO.*

Температура воздуха играет важную роль в нашей жизни. Измерять температуру воздуха важно и дома и на предприятиях, особую важность занимает здоровье человека, ведь при высоких температурах у человека может начать возникать обезвоживание организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов, вызывает серьезные и стойкие изменения в деятельности сердечно-сосудистой системы, увеличивает частоту дыхания, а также оказывает влияние на функционирование других органов и систем.

Также очень важно контролировать температуру воздуха на предприятиях, ведь существуют приборы, у которых работоспособность точно зависит от их перегрева. В современном мире используется демпфированный датчик с интервалом около 15 мин, расположенный на пути возвратного воздуха.

Цель работы представляет реализацию контроля температуры воздуха на предприятиях и в домашних условиях, таким образом, прибор является многофункциональным.

#### **Подбор компонентов для разработки устройства**

Для разработки устройства, понадобится [1]:

1. Arduino
2. Датчик температуры

3. 5 кнопок
4. 1 светодиод
5. LCD 1602(Дисплей) и несколько соединительных проводов.

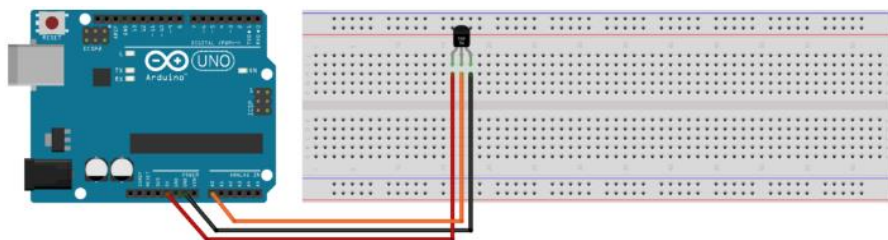
Первым делом нужно определиться, какое Arduino подойдёт для разработки устройства, в устройстве должно быть больше 10 пин входов, несколько аналоговых сигналов, напряжение и заземление. Идеально для этой разработки подойдёт Arduino UNO, которое имеет 13 Пин-входов, 6 аналоговых входов, землю и напряжение (3.3 В, 5.5 В). Чтобы подсоединить к компьютеру данное устройство понадобится USB-кабель [1].

Дальше нужно определиться, хватит ли места на Arduino, чтобы подсоединить все устройства. Достаточно просто определить по дисплею, который имеет более 12 входов, следовательно, нужно приобрести компонент, который имеет много входов, в качестве компонента я выбрал безопасную макетную плату на 800 входов, она позволит подсоединить все компоненты и не заставит сложности в том, чтобы соединить все датчики, которые будут содержаться в устройстве. Макетная плата позволяет разделять подаваемые сигналы с Arduino на несколько пинов, а так как она является безопасной, позволяет очень просто подсоединять датчики к ней.

Теперь переходим к датчикам и первое с чего необходимо начать, это с дисплея, ведь дисплей, это самая первая вещь, на которой будет отображена последующая информация. Для будущего устройства подойдёт дисплей LCD 1602, данная версия дисплея содержит 16 входов и матрицу 16x2 (16 ячеек, 2 ряда), данный дисплей позволяет в очень удобном виде просматривать информацию, которую в дальнейшем я буду заносить кодом. Также имеет свою библиотеку, которая содержит набор инструкций, прописанных для взаимодействия Arduino с самим дисплеем.

Чтобы определить температуру нужно приобрести датчик температуры воздуха, который позволяет, довольно точно определить температуру. Наиболее удачным датчиком является LM35, этот датчик, в отличие от 16-входового дисплея LCD 1602 имеет всего 3 входа, это GND(Земля), VCC (Напряжение 5 Вольт), и OUT (Выходной сигнал), выходной сигнал, это сигнал, на который подаётся информация, считываемая с датчика.

На рисунке 1 изображена схема подключения датчика LM35 к ARDUINO\_UNO.



*Рисунок 1 – Датчик LM35 подключённый к Arduino UNO*

Чтобы реализовать выбор функций на дисплее, вполне подойдут кнопки, у которых достаточно будет использовать 2 сигнала, это GND (Подключается земля) и пин сигнал, который позволит считывать информацию при нажатой кнопке.

### **Создание и описание программного кода**

Перед тем как начать описывать код, нужно подключить порт Arduino UNO к проекту.

После того как подключили порт, можно начать собирать схему Arduino UNO и писать код. Для начала подключаем библиотеку LiquidCrystal.h к нашему проекту [2].

Дальше загружаем подключённые устройства в скетч

`pinMode` – Устанавливает режим работы pin как выхода или входа.

`lcd.begin` – Устанавливает размер экрана.

`Serial.begin` - Иницирует последовательное соединение и задает скорость передачи данных в бит/с (бод).

Для того чтобы кнопка срабатывала 1 раз, без залипания, создаём 5 функций (для 5 кнопок), которые позволят срабатывать кнопке 1 раз, работает это следующим образом:

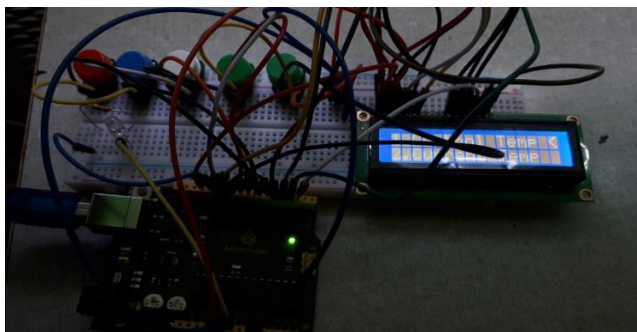
Создаётся целочисленная переменная `checkPress1`, которая проверяет, была ли нажата кнопка, ниже идёт функция типа `boolean`, которая имеет 2 значения (`true` и `false`), функции - это блок кода, который вы можете использовать в любом участке вашей программы неограниченное количество раз. Когда в функцию `changeKey` вносится кнопка(`changekey(knopka1)`), функция проверяет разницу между нажатой кнопкой и отжатой, как показано ниже, создаётся целочисленная переменная `keycheck`, которая имеет значение 0, внося в функцию кнопку (`changekey(knopka1)`), если `knopka1`, будет иметь значение 1(Нажатая), произойдёт проверка, если переменная `keycheck` не будет равняться нажатой кнопкой, то функция принимает значение `true`, то есть мы сможем понять что при разнице между нажатой и отжатой кнопкой будет видно её нажатие. Таким образом создаём 5 таких же функций для 5-ти различных кнопок, чтобы нажатие происходило 1 раз [2].

После того как была создана функция нажатия кнопки, можно приступить к созданию панели меню, где будет отображаться наша температура, её настройки, время и само меню в целом. Для этого мы создадим все нужные нам переменные.

После того как все нужные нам переменные созданы, начинаем писать основной код, который будет содержать всю нужную нам информацию.

Монитор будет состоять из окна, разбитого на три части. В верхней части находится поле ввода, где можно с компьютера отправлять данные в последовательный порт. В центре отображаются данные, полученные из последовательного порта. В нижней части окна — меню настроек. Монитор порта Arduino может работать с одним последовательным портом, чтобы не было ошибки при загрузке скетча и открытии Serial Monitor, необходимо выбрать COM порт на котором определилась плата Arduino UNO [2].

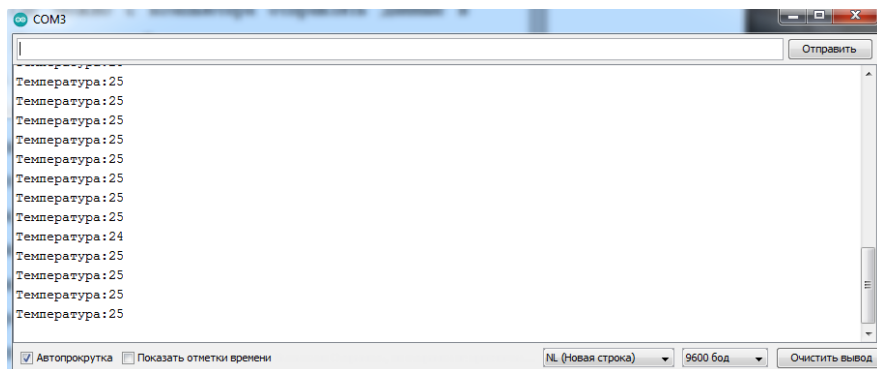
На рисунке 2 изображено собранное устройство, состоящее из платформы ARDUINO UNO с USB кабелем, 5 кнопок, 1 светодиода, соединённого через резистор в 10кОМ и датчика температуры.



*Рисунок 2 – Собранное устройство*

После запуска проекта с кодом, у меня в консоли начала высвечиваться информация, подаваемая с датчика температуры.

На рисунке 3 изображён монитор порта, показывающий данные с температурой воздуха в помещении.



*Рисунок 3 – Монитор порта с данными о температуре*

В данной разработке было показано, на что способен компьютер при подключённом к нему микроконтроллере, с небольшим количеством датчиков, данная разработка, показывает насколько гибкий механизм имеет микроконтроллер и сколько возможностей ещё может предоставить нам будущее.

### **Список литературы**

1. Саймон Монк. Программируем ARDUINO.2017. - 105 с.
2. Прага Стивен. Язык программирования C++. Лекции и упражнения. 2018. – 1244 с.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*



УДК 621.31

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eeb74876.09423136

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДОМ ШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА IGBT-ИНВЕРТОРА ДЛЯ ДВУХФАЗНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЫ

**Евгений Сергеевич Кинев**<sup>1</sup>, директор, доцент, к.т.н., Kinev\_ES@ontecom.com

**Алексей Андреевич Тяпин**<sup>2</sup>, аспирант, Mishinskaya\_AS@tamerlan-krk.ru

**Матвей Денисович Колодочкин**<sup>2</sup>, аспирант, matvyshakolodochkin@gmail.com

**Василий Иванович Пантелеев**<sup>2</sup>, зав. кафедрой электроэнергетики, д.т.н., профессор, pvi0808@rambler.ru

<sup>1</sup>ООО Тепловые электрические системы,

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

*Аннотация. Рассмотрены задачи моделирования в среде Matlab режимов МГД-перемешивателя расплава алюминия в печах с учетом цеховой распределительной сети. Отмечено, что работа частотных инверторов системы электропитания резко осложняет электромагнитную обстановку в сети ограниченной мощности. Предложено применить комплекс моделей для оценки возможности снижения искажения токов сети, путём модификации алгоритмов управления выпрямителем, при сохранении стабильности шины постоянного тока преобразователя частоты.*

*Ключевые слова: IGBT-инвертор, индукционная машина, тиристорный выпрямитель, шина постоянного тока, распределительная сеть, высшие гармоники, электромагнитная совместимость.*

### MODELING A DC BUS CHARGE CONTROL SYSTEM IGBT INVERTER FOR TWO PHASE LINEAR INDUCTION MACHINE

E. S. Kinev<sup>1</sup>, Director, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Krasnoyarsk, Russia, Kinev\_ES@ontecom.com

A. A. Tyapin<sup>2</sup>, Postgraduate Student, Mishinskaya\_AS@tamerlan-krk.ru

M. D. Kolodochkin<sup>2</sup>, Postgraduate Student, matvyshakolodochkin@gmail.com

V. I. Panteleev<sup>2</sup>, Head of the Department of Electric Power Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, pvi0808@rambler.ru

<sup>1</sup>Thermal Electrical Systems LLC, <sup>2</sup>Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk

*Abstract. The problems of modeling in the Matlab environment the modes of the MHD-stirring of aluminum melt in furnaces, taking into account the distribution network. It is noted that the operation of frequency inverters of the power supply system sharply complicates the electromagnetic environment in a network of limited power. It is proposed to apply a complex of models to assess the possibility of reducing the distortion of the network currents by modifying the rectifier control algorithms, while maintaining the stability of the DC bus of the frequency converter.*

*Keywords: IGBT inverter, induction machine, thyristor rectifier, DC bus, distribution network, harmonics, electromagnetic compatibility.*

Большинство промышленных печей для плавления алюминия оснащают МГД-машинами для бесконтактного перемешивания расплава [1]. Источником питания линейной индукционной машины служит IGBT-инвертор [2]. В зависимости от вида индукционной машины применяют двухфазные, трехфазные или многофазные частотные преобразователи на самом краю низкочастотного диапазона, при токах 300-400 ампер и напряжениях 0,4 кВ [3]. Режимы работы преобразователей частоты с металлургическими машинами отличаются от частотного электропривода [4]. Естественный коэффициент мощности индукционной машины с разомкнутым магнитопроводом крайне мал (0,05), а нагрузка в большинстве случаев резко несимметричная [5]. Указанные особенности наряду с генерацией ШИМ-инвертором несинусоидальных токов в распределительную сеть ограниченной мощности, крайне осложняют электромагнитную обстановку в металлургическом цеху [6].

Пример схемной модели для исследования характеристик 300 кВА инвертора для двухфазной индукционной машины, мощностью около 45 кВт, показан на рис. 1. Трехфазный источник питания в первоначальной версии модели (слева), показан упрощенно [7, 8]. Через трехфазный измерительный модуль сетевое напряжение поступает на управляемое вентильное звено, задающее режим на шине постоянного тока. Дроссель и конденсаторная батарея служат неперенными атрибутами в структуре частотного преобразователя [9]. Для имитации аварийных режимов в модели предусмотрено наличие транзисторного модуля, управляемого из блока 1.

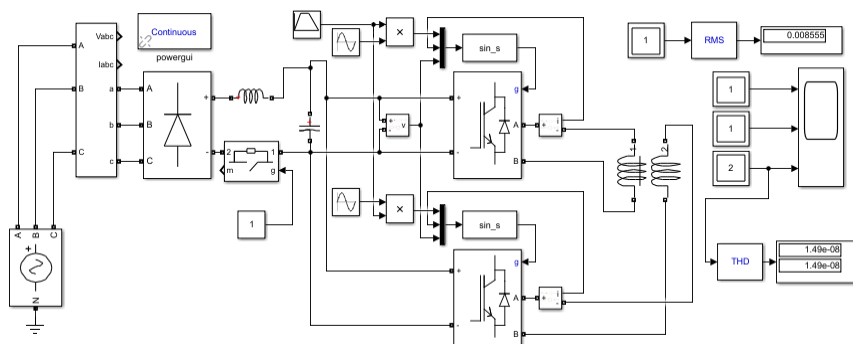


Рисунок 1 – Схемная модель индукционной машины с источником питания

Структура ШИМ-контроллера с IGBT-модулями и перекрестными связями отражена в центре схемной модели. К выходу силовых транзисторов подключены обмотки двухфазного индуктора, имеющие нелинейную магнитную связь через ферромагнитный сердечник [10]. Справа на рисунке показана компоновка измерительных блоков.

При построении комплекса моделей индукционных машин с ШИМ-инвертором в программном симуляторе Matlab, дополненным приложением Simulink, поставлена цель исследования и оптимизации режимов работы электроники, индукционного оборудования, а также режимов электропотребления [11, 12]. Сформулировано несколько задач, среди которых можно выделить наиболее важные. Сравнительный анализ эффективности двухфазных и трехфазных индукционных машин с одно- двух-уровневыми инверторами. Оценка генерации высших гармоник тока в распределительную сеть для разных алгоритмов контроллерного управления коммутацией вентилях выпрямителя. Анализ режимов входного управляемого выпрямителя при ускоренном заряде шины постоянного тока двухфазных и трехфазных инверторов. Анализ режимов выпрямителя и инвертора при резко несимметричной нагрузке. Анализ устойчивости узлов преобразователя в аварийных режимах. Для решения поставленных задач в программную среду интегрированы библиотеки Power System Blockset, Digital Signal Processing Blockset.

Для каждой задачи составлена программа численных экспериментов, результаты которых сопоставляются с результатами, получаемыми на физических моделях трехобмоточных и четырехзонных индукторов поперечного и продольного поля, установленных на лабораторном миксере, емкостью 150 кг алюминия в составе плавильно-литейного агрегата. Для оценки электромагнитной совместимости индукционного комплекса с источниками питания Веспер EI-7011 и PowerFlex 70 от Allen-Bradley и Rockwell Automation использовано программно-аппаратное оснащение METREL PowerView.

Первоочередной практический интерес представляет сравнение результатов исследования динамики входного выпрямителя при изменении характера и алгоритмов управления вентилями со стороны контроллера. Необходимо сопоставить влияние законов управления на стабильность шины постоянного тока (качество технологического режима), при максимально возможном снижении искажений сети. Дело в том, что эксплуатация нескольких ПЧ с металлургическими линейными машинами в цеховой распределительной сети, приводит к искажению токов свыше 50 %. Особенно существенно это при магистральной схеме подключения. Для алюминиевых кабельных линий такие токи чреваты увеличением искажения напряжений, значительно выше уровня 12-15 %, а также увеличением несимметрии свыше 14 % и импульсными помехами. Поэтому крайне актуальным представляется решение задачи снижения уровня высших гармоник, путём оптимизации режима коммутации вентилях и обеспечения электромагнитной совместимости. При невозможности снижения искажений применение МГД-перемешивателей на плавильные печи без реконструкции системы электроснабжения окажется невозможным.

## Список литературы

1. Kinev E. S., Tyapin A. A., Panteleev V. I., Litovchenko A. V., Efimov S. N. and Molokov V. V. Energy and thrust characteristics of MHD inductors for stirring liquid aluminum. Camstech\_2021, AIP - Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2021.
2. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Инверторное электропитание металлургических линейных индукционных МГД-машин. В книге: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. 18–19 марта 2020. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – Т. 2. – с. 135-143.
3. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Система электропитания МГД-перемешивателей расплава алюминия с IGBT-инверторами // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. IV Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 190-195. DOI: 10.51932/9785907271739\_190
4. Tyapin A. A., Kinev E. S. Fundamentals of PWM Inverter Control Strategy of Linear Metallurgical MHD Machine. The scientific heritage. Budapest, 2020. No 51-1, Vol. 1. pp. 63-67. ISSN 9215-0365.
5. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Выбор схемы инвертора для линейной металлургической МГД-машины. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 3, 2020. с. 23-29. ISSN: 2074-9635.
6. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Постановка задачи анализа электромагнитной совместимости МГД-перемешивателей расплава алюминия. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 8, 2021. с. 41-49. ISSN: 2074-9635.
7. Shaffer R. Fundamentals of Power Electronics with MATLAB. Charles River Media, Boston, Massachusetts. USA, 2007, 401 p. ISBN: 1-58450-852-3.
8. Tyapin Aleksey, Panteleev Vasilii and Kinev Evgeny. Mathematical models of non-sinusoidal power supply of a three-phase transverse field MHD inductor. E3S Web of Conferences. International scientific forum on computer and energy Sciences (WFCES 2021) May 20-21. Volume 270. Almaty, Kazakhstan, A.D. Nazarov (Ed.) p.13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127001024>
9. Тяпин А. А., Кинев Е. С. IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 96-102. DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422.
10. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Двухфазная линейная индукционная МГД-машина трехзонной конструкции. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 7, 2019. с. 38-48. ISSN: 2074-9635.
11. Williams B. W. Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components. Glasgow. United Kingdom, 2006, 1432 p. ISBN: 978-0-9553384-0-3.
12. The Industrial Electronics Handbook. Power electronics and motor drives. B. M. Wilamowski and J. D. Irwin edition. Taylor and Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York. USA, 2011, 974 p.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 004.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eec0d464.55997092

## ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ЖИВОТНЫХ В ВЕТЕРИНАРНОЙ КЛИНИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

*Диляра Ниязовна Сафина*, студент, dilyara.safina.20@mail.ru

*Артур Рамилевич Зарипов*, студент, artur.zar@icloud.com

*Гулшат Ильдусовна Гаптуллазянова*, старший преподаватель

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. Проведено исследование программного комплекса для контроля за состоянием животных. Составлен алгоритм работы системы по контролю за состоянием животных. особое внимание уделено способам взаимодействия модулей с платформой Arduino.*

*Ключевые слова: Arduino Nano, Arduino Uno, AVR.*

### STUDY OF ANIMAL CONTROL SYSTEM IN A VETERINARY CLINIC USING THE ARDUINO PLATFORM

Dilyara N. Safina, student, dilyara.safina.20@mail.ru

Artur R. Zaripov, student, artur.zar@icloud.com

Gulshat I. Gaptullazyanova, senior lecturer

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Russia, Kazan

*Abstract. A study of a software package for monitoring the state of animals has been carried out. An algorithm for the operation of the system for monitoring the state of animals has been compiled. special attention is paid to the way the modules interact with the Arduino platform.*

*Keywords: Arduino Nano, Arduino Uno, AVR.*

Проблема контроля за состоянием животных после операции в ветеринарной клинике является очень актуальной в настоящее время, т.к. правильная диагностика состояния животных после операции в значительной мере определяет дальнейшую судьбу животного, которое для многих семей является очень дорогим, фактически – членом семьи.

Рассматриваемая проблема в значительной мере касается вопросов проведения измерений физических параметров. Данные измерения проводятся с помощью различных датчиков, например, датчиков температуры, пульса и давления. Сигнал с датчиков в оцифрованном виде подаётся на входы микроконтроллерного или микропроцессорного устройства, подвергается обработке и выводится на устройство вывода - дисплей.

В данной работе система контроля за состоянием животных должна быть оснащена датчиком температуры, что позволит отслеживать как недопустимое и критичное для здоровья снижение, так и повышение температуры

животного. Именно температура животного в послеоперационный период отражает в значительной мере состояние животного.

В настоящее время имеется значительное количество различных систем мониторинга животных в послеоперационный период. Однако, цена на большинство таких комплексов настолько высока, что многие клиники просто не в состоянии позволить себе приобретение такого оборудования.

Именно поэтому данная работа является особенно актуальной и перспективной в плане дальнейших исследований и доработок.

Практическая значимость работы состоит в возможности использовать разработанную систему в качестве альтернативы к имеющимся на рынке системам мониторинга послеоперационного состояния животных.

С использованием платформы Arduino измерение большинства физических величин выполняется достаточно просто, т.к. разработано множество соответствующих датчиков, которые подключаются к плате Arduino и работают с использованием специальных библиотек производителей датчиков [1].

Большинство программных проектов Arduino может с успехом быть выполнено как на плате Arduino Uno, так и на плате Arduino Nano, т.к. по функционалу обе эти платы очень похожи [1]. Сходство, в первую очередь, обусловлено использованием одинакового микроконтроллера.

Плата Ардуино Nano спроектирована на базе микроконтроллера ATmega328. Маленькие габариты платы делают её наиболее предпочтительной для работы в готовых устройствах, в которых главным приоритетом выступают небольшие габариты готового изделия.

Разработка макетных и тестовых операций очень неудобна на данной плате из-за её очень маленьких размеров. Плата примерно в 3 раза меньше платы Arduino Uno. Часто профессиональная разработка на платформе Arduino начинается на большой плате Arduino Uno, а далее устройство адаптируется для работы с маленькой платой Arduino Nano, которая далее просто монтируется в устройстве и с помощью монтажных проводов соединяется с исполнительными устройствами.

На сегодняшний день разработка устройств на основе микроконтроллеров является более перспективной по сравнению с разработкой на дискретных логических элементах низкой, средней и даже высокой степени интеграции. Причём для этого есть несколько причин: низкая себестоимость, надёжность устройства, возможность практически моментальной настройки, отсутствие множества компонентов на печатной плате.

Все существующие на сегодняшний день микроконтроллеры базируются на разных архитектурах и подразделяются на 8, 16 и 32 – разрядные. Разрядность микроконтроллера характеризует объём данных, пересылаемых как целое по внутренней шине данных. Из всех микроконтроллеров наиболее частое применение на сегодняшний день находят восьми разрядные микроконтроллеры, аппаратные и программные возможности которых достаточны для написания большинства приложений.

Наибольшее распространение в мире получили микроконтроллеры 4 наиболее известных архитектур: AVR, 8051, PIC и ARM – микроконтроллеры. При этом исторически первыми микроконтроллерами являлись микроконтроллеры архитектуры 8051. При этом и по сегодняшний день в мире существует огромная конкуренция среди производителей всех этих 4 архитектур [2].

Для разработки устройств на платформе Arduino применяется специализированная среда разработки – Arduino IDE. Интегрированная среда разработки (IDE) распространяется бесплатно и адаптирована для разработки устройств на базе платформы Arduino. Среда поддерживает интерфейс со всеми имеющимися на рынке платами стандарта Arduino.

Как и любая интегрированная среда разработки, данная среда имеет широкий спектр сервисных возможностей для проектирования, разработки, отладки и тестирования устройств на базе платформы Arduino. Например, в среде имеется встроенный текстовый редактор с возможностью подсветки ключевых слов языков C/C++ [2]. Синтаксический анализатор безошибочно подсвечивает типичные и необходимые для информирования разработчика различные синтаксические конструкции языка и программы. Также имеются окна отладки программы и вывода различных сообщений о ходе компиляции скетча и результатах выполнения программы. Возможность отладки программы в среде Arduino чрезвычайно проста и под силу даже начинающим разработчикам. Имеется также масштабное меню и кнопки на панели инструментов.

С помощью USB – соединения происходит загрузка скетча в разрабатываемое устройство. При этом необходимо выбрать тип целевой платы и назначенные устройству COM – порты.

Алгоритм работы системы основан на циклическом измерении физического параметра – температуры. До начала работы системы необходимо задать категорию животного, т.к. нормальная температура для различных категорий животных различна.

После старта системы на экране отображается начальная заставка с информацией о программе.

Задание категории животного осуществляется по нажатию на кнопку энкодера. При этом на экране отображаются 4 категории с характерными температурами. В эти 4 категории входят:

1. Кошки и коты 37,5-39,0
2. Собаки МП 38,6-39,3
3. Собаки СП 37,3-39,2
4. Собаки КП 37,9-39,2

Выбор категории животных осуществляется поворотом ручки энкодера. При этом на экране всегда отображаются лишь 2 категории – текущая и соседняя. При повороте ручки текущая категория изменяется, и список прокручивается. Текущая категория выделяется отображением символа '>' в начальной позиции строки.

Граничные температуры заложены в программу в качестве параметров 4 категорий животных.

В первой строке в рабочем режиме отображается информация о выбранной категории животных.

После задания категории животных система переходит в рабочий режим и циклически измеряет температуру и выводит информацию, в каком диапазоне находится температура: понижена, повышена или нормальная.

При выходе температуры за границы допустимого диапазона загораются сигнальные светодиоды: при пониженной температуре – синий, при повышенной – красный и раздаётся звуковой сигнал. Эта информация для обслуживающего персонала клиники о том, что нужно принимать меры для стабилизации температуры животного.

Провелось комплексное исследование по изучению программно-аппаратного комплекса для контроля за состоянием животных после операции в ветеринарной клинике с использованием платформы Arduino. Для решения поставленной задачи было проведено исследование методов измерения физических параметров. При этом особое внимание уделено способам взаимодействия модулей с платформой Arduino и рабочим диапазонам измерений. В ходе исследования модулей сопряжения Arduino установлено, что измерение большинства физических параметров является достаточно стандартной и хорошо описанной в литературе задачей и выполняется с использованием библиотек производителей модулей сопряжения. В концептуальном контексте ценность данной работы заключается в возможности универсального применения разработанного устройства для работы практически в любой ветеринарной клинике.

#### **Список литературы**

1. Белов, А.В. Программирование микроконтроллеров для начинающих и не только / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 352 с.

2. Белов, А.В. Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 544 с.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*



УДК 004.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eec9c9f0.59172550

## РЕАЛИЗАЦИЯ СЕКРЕТНОГО ЗАМКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

**Диляра Ниязовна Сафина**, студент, dilyara.safina.20@mail.ru

**Артур Рамилевич Зарипов**, студент, artur.zar@icloud.com

**Гульшат Ильдусовна Гаптуллязанова**, старший преподаватель

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А. Н. Туполева - КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. Приведен термин электронного замка. Разобрано устройство электронного замка. Созданы макет и система электронного замка. Проведена проверка работы системы.*

*Ключевые слова: электронный замок, Arduino, шифр.*

### IMPLEMENTATION OF A SECRET LOCK USING THE ARDUINO PLATFORM

Dilyara N. Safina, student, dilyara.safina.20@mail.ru

Artur R. Zarirov, student, artur.zar@icloud.com

Gulshat I. Gaptullazyanova, senior lecturer

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Russia, Kazan

*Abstract. The term of an electronic lock is given. Disassembled electronic lock device. A layout and an electronic lock system have been created. The system was checked.*

*Keywords: electronic lock, Arduino, cipher.*

Самой важной характеристикой замка является его сложность вскрытия. В этом плане электронный замок является лидером.

Электронный замок - это устройство, в котором кодовая комбинация хранится в памяти электронного блока и вводится обычно с клавиатуры. Электронные замки намного безопаснее, надежнее и поддерживают много дополнительных функций, которые невозможны для механических замков [1].

В рамках данной работы предполагается разработать, создать и отладить небольшую действующую модель устройства контроля доступа на микроконтроллерном управлении. Такая модель позволит практически продемонстрировать работу секретного замка и сопутствующих ему элементов.

Устройство электронного замка состоит из четырех частей:

1. Запирающий механизм
2. Считыватель кода или пульт управления.
3. Блок управления.
4. Источник бесперебойного питания (ИБП) [1].

Выбор модели

Arduino — это небольшая плата со своей памятью и процессором. Arduino позволяет компьютеру выйти за рамки виртуального мира в физический и взаимодействовать с ним. Устройства на базе Arduino могут получать информацию об окружающей среде посредством различных датчиков, а также могут управлять различными исполнительными устройствами [2].

Выбор дополнительных компонентов

Система будет состоять из следующих элементов:

1. Arduino Uno – самая популярная версия базовой платформы Arduino USB [2].

2. Блоком питания будет служить портативное зарядное устройство Xiaomi Mi PowerBank 3 2 USB 10000 mAh (Silver). Также можно использовать и 230V.

3. За распознавание шифра будут отвечать: датчик звука, а также сенсорная кнопка.

4. За раскрытие петель двери будет отвечать сервопривод.

5. За безопасность всей системы будет отвечать щеколда, оборудованная сервоприводом.

6. Светодиод

Создание макета

Для начала необходимо создать макет разрабатываемого устройства, чтобы иметь представление о том, как оно будет выглядеть. Для того, чтобы построить этот макет, мы воспользуемся услугой онлайн приложения Circuito.io.

Таким образом, по итогу работы в данной программе имеется макет устройства.

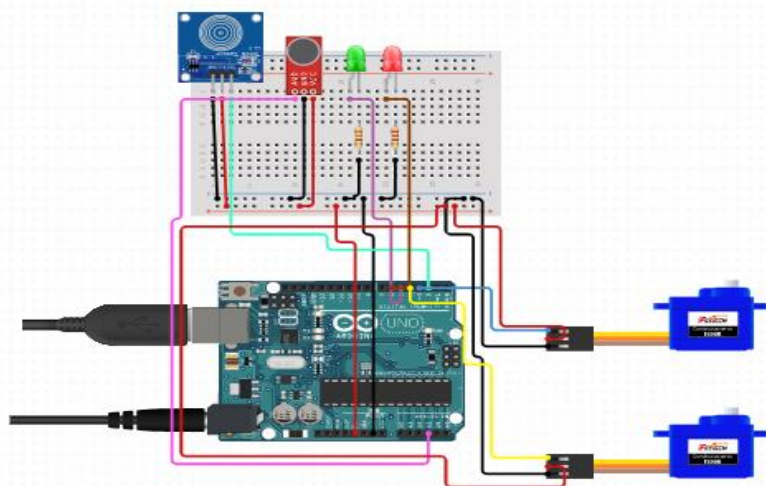


Рисунок 1– Макет устройства

## Изготовление системы

Для подключения различных модулей к микроконтроллеру Arduino существуют специальные макетные платы. На таких макетных платах удобно располагать различные элементы схемы, а также соединять их проводами между собой и микроконтроллером. В конечном итоге, получилась схема, представленная на рисунке 2.

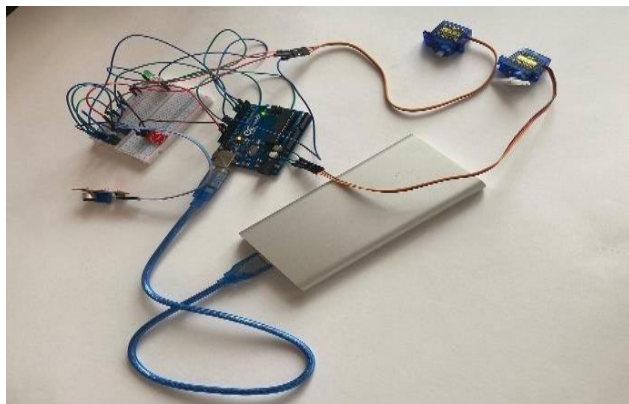


Рисунок 2 – Схема в сборе

## Отладка программной части устройства

Для работы сервопривода в разрабатываемом устройстве необходима библиотека `Servo`, которая предоставляет набор функций для управления сервоприводами.

Затем следует функция `void setup()`. Загрузив программу, Arduino позволяет коду принять участие в инициализации системы. Для этого нужно указать микроконтроллеру те команды, которые он выполнит в момент своей загрузки и потом забудет про них, то есть эти команды выполняются только один раз во время старта системы.

После функции `void setup()` идет функция `void loop()`. Функция `loop` это то место, куда нужно поместить команды, которые будут выполняться все то время, пока плата Arduino включена. Микроконтроллер начнет выполнение первой команды, дойдет до конца и сразу перепрыгнет в начало для того, чтобы повторить ту же последовательность. И так будет происходить бесконечное число раз до тех пор, пока на плату поступает электричество.

## Проверка работы системы

Теперь следует проверить этапы работы устройства контроля доступа.

### *Этап 1: Запись шифра*

При подключении системы к питанию загорается лампочка, и запускается функция записи секретной комбинации.

В данном проекте шифром будет являться код из 5 стуков. Записанный код является актуальным до тех пор, пока систему будет подпитывать постоянный ток.

### *Этап 2: Работа шифра*

Записанный код работает следующим образом.

Все стук и нажатия обрабатываются как прерывания, поэтому точность записи и распознавания очень высокая. Первый стук выводит систему из режима ожидания, последующие же являются основным кодовым шифром. С выводом системы из режима ожидания, система начинает считывать секретный шифр, сравнивая время между ударами или нажатиями. И тут возможны два варианта, слишком быстро или слишком медленно, в любом случае попытка будет провалена. Так как чтобы открыть замок, нужно полностью попасть в тональность шифра.

### *Этап 3: Правильность ввода шифра*

При вводе верного шифра задвижка раздвигается, и с помощью сервопривода распахивается дверь. Загорается лампочка зелёного цвета. Для того чтобы закрыть дверь, нужно нажать на сенсорную кнопку, и дверь автоматически закроется, и уйдет в режим ожидания.

При вводе неверного шифра, загорается красная лампочка. При пятикратном неверном вводе правильного шифра: загорается красная лампочка, и устройство становится недоступным на короткий промежуток времени.

### *Этап 4:*

В случае если пользователь забудет пароль, внедрена функция напоминания. Для активации этой функции нужно 10 секунд продержаться сенсорную кнопку, после чего с помощью диода будет показан кодовый шифр.

### **Заключение**

В данной работе была осуществлена разработка небольшой действующей модели устройства на микроконтроллерном управлении. В рамках работы были рассмотрены основные принципы разработки и создания системы, позволяющей контролировать доступ к местам хранения важных повседневных вещей.

Исходя из экономических и эксплуатационных соображений, для данного устройства был выбран микроконтроллер Arduino UNO [2]. Такая модель позволит практически продемонстрировать работу секретного замка и сопутствующих ему элементов. Особенностью данного замка является его скрытность. Далее, с использованием выбранных устройств была построена функциональная схема. Разработка завершилась составлением блок-схемы алгоритма и написанием исходного кода программы для микроконтроллера.

### **Список литературы**

1. Электронный кодовый замок. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.meanders.ru/kodovij\\_zamok.shtml](http://www.meanders.ru/kodovij_zamok.shtml) (дата обращения: 7.05.2017).
2. Arduino UNO R3: схема, инструкция. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.syl.ru/article/203717/new\\_arduino-uno-r-shema-instruktsiya](https://www.syl.ru/article/203717/new_arduino-uno-r-shema-instruktsiya) (дата обращения: 6.04.2017).

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КРАНА С ДЕМПФИРОВАНИЕМ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

**Вячеслав Алексеевич Хвостов**, декан, доцент, к.т.н., vjachkhv@yandex.ru

**Жуашиим Киендо Кумбу**, магистрант, joachimkhiendokumbu@gmail.com

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

*Аннотация.* В статье исследуется возможность построения системы управления электроприводом механизма передвижения крана с демпфированием колебаний груза. Предлагаемая система включает в себя адаптивный модуль, который с помощью образцовой модели обеспечивает по сигналам рассогласования коррекцию управления при изменениях массы груза и длины подвеса.

*Ключевые слова:* адаптивный регулятор, механизм передвижения крана, демпфирование колебаний груза.

### SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRIC DRIVE WITH A PRONOUNCED NONLINEARITY OF THE WORKING ELEMENT CHARACTERISTIC

Viacheslav A. Khvostov, dean, docent, candidate of technical sciences, vjachkhv@yandex.ru

Joachim Khiendo Kumbu, Master's student, joachimkhiendokumbu@gmail.com)

Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk

*Abstract.* The article explores the possibility of constructing an electric drive control system for the crane movement mechanism with damping of load vibrations. The proposed system includes an adaptive module, which, with the help of an exemplary model, provides control correction based on misalignment signals with changes in the weight of the load and the length of the suspension.

*Keywords:* adaptive regulator, crane movement mechanism, load vibration damping.

Среди механизмов, участвующих в процессе производства промышленной продукции, огромная роль отводится подъемно-транспортным машинам. При переходных процессах пуска и торможения, возникает раскачивание груза относительно своего положения равновесия. Амплитуда и период колебаний груза зависят от изменения длины подвеса и веса транспортируемого груза. Эти колебания необходимо исключить.

Механическая часть передвижения груза описывается системой уравнений

$$\begin{cases} M - M_{CT} - M_{12} = J_1 \frac{dw_1}{dt} \\ M_{12} = J_2 \frac{dw_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = \frac{J_2 g}{l} (w_1 - w_2) \end{cases}$$

где  $J_1 = m_1 \rho^2, J_2 = m_2 \rho^2, \rho = V/w$ .

Примем для определенности  $M_{CT} = 0, \rho = 0.025$ , вес крана  $m_1 = 48$  т, вес грузам  $m_2 = 16$  т. Тогда моменты инерции  $J_1 = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_2 = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Длину подвеса примем равной 10 метрам. Тогда жесткость  $p = \frac{J_2 g}{l} = 3$ .

Дополним систему дифференциальных уравнений, описывающих механическую часть, алгебраическими уравнением для момента двигателя.

Сигнал управления сформируем в виде суммы, состоящей из сигналов задания  $u^0$ , отрицательной обратной связи  $u_l$  и коррекции  $u_a$ .

В итоге получим систему уравнений, описывающих динамику систему электропривода механизма передвижения крана.

$$\begin{cases} \omega_1 \dot{=} -J_2^{-1} m_y + J_1^{-1} M_m; & m_y = p(\omega_1 - \omega_2); & \omega_2 \dot{=} J_2^{-1} m_y; \\ M_m = R_\alpha^{-1} k_m (k_y u_c - k_e \omega_1); & u_c = (u_\Sigma - k_c \omega_1) \beta_c; \\ u_\Sigma = u^0 + u_l + u_a. \end{cases}$$

В результате подстановки принятых для крана исходных данных, был рассчитан набор коэффициентов обратной связи по трем переменным состояния для обеспечения модального управления с распределением корней по Баттерворту. После расчета коэффициентов обратной связи выполнено моделирование синтезированной системы с помощью программного комплекса Matlab.

На рис.1 показаны результаты моделирования перемещения груза по заданию в виде трапеции.

Система обрабатывает это задание с помощью упругого момента  $M_y$  с постоянным значением на участках пуска и торможения и нулевым значением на участке с равномерным движением. Отклонение груза от вертикали в некотором масштабе соответствует изменению упругого момента.

Полученное модальное управление, может быть реализовано только с помощью непосредственного измерения переменных  $\omega_2, m_y$  и  $\omega_1$ , а так как переменные  $\omega_2$  и  $m_y$  недоступны измерению с помощью датчиков, то для его осуществления необходимо использовать асимптотические оценки этих переменных, вырабатываемые наблюдателем.

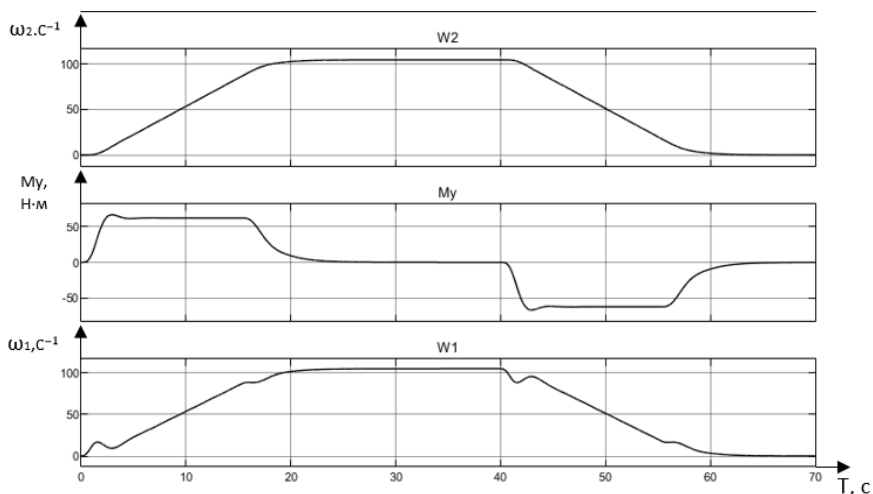


Рисунок 1 – Результат моделирования движения крана при модальном управлении

Идентификатор (наблюдатель) по измерению скорости  $\omega_1$  расчетного объекта имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\omega}}_2 &= a_1 m_y + l_1 c \hat{\varepsilon}_\omega; \\ \dot{\hat{m}}_y &= a_2 (\hat{\omega}_1 - \hat{\omega}_2) + l_2 c \hat{\varepsilon}_\omega; \\ \dot{\hat{\omega}}_1 &= a_3 \hat{m}_y + a_4 \hat{\omega}_1 + l_3 c \hat{\varepsilon}_\omega + b u_\Sigma;\end{aligned}$$

где  $\hat{\omega}_1; \hat{m}_y; \hat{\omega}_2$  – оценки переменных состояния объекта ;  $\hat{\varepsilon}_\omega = \omega_1 - \hat{\omega}_1$  ошибка наблюдения;  $(l_1; l_2; l_3)^T$  – вектор коэффициентов обратных связей наблюдателя по ошибке наблюдения  $\hat{\varepsilon}_\omega$ , ( $c = kc$ ).

Расчет коэффициентов обратных связей  $l_1; l_2; l_3$  производится также как расчет коэффициентов модального управления с учетом необходимости иметь быстродействие наблюдателя, как минимум, на порядок выше.

Моделирование системы с наблюдателем показало результаты, идентичные показанным ранее на рис.1, что говорит о возможности управления движением только по датчику скорости на первой массе.

Если при управлении движением изменить длину подвеса и массу груза, то данная система будет давать отклонения от оптимального движения. Для того, чтобы система автоматически корректировала управление при изменениях длины подвеса и массы груза, в нее вводится блок адаптации.

Адаптивная система, рассчитываемая и исследуемая в данной работе, основана на алгоритме адаптации с эталонной моделью. В качестве эталонной модели используется модель системы с распределением корней, которое использовалось при расчете коэффициентов модельного управления.

В качестве объекта управления используется модель с изменяющимися длиной подвеса и массой перемещаемого груза.

Цель управления – совпадение динамики объекта управления  $x(t)$  с динамикой эталонной модели  $x_M(t)$ , то есть  $e(t) = x(t) - x_M(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , где  $e(t)$  – вектор ошибки.

Структуры электромеханического объекта и эталонной модели должны быть согласованы, то есть  $A - A_M = BK_A$ ,  $B - B_M = BK_B$ .

Алгоритм адаптации сигнального типа, который применяется для стационарных систем, имеет вид

$$u_a(t) = -\gamma \cdot \text{sign}[B^T P \cdot e(t)],$$

где  $\gamma$  – коэффициент усиления.

Симметричная положительно определенная матрица  $P$  находится как решение матричного уравнения А. М. Ляпунова для матрицы  $A_M$  эталонной модели  $A_M^T P + A_M P^T = -Q$ , где  $Q = Q^T > 0$  – заданная симметричная положительно определенная матрица.

В результате расчета матрицы  $P$  и подбора коэффициента усиления получили систему, которая автоматически корректирует управляющее воздействие, компенсируя возникшие рассогласования в динамике объекта и эталонной модели. На рис.2 приведены результаты моделирования движения груза с массой  $2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$  и подвесе  $30 \text{ м}$  при наличии и отсутствии блока адаптации. Приведенный результат показывает, что адаптация по эталонной модели движения груза по заданной траектории может совершаться без колебаний груза в достаточно большом диапазоне отклонений как по длине подвеса, так и по массе груза.

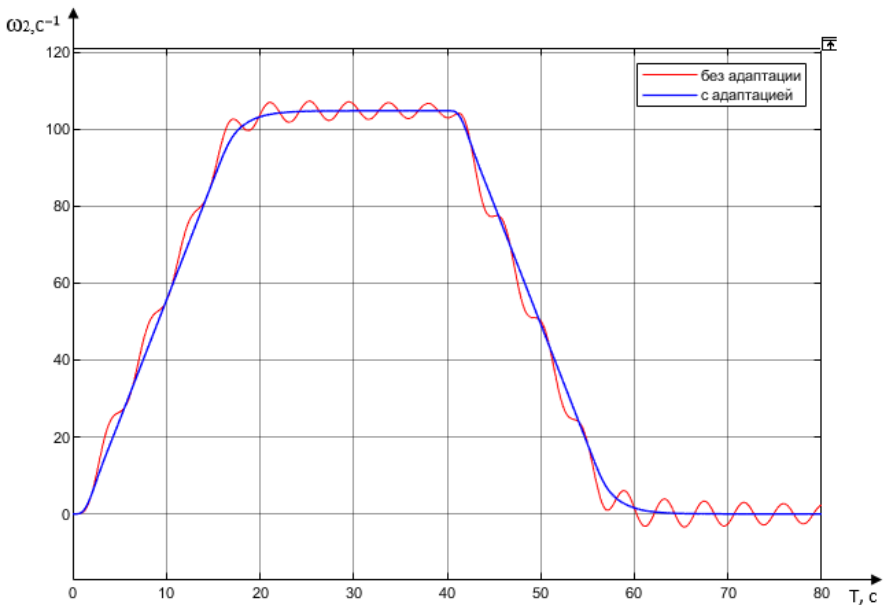


Рисунок 2 – Результат моделирования движения груза без и с блоком адаптации

Материал принят к публикации 16.10.21.



УДК 621.314

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eedee2b5.94208123

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАСКАДНЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

**Андрей Александрович Чепига**, аспирант, andreychepiga@yandex.ua

**Алексей Сергеевич Анучин**, д.т.н., профессор, зав. каф. АЭП

НИУ «МЭИ», Россия, Москва

*Аннотация.* Топология высоковольтного преобразователя напряжения с низковольтными ячейками имеет широкое применение. Однако существующие алгоритмы ШИМ для данной топологии преобразователя имеют недостатки: временная задержка, которая ограничивает быстродействие контура тока, необходимость повторной инициализации несущих сигналов ШИМ в случае отказа ячейки и неравномерное распределение потерь. Для решения данных проблем рассмотрен алгоритм ШИМ, при котором одна ячейка работает с заданием ШИМ и последующим переключением ячеек. Разработанный алгоритм ШИМ может работать в случае частичного отказа инвертора, обеспечивает максимально возможное напряжение на нагрузке и имеет высокое быстродействие.

*Ключевые слова:* высоковольтный преобразователь частоты, многоуровневый инвертор; широтно-импульсная модуляция, низковольтная ячейка.

### DESIGN OF UNIVERSAL CONTROL SYSTEM FOR H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER

Andrey A. Chepiga, aspirant, andreychepiga@yandex.ua

Alexey S. Anuchin, Doctor of Technical Sciences, Professor

NRU "MPEI", Russia, Moscow

*Abstract.* The medium voltage frequency converters mostly utilize the low-voltage multi-cell topology. However, available PWM techniques have some drawbacks, such as time delayed operation, which limits current loop response time, need reinitialization of the PWM carriers in case of cell failure, or have unequal distribution of losses. To solve the set of these problems the PWM strategy, which utilize PWM in a single cell with sequential cell switching, was introduced. This PWM strategy can operate in case of partial inverter failures, provides maximum available voltage to the load and has low response time due to operation at high PWM frequency of a single cell, while the average switching frequency is limited. The proposed PWM technique was examined using a model, where the switching losses distribution and high quality of the output voltage were confirmed.

*Keywords:* medium voltage frequency converter, multi-level inverter, pulse-width modulation, low-voltage cell.

Появление многоуровневых каскадных инверторов позволило решить множество проблем, связанных с классическим двухуровневым автономным инвертором [1]:

— снижение величины напряжения на управляемых электронных ключах за счёт их последовательного соединения; как следствие улучшение

динамических характеристик силовых ключей и увеличение КПД преобразования энергии;

— увеличение напряжения и мощности путем увеличения количества последовательно включённых силовых ключей либо структурных узлов на их основе, не требующих дорогостоящих элементов;

— снижение искажений синусоидальности выходного напряжения преобразователя и входного тока питающей сети;

— снижение потерь мощности в силовых управляемых ключах.

Однако, до сих пор для данного типа преобразователей остается нерешенной проблема реализации метода ШИМ, который позволит равномерно распределять коммутационные потери, иметь низкое время обработки и сможет адаптироваться к отказу любой ячейки без влияния на качество выходного напряжения [2].

Каскадный многоуровневый преобразователь состоит из последовательно соединенных низковольтных ячеек. Функциональная схема исследуемого преобразователя показана на рис. 1 и включает в себя трансформатор, активный выпрямитель, звено постоянного тока и источник напряжения топологии Н-мост для каждой фазы. [3]

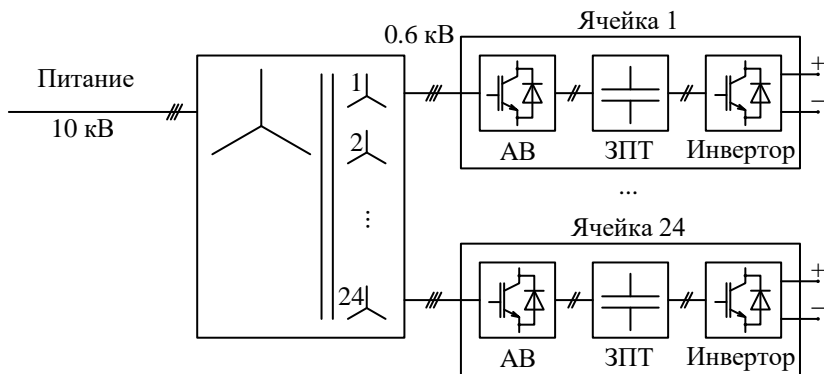


Рисунок 1 – Функциональная схема каскадного многоуровневого преобразователя частоты

В данной работе был разработан новый алгоритм ШИМ многоуровневым инвертором с минимизацией коммутационных потерь, структура которой представлена на рис. 2. Предложен алгоритм распределения коммутаций по ячейкам. Проведены комплексные исследования и получены результаты модельных и макетных испытаний 17-уровневого каскадного преобразователя при формировании ШИМ по разработанной методике.

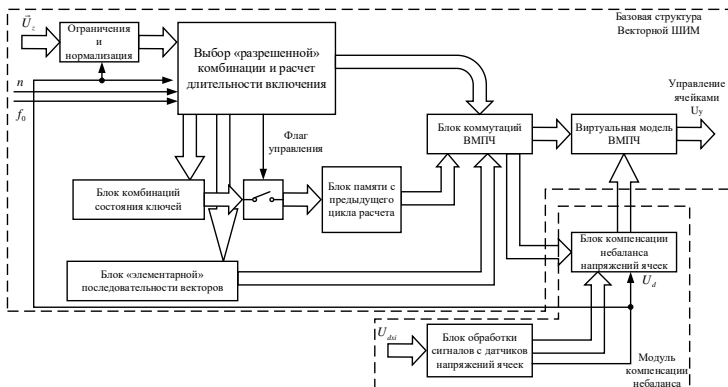


Рисунок 2 – Структурная схема векторной ШИМ с модулем компенсации небаланса напряжений ячеек

Имитационная модель была реализована в среде MATLAB *Simulink* с использованием *SimPowerSystem* для моделирования электрических компонентов, таких как транзисторы, диоды, трансформаторы и электрические машины. Модель включает в себя трехфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами, номинальной мощностью 8 МВт и номинальной частотой вращения, равной 3000 об/мин. Двигатель питается от преобразователя, состоящего из 8 низковольтных ячеек в каждой фазе. Номинальный установившийся режим работы преобразователя моделировался при векторном регулировании, частота вращения ротора составляла 3000 об/мин, момент нагрузки составлял  $2,54 \cdot 10^4$  Н·м.

На рис. 3 показаны выходные напряжения и коммутационные потери для каждой ячейки фазы А. Линейные напряжения и фазные токи двигателя, показанные на рис. 4, имеют синусоидальную форму.

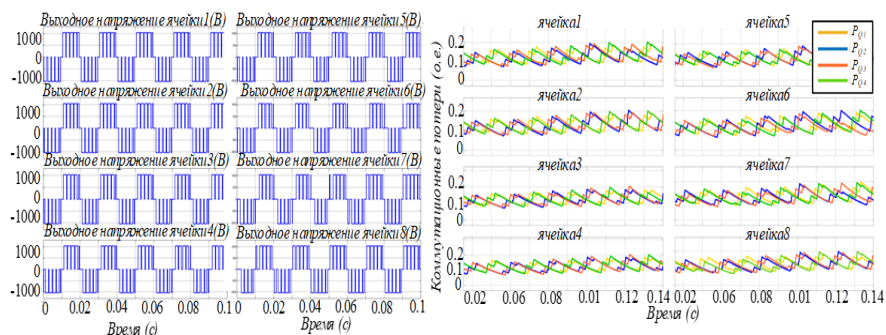


Рисунок 3 – Выходное напряжение и коммутационные потери для каждой ячейки фазы А

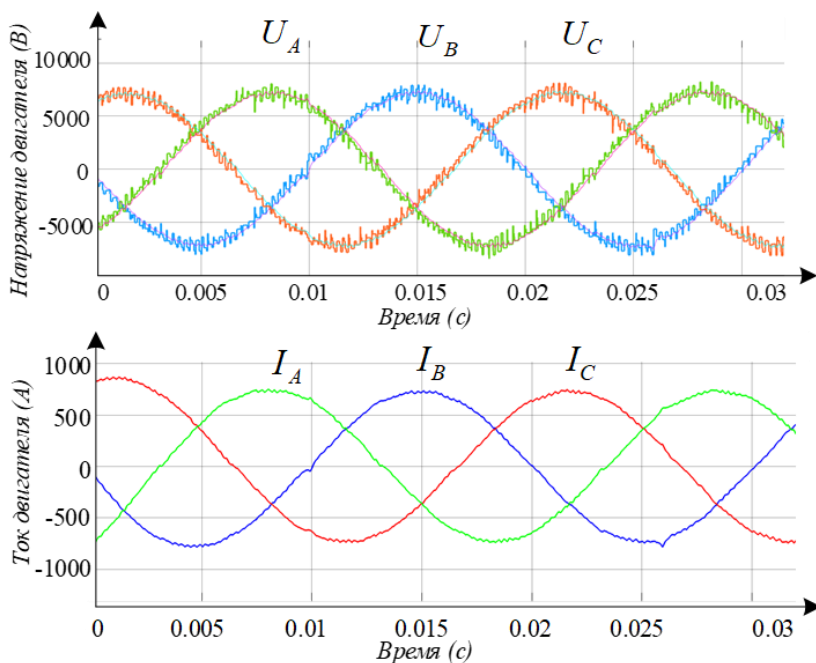


Рисунок 4 – Напряжение и ток двигателя

Разработанный алгоритм формирования ШИМ каскадного преобразователя обеспечивает снижение коммутационных потерь в сравнении с алгоритмами традиционной синусоидальной ШИМ за счет минимизации числа переключений силовых ключей, а также адаптацию к изменению числа уровней и колебаниям напряжений в звене ячеек.

#### Список литературы

1. *Gupta K. Carrier based PWM for even power distribution in cascaded H-bridge multilevel inverters within single power cycle / K. K. Gupta, P. Bhatnagar, H. Vahedi and K. Al-Haddad // IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence. - 2016. - Pp. 6470 - 6475, DOI: 10.1109/IECON.2016.7793061.*
2. *Gupta K. A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters, Including Operation in Overmodulation Range / K. Gupta and A. M. Khambadkone // In IEEE Transactions on Power Electronics. March 2007 - Vol. 22 - No. 2 - Pp. 517 - 526, DOI: 10.1109/TPEL.2006.889937.*
3. *M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez and M. A. Pérez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2197–2206, July 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2030767.*

Материал принят к публикации 12.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997eee93d06.85734365

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Николай Валентинович Чуприна**

Брянский государственный технический университет, аспирант  
Российская Федерация, Брянск, nikochuprina212@yandex.ru

*Аннотация. Проведен краткий обзор электроприводов переменного тока, применяемых в промышленности и на транспорте. Приведены результаты сравнения систем управления автономным инвертором напряжения, входящим в электропривод с асинхронным или синхронным двигателем.*

*Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, модуляция, тяговый электропривод, асинхронный двигатель, синхронный двигатель.*

### COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR A VOLTAGE SOURCE INVERTERS FOR AC DRIVES

Nikolay V. Chuprina

Bryansk State Technical University, graduate student, Russian Federation, Bryansk  
nikochuprina212@yandex.ru

*Abstract. The brief survey of electric drives implicated in both industry and transport are carried out. The results of comparison of control systems of a voltage source inverters included in an electric drive system with an asynchronous or synchronous motor are presented. The results were obtained by means of Matlab.*

*Keywords: voltage source inverter, modulation, traction electric drive, asynchronous motor, synchronous motor.*

Автономные инверторы напряжения (АИН) активно применяются в электроприводах переменного тока, в частности и в тяговых электроприводах. Например, в тепловозе 2ТЭ25А, имеющем в качестве приводных двигателей асинхронные машины, для управления двигателями применяются преобразователи частоты, состоящие из неуправляемого выпрямителя, звена постоянного тока и автономного инвертора напряжения.

Автономный инвертор напряжения отличается от автономного инвертора тока и автономного резонансного инвертора тем, что электроэнергия на ключи поступает от источника напряжения, а не от источника тока (т.е. отсутствует реактор). В реальных системах источники напряжения, от которых АИН получает питание, имеют индуктивность (кроме аккумуляторных батарей). С целью исключения влияния индуктивности на электромагнитные процессы в АИН на входе используется емкостной фильтр. С помощью емкостного фильтра входные импульсы тока инвертора замыкаются, исключая входной источник напряжения.

В электроприводах переменного тока для управления трехфазными асинхронным и синхронными двигателями наибольшее распространение получили трехфазные АИН, выполненные по мостовой схеме. В основе таких инверторов лежат транзисторные ключи.

В электроприводе наибольшее распространение получили следующие типы управления АИН [1, 2]:

1. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
2. Пространственно-векторная модуляция (ПВМ).

Методы ШИМ на основе несущей гармоники были разработаны самыми первыми и получили широкое распространение в электроприводе переменного тока. Одним из первых модулируемых сигналов для ШИМ является синусоидальный сигнал. Коэффициент модуляции для такой ШИМ может достигать до 78,5% от напряжения звена постоянного тока. Решению повышения коэффициента модуляции в ШИМ посвящено много исследований в области силовой электроники [4].

Проблема неполного использования напряжения звена постоянного тока привела к развитию ШИМ с инжекцией третьей гармоники. Данный тип модуляции предложен в 1975 г. Бум. Данный тип модуляции за счет добавления гармоник третьего порядка в синусоидальный сигнал позволяет увеличить коэффициент модуляции на 15,5% [4].

Другим методом увеличения выходного напряжения является ПВМ. Данный тип модуляции впервые был представлен в 1980 г., а после значительно усовершенствован Ван де Бройком в 1988 г. [5]. Результаты его применения схожи с инжекцией третьей гармоники, но процессы самой модуляции совершенно разные. С развитием микропроцессорной техники ПВМ стала одной из важнейших модуляций трехфазных АИН [6]. Одним из параметров, используемых в сравнительных оценках различных систем электропривода, является коэффициент гармонических искажений (КГИ). КГИ возможно выразить следующим образом [3]:

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{\sum_i^{\infty} I_i^2}}{I_1},$$

где:

$I_i$  – амплитуда  $i$ -ой гармоники, кроме несущей гармоники (1-ой);

$I_1$  – амплитуда несущей гармоники.

При помощи разработанной математической модели электропривода, состоящего из преобразователя частоты, включающего неуправляемый выпрямитель, звено постоянного тока, АИН и асинхронный двигатель 4А112М4У3 со скалярной системой управления были получены следующие результаты, представленные на рис. 1. На рис. 1 (а) – представлены зависимости КГИ тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки на двигателе для АИН с ПВМ, а 1 (б) – представлены зависимости КГИ тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки на двигателе для АИН с ШИМ, 1

(в) – зависимость КГИ напряжения фазы А статора от индекса модуляции  $\mu$  для АИН с ПВМ, (г) – зависимость КГИ напряжения фазы А статора от индекса модуляции  $\mu$  для АИН с ШИМ.

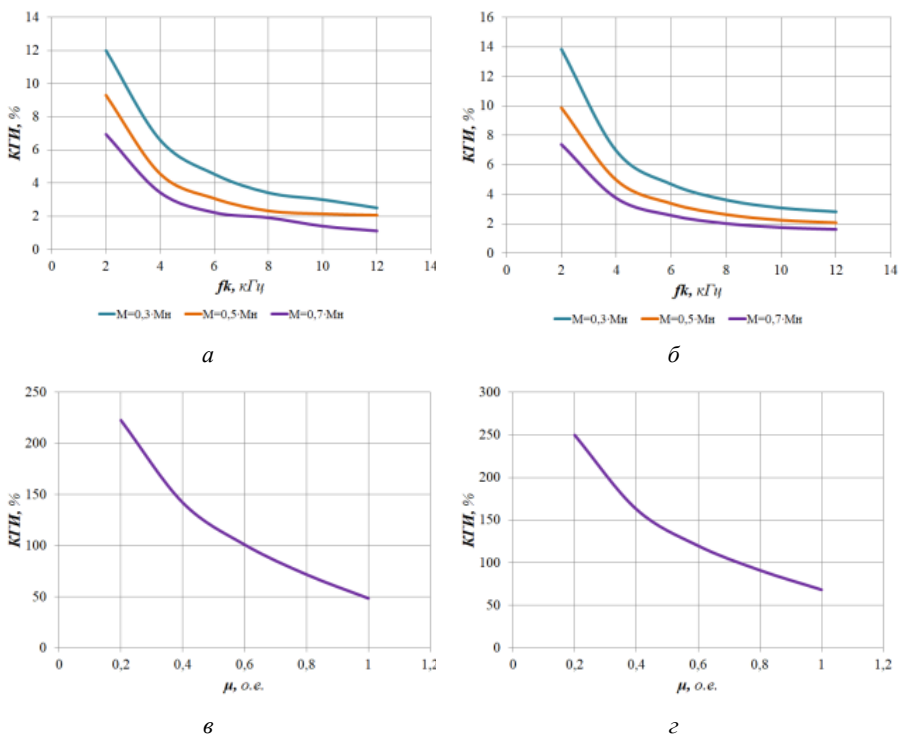


Рисунок 1 – (а) – зависимость КГИ от  $f_k$  для АИН с ПВМ, (б) – зависимость КГИ от  $f_k$  для АИН с ШИМ, (в) – зависимость КГИ от  $\mu$  для АИН с ПВМ, (г) – зависимость КГИ от  $\mu$  для АИН с ШИМ

Математическое моделирование при получении зависимостей КГИ тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах сопротивления ( $M=0,3 M_n$ ;  $M=0,5 M_n$ ;  $M=0,7 M_n$ ) на двигателе проводилось при задании на амплитуду напряжения статора  $U=311 В$  и частоту тока  $f=50 Гц$ . Изменение частоты коммутации ключей  $f_k$  выполнялось в диапазоне от 2 кГц до 12 кГц. Как видно из рис. 1 (а) увеличение частоты коммутации транзисторных ключей ведет к уменьшению гармонических искажений тока (аналогично рис. 1 (б)). Относительное значение КГИ у АИН с ПВМ в среднем на 9% меньше чем у АИН с ШИМ. Наибольшая разница КГИ составляет 1,85% и получается при моменте  $M=0,3 M_n$ .

Математическое моделирование при получении зависимости КГИ напряжения фазы А статора от индекса модуляции  $\mu$ , проводилось при частоте тока статора  $f=50$  Гц, моменте нагрузки  $M=0$  Нм, частоте коммутации ключей  $f_k=5$  кГц. Как видно из зависимости КГИ напряжения фаза А от индекса модуляции  $\mu$  (рис. 1 (в)) с уменьшением индекса модуляции происходит возрастание КГИ (аналогично рис. 1 (г)), в диапазоне от 48,49% (соответствует  $\mu=1$  о.е.) до 222,69% (соответствует  $\mu=0,2$  о.е.) (рис. 1 (г)). Относительное значение КГИ у АИН с ПВМ в среднем на 20% меньше чем у АИН с ШИМ.

Полученные результаты показывают лучшие показатели качества при управлении двигателем от АИН с ПВМ, но разница в динамических и статических показателях минимальна по сравнению с ШИМ. Результаты моделирования, полученные для асинхронного двигателя, будут аналогичными для синхронного двигателя. Для тяговых электроприводов переменного тока в будущем целесообразно применять ПВМ для управления АИН, либо же другие виды ШИМ, имеющие лучший индекс модуляции  $\mu$ .

#### Список литературы

1. Автономные инверторы: учебное пособие/ Д. Н. Томашевский – Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2019 – 120 с.
2. Преобразовательная техника: учебное пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
3. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с. ISBN 5-7695-1704-2/
4. Study of A Novel Over-Modulation Technique Based on Space-Vector PWM / H. Quan, Z. Gang, C. Jie, Z. Wu, and Z. Liu // IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), pp. 295-298, 2011.
5. Harmonic Analysis of a Space Vector PWM Inverter using the Method of Multiple Pulses/ A.W. Leedy, and R.M. Nelms // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 4, pp. 1182-1187, July 2006.
6. Relationship Between Space-Vector Modulation and Three- Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis / K. Zhou and D. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 186-196, February 2002.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*



**СЕКЦИЯ «МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ,  
ПОВЕДЕНЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»**

SECTION «MULTIPHYSICAL, MATHEMATICAL, BEHAVIORAL MODELING»

УДК 519.872

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef000fe4.90061792

**ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ВЫЗОВОВ**

*Сергей Викторович Козлов*, сотрудник, к.т.н., sv@mail.ru

*Алексей Георгиевич Коркин*, сотрудник, к.т.н., доцент, alkorich@yandex.ru

*Сергей Алексеевич Корнилов*, сотрудник, к.т.н., korsar-89@bk.ru

Академия ФСО России, Российская Федерация, Орел

*Аннотация. В работе представлен подход разработки генераторов, обеспечивающих генерацию последовательностей случайных чисел для формирования потока заявок и определения длительности соединений.*

*Ключевые слова: компьютерный тренажер, генератор случайных чисел.*

**RANDOM NUMBER GENERATOR TO SIMULATE CALL FLOW**

Sergey V. Kozlov, employee, candidate of technical sciences, sv@mail.ru

Alexey G. Korokin, employee, candidate of technical sciences, docent, alkorich@yandex.ru

Sergey Al. Kornilov, employee, candidate of technical sciences, korsar-89@bk.ru

Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Russian Federation, Orel

*Abstract. The paper presents an approach to the development of generators providing the generation of sequences of random numbers for generating the flow of applications and determining the duration of connections.*

*Keywords: computer simulator, random number generator.*

Для повышения эффективности подготовки инженерно-технического персонала по эксплуатации оборудования автоматических телефонных станций (АТС) используются компьютерные тренажеры. Компьютерные тренажеры позволяют формировать практические навыки и умения администрирования АТС и работы оператором междугороднего коммутатора (МК) [1].

Задача воссоздания реального процесса работы оператора МК при обслуживании заявок от абонентов решалась на основе имитационного моделирования. Для формирования потока вызовов и определения длительности соединений необходимо использовать генераторы случайных чисел (ГСЧ). Один ГСЧ используется для задания интервалов между поступающими заявками от абонентов на соединения, второй генератор для определения длительности установленных на коммутаторе соединений. В соответствии с принятыми в теории телетрафика подходами [2], для

программного тренажера МК создаются независимые ГСЧ, обеспечивающие формирование последовательностей СЧ, не коррелированных между собой и распределенных по экспоненциальному закону.

Процесс формирования экспоненциально-распределенных последовательностей СЧ осуществляется на основе преобразования исходной линейно-распределенной случайной последовательности [3].

Экспоненциальное распределение задано выражением

$$F(x) = 1 - e^{-x/\mu}, \quad x \geq 0,$$

а случайная величина (СВ) определяется как

$$X = -\mu \ln U, \quad 0 < U \leq 1$$

и имеет экспоненциальное распределение со средним  $\mu$ , если  $U$  – равномерно-распределенная СВ на интервале  $[0, 1]$ .

Для определения СВ при  $U = 0$  берется достаточно малое значение, для которого может быть вычислен логарифм с заданной точностью.

Для генерации экспоненциально-распределенных случайных чисел также может использоваться быстрый итерационный алгоритм, основанный на генерации битовых последовательностей [4].

Для генерации равномерно-распределенной случайной величины  $U$  на интервале  $[0, 1]$  могут использоваться линейный конгруэнтный метод (LCPRNG) [3] или метод вихря Мерсена (Mersenne Twister) [3].

Более простым для реализации в программе является LCPRNG метод. По данному методу генерация последовательности осуществляется в соответствии с выражением

$$X_{k+1} = (aX_k + c) \bmod m, \quad (1)$$

где  $a, c, m$  – некоторые целые числа.

Формируемая последовательность зависит от начального значения  $X_0$  – «посева» (seed). Для генерации двух последовательностей СЧ при моделировании потока вызовов и длительности установленных соединений на МК необходимо задавать разные значения  $X_0$ . Также для формирования разных последовательностей при каждом запуске, необходимо определить источник энтропии для начального заполнения  $X_0$ . В качестве источника энтропии предложено использовать комбинацию значений MAC-адреса сетевой карты, системного таймера, номеров процессора и диска компьютера.

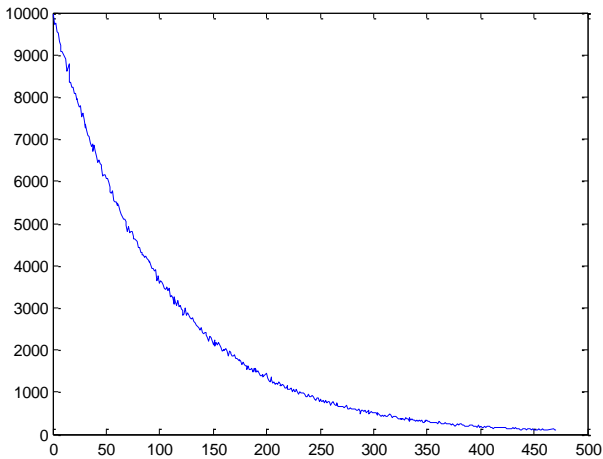
Используя свойства рекуррентной последовательности (1), могут быть подобраны коэффициенты  $a, c, m$  таким образом, чтобы период последовательности был максимален [3]. Одна из комбинаций коэффициентов, которая позволяет получить максимальную последовательность 32-битных целых чисел, была использована в качестве минимального стандарта для языка программирования C++11. Эта комбинация следующая:  $a = 48271, c = 0, m = 2^{31} - 1$ .

Поскольку LCPRNG генерирует целочисленную последовательность на интервале  $[0, 2^{31} - 2]$ , то ее необходимо привести к вещественной

последовательности случайных величин  $U$  на интервале  $[0, 1]$ . Такое преобразование возможно с точностью  $2^{-31}$ .

Для экспериментальной оценки качества полученного распределения случайных чисел дополнительно к программному тренажеру разработана программа на языке программирования C++, в которой использовался линейный конгруэнтный генератор `minstd_rand` из стандартной библиотеки с указанными выше коэффициентами минимального стандарта.

В ходе выполнения программы было получено эмпирическое распределение частот случайных чисел (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Эмпирическое распределение частот случайных чисел*

Из графика видно, что эмпирическое распределение соответствует экспоненциальному закону. Полученные результаты позволили использовать разработанные ГСЧ в составе программного тренажера МК для формирования потока вызовов и определения длительностей соединения.

#### **Список литературы**

1. Коркин А.Г., Невров А.А., Куваев В.О. Тренажер электронного ручного междугороднего коммутатора. Свидетельство о государственной регистрации №2016616287 Российская Федерация: заявители и правообладатели авторы – № 2016613808; заявл. 19.04.2016; опубл.08.06.2016 г.
2. Теория телетрафика / [Ю. Н. Корнышев, А. П. Пшеничников, А. Д. Харкевич] – Москва: Радио и связь, 1996. – 272 с.
3. Кнут, Д.Э. Искусство программирования, том 2. Получисленные алгоритмы. 3-е издание: Пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 832 с.
4. Matsumoto, M., Kurita, Y. Twisted GFSR generators // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations. – 1992. – т. 2, № 3. – С. 179–194.

*Материал принят к публикации 09.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef0ab905.51645931

## УПРОЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С МАГНИТОПРОВОДОМ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

**Юрий Владимирович Креселюк**, ст. преп., yurakreselyuk@mail.ru

**Анастасия Александровна Ивженко**, ассистент, stasya.ivgenko@mail.ru

**Михаил Николаевич Кирса**, laggengine@gmail.com

Луганский государственный университет им. В. Даля, ЛНР, Луганск

*Аннотация.* Приведена упрощённая конструкция магнитной системы с магнитопроводом круглого сечения и разработана ее математическая модель, для определения магнитного потока. Переход из цилиндрической системы координат в прямоугольную систему координат.

*Ключевые слова:* магнитный поток, магнитная система, математическая модель, потенциал, система координат.

### SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF A MAGNETIC SYSTEM WITH A CIRCULAR MAGNETIC CONDUCTOR

Yuri V. Kreselyuk, senior lecturer, yurakreselyuk@mail.ru

Anastasia A. Ivzhenko, assistant, stasya.ivgenko@mail.ru

Mikhail N. Kirsa, laggengine@gmail.com

Lugansk State University named after V. Dahl, LPR, Lugansk

*Abstract.* A simplified design of a magnetic system with a circular magnetic core is presented and its mathematical model is developed to determine the magnetic flux. Transition from a cylindrical coordinate system to a rectangular coordinate system.

*Keywords:* magnetic flux, magnetic system, mathematical model, potential, coordinate system.

Магнитная система с магнитопроводом круглого сечения зачастую используется в магнитных датчиках. На рис. 1 изображена упрощённая конструкция магнитной системы с магнитопроводом круглого сечения.

Функция потенциала в данной конструкции аппроксимируется полем двух дисков, представляющих собой основание магнитной системы. Расчет потенциалов для дисков производится следующим образом. Для круглого диска радиуса  $R$  с потенциалом  $U$ , цилиндрические координаты точки на диске  $\rho, \varphi$ , координаты  $M_0, \rho_0, z$  ( $\varphi_0 = 0$ ).

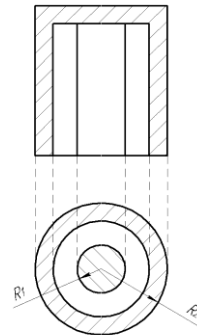


Рисунок 1 – Упрощённая конструкция магнитной системы с магнитопроводом круглого сечения

Потенциал точки  $M$ , создаваемый диском радиуса  $R$ , с потенциалом  $U$  будет равен:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{Uz}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho d\rho d\varphi}{(z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho\rho_0 \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{Uz}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{z^2 + \rho_0^2}}{z^2 + \rho_0^2 \sin^2 \varphi} - \frac{z^2 + \rho_0^2 - \rho_0 \cos \varphi}{z^2 + \rho_0^2 \sin^2 \varphi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + \rho_0^2 + R^2 - 2\rho_0 R \cos \varphi}} \right] d\varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

Интегрируя формулу (1) получаем значение потенциала:

$$\varphi = U \left\{ 1 - \frac{z}{\pi \sqrt{z^2 + (\rho_0 + R)^2}} \left[ \frac{d-R}{d+\rho_0} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_1, k\right) + \frac{d+R}{d-\rho_0} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_2, k\right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $d = \sqrt{z^2 + \rho_0^2}$ ;  $n_1 = -\frac{2\rho_0}{d+\rho_0}$ ;  $n_2 = \frac{2\rho_0}{d-\rho_0}$ ;  $k^2 = \frac{4R\rho_0}{z^2 + (\rho_0 + R)^2}$ .

Полные эллиптические интегралы третьего рода в уравнении (2) обозначаются через  $\Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_1, k\right)$  и  $\Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_2, k\right)$ , которые определяются выражением:

$$\Pi\left(\frac{\pi}{2}, n, k\right) = \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1+n \sin^2 \varphi) \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}.$$

На оси диска  $\rho_0 = 0$ :  $\frac{\varphi}{U} = 1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}}$ ,  $E = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = U \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$ .

В формуле (1) интегралы удобнее вычислять приближенным способом [1]. Для расчета функции потенциала необходимо рассчитать поле двух дисков (рис. 2.), один из них является кольцевым (внешний).

Для расчета функции потенциала, создаваемого внешним кольцом, функция потенциала равна:

$$\varphi = \frac{Uz}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\rho d\rho d\varphi}{(z^2 + \rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho\rho_0 \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

Функция (3) аппроксимируется суммой:

$$\varphi(\rho_0) = \frac{U_z}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\Delta\varphi_k \Delta R \cdot R_{cp}}{(z^2 + \rho_0^2 + R_{cp}^2 - 2R_{cp}^2 \rho_0 \cos \Delta\varphi_k)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

здесь  $\Delta\varphi_k = \frac{2\pi}{N}$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

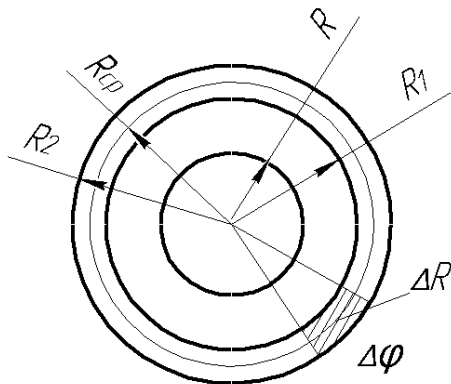


Рисунок 2 – К расчету функции потенциала

Для определения магнитного потока, создаваемого кольцом, необходимо подставить формулу (4) в (5), но при этом перейти от цилиндрической системы координат к прямоугольной. Для перехода к прямоугольной системе координат принимаем  $\rho_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Тогда получаем значение потока в магнитопроводе магнитной системы при  $S = 0$  (рис. 3.):

$$\Phi_1 = \frac{\mu_0 h M}{2\pi} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sum_{k=1}^N \frac{\Delta\rho_k \Delta R \cdot R_{cp} dx dy}{(h^2 + x^2 + y^2 - 2R_{cp} \sqrt{x^2 + y^2} \cos \Delta\varphi_k)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

Если учитывать  $S$  то формула (6) примет следующий вид:

$$\Phi_1 = \frac{\mu_0 h M}{2\pi} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sum_{k=1}^N \frac{\Delta\rho_k \Delta R \cdot R_{cp} dx dy}{(h^2 + (x-S)^2 + y^2 - 2R_{cp} \sqrt{(x-S)^2 + y^2} \cos \Delta\varphi_k)^{\frac{3}{2}}}. \quad (6)$$

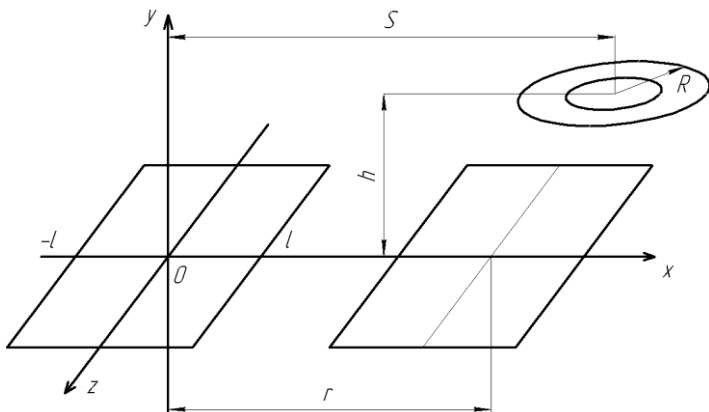


Рисунок 3 – Геометрическая модель магнитной системы с магнитопроводом круглого сечения.

Магнитный поток, создаваемый внутренним стержнем, рассчитывается по формуле:

$$\Phi_2 = \mu_0 h M \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \left\{ 1 - \frac{h}{\pi \sqrt{h^2 + (x-S)^2 + y^2}} \left[ \frac{d-R}{d + \sqrt{(x-S)^2 + y^2}} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_1, k\right) + \frac{d+R}{d - \sqrt{(x-S)^2 + y^2}} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_2, k\right) \right] \right\},$$

где  $d = \sqrt{h^2 + (x-S)^2 + y^2}$ ;  $n_1 = \frac{2\sqrt{(x-S)^2 + y^2}}{d + \sqrt{(x-S)^2 + y^2}}$ ;  $n_2 = \frac{2\sqrt{(x-S)^2 + y^2}}{d - \sqrt{(x-S)^2 + y^2}}$ ;

$$k^2 = \frac{4R\sqrt{(x-S)^2 + y^2}}{h^2 + \left(\sqrt{(x-S)^2 + y^2} + R\right)^2}.$$

Окончательное значение магнитного потока в магнитной системе с круглым сечением рассчитывается в соответствии с зависимостью:  $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ .

#### Список литературы

1. Меркулова Н.Н., Михайлов М.Д. Методы приближенных вычислений: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. А.В. Старченко. – Томск: Изд. дом ТГУ, 2014. – 764 с.

Материал принят к публикации 08.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef15ba52.23468627

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

**Виктор Александрович Марус**, студент, vitya.marus.01@mail.ru

**Александр Анатольевич Пугачев**, зав. каф., д.т.н., доцент  
alexander-pugachev@rambler.ru

Брянский государственный технический университет  
Российская Федерация, Брянск

*Аннотация. Приведены результаты моделирования электропривода с асинхронным двигателем мощностью 4 кВт и системами скалярного управления при различных функциональных зависимостях. Проанализированы направления исследований по улучшению энергетической эффективности электроприводов с системами скалярного управления.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, система скалярного управления, механические характеристики.*

### MATHEMATICAL SIMULATION OF INDUCTION MOTOR SCALAR CONTROL SYSTEM

Viktor A. Marus, student, vitya.marus.01@mail.ru

Alexander A. Pugachev, head of department, doctor of technical sciences, docent,  
alexander-pugachev@rambler.ru

Bryansk State Technical University, Russian Federation, Bryansk

*Abstract. The simulation results of 4 kW induction motor electric drive with scalar control system and different control topologies are presented. The perspective directions of further investigations on improving energy efficiency of electric drives with scalar control systems are highlighted.*

*Keywords: induction motor, scalar control system, mechanical characteristics.*

В настоящее время электроприводы с асинхронным двигателем являются наиболее распространенным типом электропривода в промышленности. Благодаря развитию силовой и информационной электроники, в настоящее время существует довольно большое разнообразие систем управления, не только позволяющих с высокой точностью регулировать выходные координаты, но также обеспечивающих заданные значения энергетических показателей качества. Несмотря на это, для большой группы производственных механизмов и технологических устройств широкое применение продолжают получать электроприводы с системами скалярного управления. В данной статье приведены сравнительные результаты математического моделирования для наиболее распространенных вариантов построения таких систем [1]. Проверка работоспособности рассматриваемых систем управления была проведена в программном комплексе MatLab



Simulink для асинхронного двигателя с номинальной мощностью 4 кВт, частотой вращения магнитного поля статора 1500 об/мин. Модель асинхронного двигателя, использованная при моделировании, подробно описана в [2].

Основная функциональная зависимость, реализуемая системой скалярного управления для нагрузки электропривода с постоянным моментом сопротивления, записывается в виде:  $U_1/f_1^* = const$ , где  $U_1$  – фазное напряжение статора,  $f_1$  – частота тока статора, подстрочный индекс \* указывает на относительное значение параметра в долях от своего номинального значения. Результаты моделирования для такого варианта системы управления приведены на рис. 1а.

Отметим, что в данном случае происходит уменьшение максимального момента двигателя при уменьшении частоты тока статора, что обусловлено перераспределением напряжения между сопротивлениями статора. Для уменьшения / устранения этого явления целесообразно применить IR-компенсацию. В этом случае реализуемая системой управления функциональная зависимость примет вид:

$$U_1 \approx U_{1н}f_{1*} + I_{1н}r_1(1 - f_{1*}),$$

где  $r_1$  – сопротивление обмотки статора, подстрочный индекс «н» обозначает номинальное значение соответствующего параметра. Результаты моделирования показаны на рис. 1б. Очевидно, что организация положительной обратной связи по току статора при использовании IR-компенсации привела к поддержанию постоянства критического момента при снижении частоты тока статора.

Для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления, для которых характерна квадратичная зависимость момента сопротивления от частоты вращения, применяют функциональную зависимость вида  $U_1/f_1^{2*} = const$ . Результаты моделирования показаны на рис. 1в.

Для механизмов с постоянством мощности сопротивления, для которых характерна обратно пропорциональная зависимость между моментом сопротивления и частотой вращения, применяют функциональную зависимость вида

$$\frac{U_{1*}}{\sqrt{f_{1*}}} = const.$$

Результаты моделирования показаны на рис. 1г.

На рис. 1 для каждого варианта системы управления показаны два случая:  $1 - f_{1*} = 1$ ,  $1 - f_{1*} = 0,5$ . В двух последних случаях (рис. 1в и 1г) характер зависимости критического момента асинхронного двигателя от частоты вращения аналогичен характеру зависимости момента сопротивления от частоты вращения, что обеспечивает выполнение оптимальности режима работы асинхронного двигателя по закону М.П. Костенко (постоянство абсолютного скольжения, перегрузочной способности и коэффициента мощности), когда магнитная цепь двигателя не насыщена.

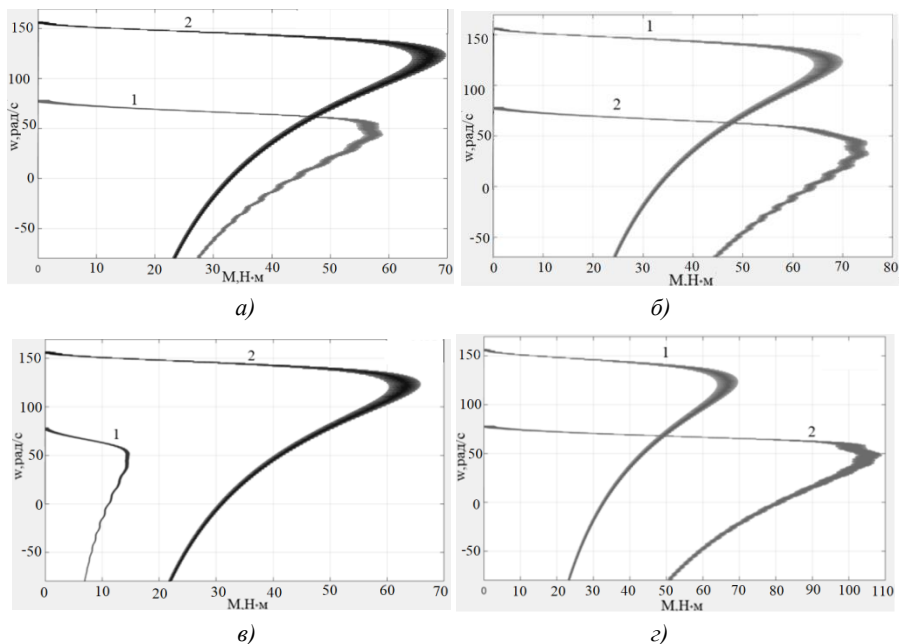


Рисунок 1 – Результаты моделирования

Таким образом, результаты моделирования показали адекватность математического описания всех рассмотренных систем управления. Несмотря на достаточно простую их техническую реализацию (по отношению к системам векторного управления и прямого управления моментом), все еще существуют резервы по оптимальному построению систем скалярного управления за счет выбора дополнительного регулируемого параметра и организации соответствующего контура регулирования, выбора типа и значений регуляторов, а также выбора формы и значений задающего сигнала [1,2]. Использование этих возможностей повышает энергоэффективность электропривода с системой скалярного управления, не лишая его преимуществ перед системами векторного управления и прямого управления моментом.

#### Список литературы

1. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 44 – 50.
2. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 26 – 31.

Материал принят к публикации 12.10.21.

УДК 519.816

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef1fd468.69147282

## ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ПАРАКОНСИСТЕНТНОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ (PES<sub>PAL2V</sub>)

**Оксана Витальевна Порубай**

Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова,  
докторант, Узбекистан, Фергана, oksanaporubay@gmail.com

*Аннотация. В данной статье описана экспертная система, которая спроектирована и разработана для определенного и ограниченного применения человеческих знаний. Оснащенная информационной базой, она способна принимать решения на основе обоснованных знаний. При этом алгоритмы, из которых состоят вычислительные программы экспертной системы, представляют знания из области, которую они должны анализировать, и помогают в решении проблем.*

*Ключевые слова: электроэнергетическая система, экспертная система, паранепротиворечивая логическая модель, непротиворечивая логика.*

MAKING MANAGEMENT DECISIONS OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM USING  
THE PARACONSISTENCY LOGICAL MODEL OF THE EXPERT SYSTEM (PES<sub>PAL2V</sub>)

Oksana V. Porubay

Tashkent State Technical University named after I. Karimova, doctoral student, Uzbekistan, Fergana  
oxsanaporubay@gmail.com

*Abstract. This article describes an expert system that is designed and developed for a certain and limited application of human knowledge. Equipped with an information base, it is able to make decisions based on reasonable knowledge. At the same time, the algorithms from which the computational program of the expert system consist, represent knowledge from the area they should analyze and help solve problems.*

*Keywords: electric power system, expert system, paraconsistency logical model, consistent logic.*

В последние десятилетия во многих странах происходит постепенное увеличение промышленных территорий, которые требуют энергии, особенно электрической. Данная ситуация, за очень короткий период времени, привела к значительному расширению сектора, отвечающего за производство и распределение электроэнергии. Быстрое расширение привело к значительному увеличению источников генерации и распределительных ветвей электроэнергии, в результате чего возникли огромные и сложные агломераты, взаимосвязанные между собой и с определенной степенью зависимости и уязвимости.

Описанная в данной статье экспертная система, спроектирована и разработана для определенного и ограниченного применения человеческих знаний. Более того, оснащенная информационной базой, она способна

принимать решения на основе обоснованных знаний. При этом алгоритмы, из которых состоят вычислительные программы экспертной системы, представляют знания из области, которую они должны анализировать, и помогают в решении проблем.

Среди нескольких семейств паранепротиворечивых логик есть логика, называемая паранепротиворечивой аннотированной логикой (PAL) [1], которая принадлежит к классу доказательной логики и позволяет анализировать сигналы. Параконсистентная аннотированная логика с аннотацией двух значений (PAL2v) является расширением PAL.

Следуя модели, применение паранепротиворечивой логики PAL2v в анализе электроэнергетических систем осуществляется с получением данных, соответствующих значениям напряжения и тока, где они нормализуются, чтобы соответствовать концепциям из PAL2v. Эти сигналы получают адекватную обработку алгоритмами PAN в их нормальной конфигурации или во взаимосвязях, составляя сети блоков, которые извлекают эффекты противоречия, создавая паранепротиворечивую логическую модель, связанную с состоянием риска перегрузки в системе.



*Рисунок 1 – Параконсистентная логическая модель, состоящая из степеней свидетельств риска, полученных на основе значений тока и напряжения в реальной электроэнергетической системе.*

Согласно паранепротиворечивой экспертной системе ( $PES_{PAL2v}$ ) реальная действующая электроэнергетическая система владеет своей паранепротиворечивой логической моделью, основанной на степенях свидетельств, утверждения которых связаны с состояниями рисков простоя из-за перегрузки.

На рисунке 1 показана параконсистентная логическая модель, состоящая из степеней свидетельства риска, сконфигурированных реальной электроэнергетической системой.

Работа  $PES_{PAL2v}$  начинается при возникновении непредвиденных обстоятельств или сбоев с отключением электроэнергии. Это когда алгоритмы

Параконсистентных экспертных систем получают данные для анализа предаварийных состояний, которые были сохранены в базе данных электроэнергетической системы. Это позволяет  $PES_{PAL2v}$  проверять степень риска перегрузки с помощью измерений напряжения и тока до происшествия. Проверка результирующих степеней свидетельства определяет с определенной степенью свидетельства, определяя какая ветвь электросети имела высокий риск степени перегрузки до происшествия.

Этот предаварийный анализ предлагает такие условия, что во время непредвиденных обстоятельств мы можем сравнить полученное свидетельство степени риска перегрузки с состоянием риска, которое система имела в состоянии, предшествующем событию. Таким образом, возможно, благодаря результатам сравнительного анализа двух моментов и состояния топологии электрической сети в ее зоне, затронутой непредвиденными обстоятельствами,  $PES_{PAL2v}$  может выполнить наиболее удобную адаптацию маневров, применяемую к оптимизированному восстановлению электроэнергетической системы.

По результатам сравнения доказательств степени риска перегрузки, анализ паранепротиворечивой экспертной системы  $PES_{PAL2v}$  предложит управляющие воздействия на восстановление электроэнергетической системы на основе трех состояний подсистемы передачи [2].

Эти процедуры анализа можно увидеть на рисунке 2.

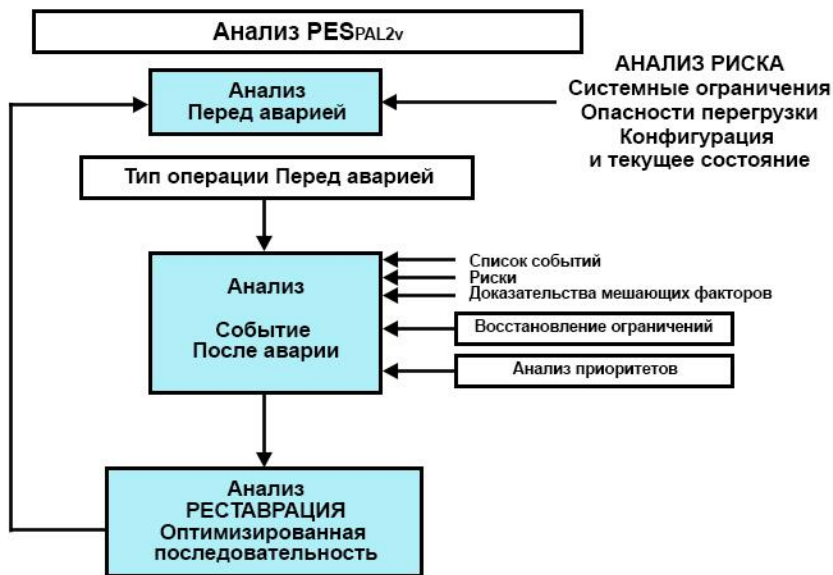


Рисунок 2 – Блок-схема анализа состояний в процессе

1.Предаварийный – заключается в анализе действующей системы передачи.

2.Поставарийный – заключается в анализе подсистемы передачи на момент возникновения непредвиденной ситуации.

3.Восстановление – заключается в анализе подсистемы передачи после аварии.

Параконсистентный анализ в PESPAL2v основан на конфигурациях PAN, в которых паранепротиворечивые логические сигналы извлекаются из измеренных значений напряжения и электрического тока. Анализ PAL2v выполняется с прикладными паранепротиворечивыми логическими сигналами с аннотациями, состоящими из степеней доказательства, связанных с 5 частичными предложениями.

Первые два анализируют отключение напряжения и перегрузку по току в точках измерения и генерируют степени доказательств, связанных с наличием перегрузки в сети передачи. Это:

1. Pp1: Перегрузка по току в электросети.

2. Pp2: Пониженное напряжение в электросети.

Затем, с помощью алгоритмов PAN, проводится параконсистентный анализ со степенями пониженного напряжения и сверхтока, сгенерированных этим начальным анализом, который дает степени свидетельств, связанных с аннотацией предложения объекта:

1.Po: существует риск падения из-за перегрузки в электросети.

Для принятия решения об оптимальном восстановлении подсистемы передачи после непредвиденных обстоятельств, PES<sub>PAL2v</sub> все еще анализирует два других предложения, связанных с ограничениями и топологией электросети:

1.Po1: Есть ограничения нагрузок в электросети.

2.Po2: Идеальная топология сети для текущей ситуации.

Таким образом, последовательность действий, предлагаемых для операции, будет напрямую зависеть от конфигурации топологий, технических норм и ограничений, которые влияют на область подсистемы передачи энергосети, затронутую чрезвычайной ситуацией [3].

Классификация, выполняемая сетью паранепротиворечивого анализа (PANet), генерирует результирующий сигнал свидетельства, значение которого будет определять тип операции и последовательность восстановления, наиболее близкую к идеальной, с учетом условий системы субпередачи [4].

На рисунке 3 показан анализ до отказа с его частичными предложениями, которые генерируют степени свидетельства для его объектного предложения и чей результат будет использован для анализа после отказа.

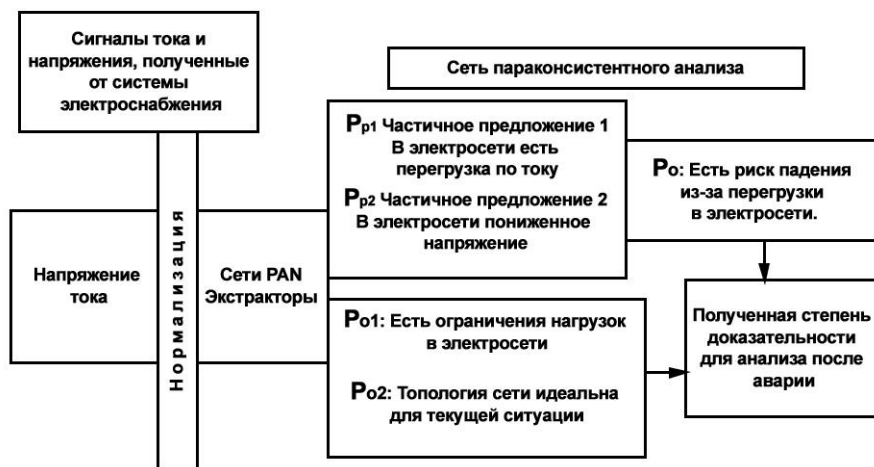


Рисунок 3 – Представление анализа до отказа с его частичными предложениями, которые генерируют уровни доказательств для анализа после отказа

В данной работе было показано, что паранепротиворечивая логика имеет большие возможности применения в технологических процессах с целью решения сложных задач. Параконсистентная экспертная система -  $PES_{PAL2v}$  разработана с блоком анализа непредвиденных обстоятельств, который способен вычислять степени риска отключения из-за перегрузки электроэнергетической системы. Более того, при таком возникновении он также может анализировать условия и предлагать список последовательностей оптимизированного восстановления для операции.

### Список литературы

1. *Da Silva Fiho, J. I., Lambert-Torres, G., & Abe, J. M.* Uncertainty Treatment Using Paraconsistent Logic- Introducing Paraconsistent Artificial Neural Networks. IOS Press, 328, 211, *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Amsterdam, Netherlands, 2010.
2. *Torres, C. R., Abe, J. M., Lambert-Torres, G., & Da Silva Filho, J. I.* Autonomous Mobile Robot Emmy III. *Mobile Robots- Current Trends*, Dr. Zoran Gacovski (Ed.), 978-9-53307-716-1, InTech., 2011.
3. *Porubay O.* Decision-Making Under Conditions Of Definition And Risk Based On Strict Methods. *Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2020: Iss. 5, Article 15.* DOI: <https://doi.org/10.34920/2020.5-6.77-82> / Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/vol2020/iss5/15>.
4. *Siddikov I., Porubay O.* Neural network model of decision making in electric power facilities under conditions of uncertainty / *E3S Web of Conferences / Volume 304 (2021) / 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering (ICECAE 2021) / Tashkent, Uzbekistan, October 14-16, 2021 / DOI https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130401001.*

Материал принят к публикации 08.10.21.

УДК 004.934.2

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef29ef52.74618218

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ

**Владимир Ильич Семенов**, доцент, к.т.н., syundyukovo@yandex.ru

**Александр Кондратьевич Шурбин**, ст. преподаватель, shurti@mail.ru

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова  
Россия, Чебоксары

*Аннотация. Вейвлет-преобразование – это пропускание сигнала через полосовой фильтр. Конструирование вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой позволяет получать практически идеальные цифровые фильтры. Вейвлет-преобразование вычисляется в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье.*

*Ключевые слова: быстрое непрерывное вейвлет-преобразование, прямоугольная амплитудно-частотная характеристика, цифровой фильтр.*

### USING WAVELETS WITH A RECTANGULAR AMPLITUDE-FREQUENCY RESPONSE TO FILTER SIGNALS

Vladimir I. Semenov, associate professor, candidate of technical sciences, syundyukovo@yandex.ru

Alexander K. Shurbin, senior lecturer, shurti@mail.ru

I.N. Ulyanov Chuvash State University, Russia, Cheboksary

*Abstract. The wavelet transform is the transmission of a signal through a bandpass filter. The design of wavelets with a rectangular amplitude-frequency response makes it possible to obtain almost ideal digital filters. The wavelet transform is calculated in the frequency domain using the fast Fourier transform.*

*Keywords: fast continuous wavelet transform, rectangular amplitude-frequency response, digital filter.*

Цифровые фильтры позволяют фильтровать сигналы, за счет сужения частотного диапазона сигнала. Как происходит очищение сигнала от шума, т.е. частотную фильтрацию сигнала с сужением диапазона частот, написано во многих источниках. В любом канале связи в процессе передачи на сигнал  $x(t)$  накладывается шум  $u(t)$ , в результате принимается искаженный сигнал

$$y(t) = x(t) + u(t).$$

Отношение мощности сигнала к мощности шума

$$r = \frac{P_x}{P_u}.$$



Для того, чтобы обнаружить с большой вероятностью сигнал необходимо увеличить отношение полезной составляющей сигнала к шуму. Такое преобразование называется фильтрацией.

Отношение мощности сигнала к мощности шума после выхода с фильтра

$$m = \frac{P_s}{P_g}.$$

Задачей фильтрации является увеличение  $m$  по сравнению с  $r$ . Одним из таких методов является частотная фильтрация сигнала. Для выделения полезного сигнала применяются фильтры, настроенные на частоту сигнала. Реальный «белый шум» имеет равномерный спектр в широком интервале частот. На конечном интервале частот мощность шума будет конечной и отношение мощности сигнала к мощности шума  $r$  будет конечной величиной. Если средняя мощность шума приходящейся на единицу частоты  $P_0$ , а полоса пропускания фильтра –  $\Delta\omega$ , тогда мощность шума на выходе фильтра

$$P_g = P_0\Delta\omega.$$

Мощность полезной составляющей сигнала будет такой же, как до прохождения фильтра, так как фильтр настроен на частоту сигнала. Отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе фильтра

$$m = \frac{P_s}{P_0\Delta\omega}.$$

Из этой формулы следует, что чем меньше полоса пропускания фильтра  $\Delta\omega$ , тем больше отношение мощности сигнала к мощности шума  $m$ . На этом же принципе происходит фильтрация сигналов с применением вейвлетов, так как вейвлет-преобразование - это пропускание сигнала через полосовой фильтр. Продемонстрируем это на примере, когда уровень шума и сигнала почти одинаковы. На рис. 1 представлен график зависимости  $H(t)$  от времени шума конвейера и слова *стоп*. Слово *стоп* произносилось на расстоянии 10 метров

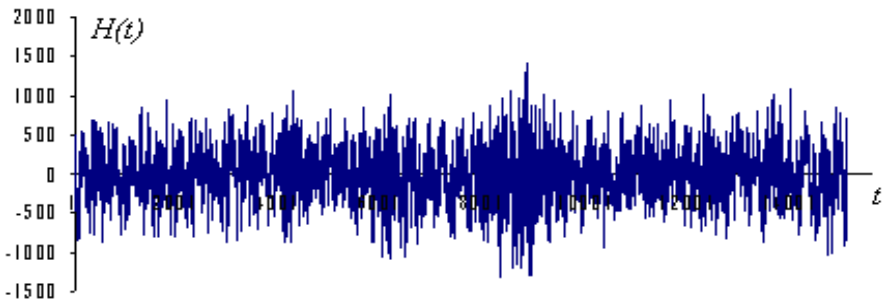


Рисунок 1 – Слово «стоп» на фоне шума конвейера

от микрофона на фоне шума конвейера. До фильтрации на графике видно, что уровень шума и слова почти одинаковы. После вейвлет-преобразования и вычисления энергии сегментов коэффициентов вейвлет-спектра этого участка энергия слова *stop* намного выше, то есть после фильтрации отношение мощности сигнала к мощности шума намного стало больше. На рис. 2 представлен график энергии сегментов вейвлет-коэффициентов  $W(2,b)$  слова *stop*. Таким образом, вейвлет-преобразование можно использовать наравне

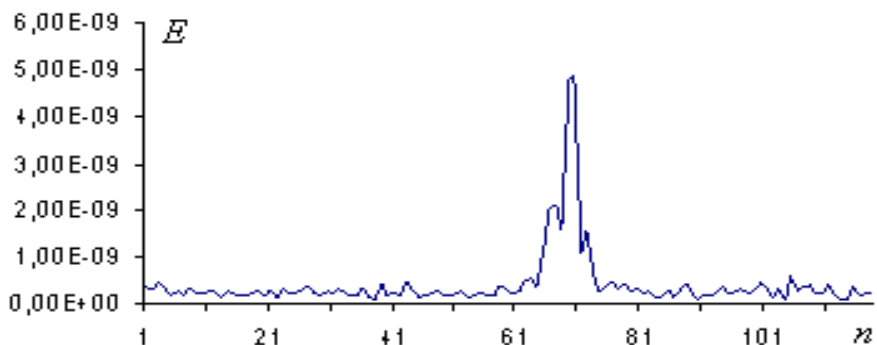


Рисунок 2 – Энергии сегментов вейвлет-коэффициентов слова «stop»

с цифровыми фильтрами. На практике могут быть сигналы, у которых частотный диапазон частот лежать в области нижних частот и в области средних частот. Тогда выгодно конструировать вейвлеты или цифровые фильтры с двумя полосами пропускания. Если использовать полосовой фильтр с одной широкой полосой пропускания, то отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе фильтра будет меньше, то есть сигнал на фоне шума выделится хуже. На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика такого вейвлета или двухполосного фильтра.

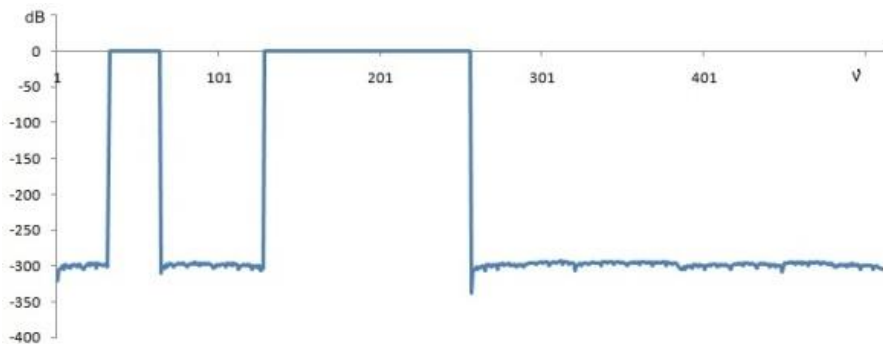


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика цифрового фильтра в децибелах

Такой фильтр реализован в одной импульсной характеристике, то есть в одном вейвлете. В отличие от дискретного вейвлет-преобразования, быстрое непрерывное вейвлет-преобразование позволяет получать вейвлеты с многими полосами пропускания. Независимо от числа полос пропускания в полосе непропускания (задерживания) ослабление сигнала около 300 децибел, переходной полосы нет. Можно считать такие фильтры являются идеальными в пределах погрешности вычисления. Такие фильтры можно использовать не только для фильтрации сигналов [1-5], но и для определения средних размеров объектов на изображении [6,7].

#### Список литературы

1. Семенов В.И., Михеев К.Г., Шурбин А.К., Михеев Г.М. Фильтрация изображений, полученных с помощью оптического микроскопа, с применением кратномасштабного анализа. Химическая физика и мезоскопия. Ижевск. 2014. Т. 16. №3. С. 399-404.
2. Семенов В.И., Шурбин А.К., Михеев К.Г., Михеев Г.М. Конструирование ортогональных вейвлетов в частотной области для кратномасштабного анализа сигналов. Химическая физика и мезоскопия том 20 №2, Ижевск, 2018. С. 230-238.
3. Семенов В.И., Чучкалов С.И., Христофоров О.В. Конструирование вейвлетов в частотной области. Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. Issue 7-2. – P. 26-29
4. V. Ďuriš, S. G. Chumarov, G. M. Mikheev, K. G. Mikheev, V. I. Semenov, "The Orthogonal Wavelets in the Frequency Domain Used for the Images Filtering," in IEEE Access, vol. 8, pp. 211125-211134, 2020.
5. Семенов В.И., Шурбин А.К. Конструирование вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой. //САПР и моделирование в современной электронике. Материалы IV Международной научно-практической конференции. – Брянск, 2020. С. 257-260.
6. Семенов В.И., Сорокин Г.М., Шурбин А.К., Петров Н.И. Определение среднеквадратичного отклонения размера объектов на изображении. //Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. -Чебоксары, 2017. С. 96-99.
7. Semenov V.I., Khristoforov O.V., Chuchkalov S.I. Calculating the standard deviation of the size of objects in an image. Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. – 62-64 p.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 621.396

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef33ae75.50943664

## МОДИФИЦИРОВАННОЕ ПРАВИЛО РАВНОЙ ПЛОЩАДИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПРОВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЕТКОЙ ИЗ ПРОВОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Алхадж Хасан Аднан**

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники (ТУСУР), м.н.с.  
Россия, Томск, alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

*Аннотация. Предложена модификация правила равной площади для аппроксимации проводящих поверхностей сеткой из проводов при решении задач излучения. Выполнена её апробация в системе TALGAT, на примере диполя на проводящей пластине, с верификацией в системе EMPro. Показано, что модификация данного правила дает более точные результаты по сравнению с исходным.*

*Ключевые слова: метод моментов, проводная сетка, правило равной площади, излучение.*

### MODIFIED RULE OF EQUAL AREA FOR APPROXIMATION OF CONDUCTING SURFACES BY WIRE GRID IN SOLVING RADIATION PROBLEMS

Alhaj Hasan A., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, junior researcher  
Russia, Tomsk, alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

*Abstract. A modification of the equal area rule is proposed for approximation conductive surfaces by a grid of wires when solving radiation problems. It was tested in the TALGAT system using the example of a dipole on a conductive plate, with verification in the EMPro system. It is shown that the modification of this rule gives more accurate results compared to the original one.*

*Keywords: method of moments, wire grid, equal area rule, radiation.*

С появлением и развитием вычислительной техники, к концу 80-х годов XX в. возникло новое направление, которое стали называть «вычислительной электродинамикой» [1]. Несмотря на успехи в создании специализированных САПР, методов решения краевых и начально-краевых задач, системы линейных алгебраических уравнений, оптимизации, вычисления электромагнитного поля и параметров электродинамических систем, в настоящее время неизвестно, можно ли создать универсальный численный метод, пригодный для решения всех задач электродинамики [2]. Поэтому одной из главных проблем является выбор оптимального метода решения конкретной задачи [3]. Одним из основных методов вычислительной электродинамики, широко используемым в САПР, является метод моментов (МоМ) [4]. При его использовании сначала проводящие части заданной структуры заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения окружающей среды этими токами. На полученное решение накладываются соответствующие граничные условия. Важным процессом решения является разбиение поверхностей на

элементарные площадки и аппроксимация тока в их пределах. Для разбиения используются треугольники [5] или провода [6]. При использовании проводов, вместо векторной функции плотности тока используется скалярная, что существенно упрощает решение. При этом требуется предварительный выбор числа проводов и их радиуса. Известны правило равной площади, а также его модификации для построения квадратной сетки из проводов при решении задач рассеяния [7–11]. Однако построение такой сетки не всегда реализуемо, и тогда требуется использовать другую сетку. Цель работы – модифицировать правило равной площади для использования прямоугольной сетки из проводов и апробировать его при решении задачи излучения. При использовании сетки из проводов расстояние между ними должно быть тщательно выбрано, т.к. оно влияет на вычислительные затраты. Кроме того, требуется задавать длины проводов, их радиусы, положение в пространстве и сегментацию [7]. Известно, что длина сегмента должна быть много меньше длины волны воздействующего сигнала [8]. При этом выбор радиуса проводов является нетривиальной задачей. Поэтому большое число работ было посвящено разработке подходов к его выбору. Так, известно правило равной площади, основанное на замене квадратного полигона сеткой из проводов, радиус которых основан на размерах полигона [7]. Исследовано влияние размера проводной сетки, построенной по этому правилу, на точность полученных результатов [9]. Выполнено обобщение правила на случай аппроксимации поверхности, состоящей из квадратного и треугольного полигонов, а также показано, что длина сегмента должна быть больше чем  $0,001\lambda$  и радиус проводов [10]. Физическая интерпретация правила равной площади дана в [11]. Согласно этому правилу, для аппроксимации квадратного полигона отдельным проводом его радиус  $a$  определяется так, чтобы площади поверхности полигона и провода длиной  $\Delta$  совпадали (рис. 1а) [7], т.е.

$$a = \Delta / 2\pi. \quad (1)$$

Однако это правило не применимо для случая прямоугольной сетки. В этом случае предлагается использовать длину меньшей стороны прямоугольника  $\Delta_2$  (рис. 2б), т.е.

$$a = \Delta_2 / 2\pi. \quad (2)$$

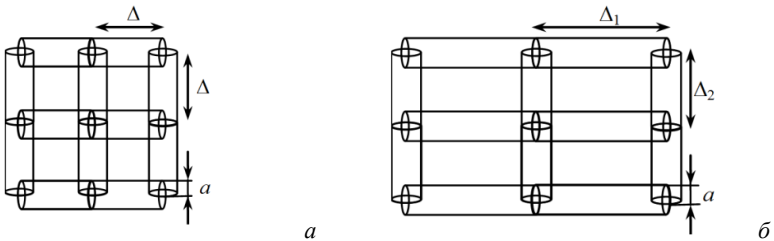


Рисунок 1 – К демонстрации правила равной площади (а) и его модификации (б)

Тестирование выполнено на примере диполя, ориентированного вдоль оси  $x$ , на проводящей пластине  $25 \times 50 \text{ мм}^2$ , расположенной в плоскости уз.

Диполь длиной 12,5 мм (длина плеч – 5, а зазора – 2,5 мм) и радиусом 0,015 мм располагался на расстоянии  $\lambda/4$  от торца пластины. Частота возбуждения 7,56 ГГц ( $\lambda \approx 39,655$  мм). Моделирование при радиусах проводов, вычисленных по (1) и (2), выполнено в системе TALGAT [12, 13]. Для верификации использована система EMPro [14] (порт возбуждения: амплитуда – 1 В; внутреннее сопротивление – 0 Ом; форма сигнала – «broadband»). Длина сегмента в обеих системах принят равным  $\lambda/10$ . В TALGAT пластина аппроксимировалась сеткой  $L_y \times L_z$  где  $L_y$  и  $L_z$  – число отрезков проводов по осям  $y$  и  $z$ . При использовании квадратной сетки эти значения приняты 8 и 4 соответственно (длины отрезков проводов по обеим осям – 6,25 мм). Согласно (1) получен радиус проводов  $a=0,9947$  мм. При  $\lambda/10$  длина сегментов составила 3,125 мм, что удовлетворяет условиям из [10]. В результате каждый отрезок проводов делился на 2 сегмента. Общее число сегментов составило отрезков проводов по осям  $y$  и  $z$  – 6,25 и 3,125 мм). Радиус проводов согласно (2) составил 0,5 мм, а длина сегментов – 3,125 мм, что также удовлетворяет условиям из [10]. Отрезки проводов вдоль оси  $y$  делились на 2 сегмента, а  $z$  – не делились. Общее число сегментов составило  $N=221$ . Полученные диаграммы направленности (ДН) приведены на рис. 2, а при  $\theta=0, 1, \dots, 180^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  и  $90^\circ$  – рис. 3.

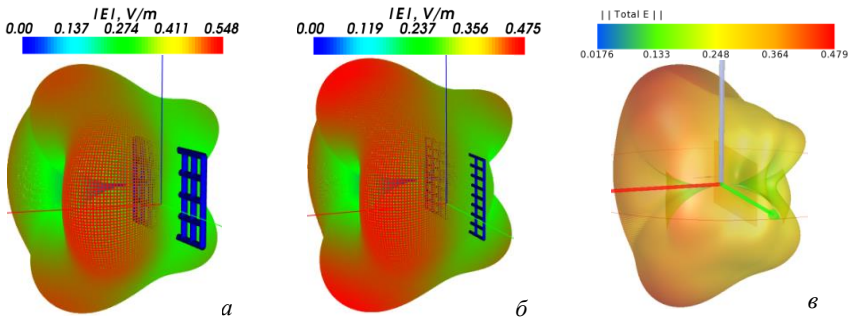


Рисунок 2 – ДН диполя на пластине в TALGAT при (1) (а) и (2) (б) и EMPro (в)

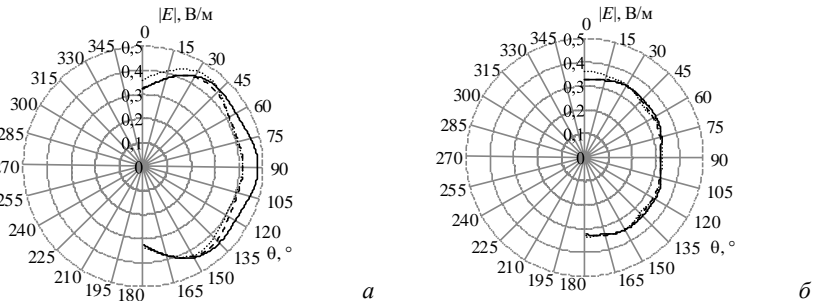


Рисунок 3 – ДН диполя на пластине при  $\theta = 0, 1, \dots, 180^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  (а) и  $90^\circ$  (б) в TALGAT при (1) (—) и (2) (----) и EMPro (....)

Из рис. 2 и 3 видно, что результаты EMPro и TALGAT при использовании хорошо согласуются, а максимумы модуля напряженности электрического поля  $|E|$  очень близки: 0,479 и 0,475 В/м (различие менее 1%). При использовании (1) максимум  $|E|$  составил 0,548 В/м (отличие в 13% от EMPro). Таким образом, правило (2) даёт более точные результаты по сравнению с (1).

*Исследование поддержано Министерством Науки и Высшего Образования (проект FEWM-2020-0041).*

#### Список литературы

1. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 487 с.
2. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2013. 430 с.
3. Ильин В.П. Математическое моделирование и философия науки // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88. № 1. С. 58–66.
4. Harrington R.F. Field computation by moment methods. NY: Macmillan, 1968. 240 p.
5. Rao S. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1982. Vol. 30. No. 3. P. 409–418.
6. Richmond J.H. A Wire-grid model for scattering by conducting bodies // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1966. Vol. AP-14. No. 6. P. 782–786.
7. Rubinstein A., Rachidi F., Rubinstein M. On wire-grid representation of solid metallic surfaces // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2005. Vol. 47. No. 1. P. 192–195.
8. Lee K.S.H., Marin L., Castillo P. Limitations of wire-grid modeling of a closed surface // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 1976. Vol. EMC-18. No. 3. P. 123–129.
9. Mayhan J.T. Characteristic modes and wire grid modeling // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1990. Vol. 38. No. 4. P. 457–469.
10. Trueman C.W., Kubina S.J. Fields of complex surfaces using wire grid modeling // IEEE Transactions on magnetics. 1991. Vol. 27. No. 5. P. 4262–4267.
11. Rubinstein A., Rubinstein M., Rachidi F. A physical interpretation of the equal area rule // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2006. Vol. 48. No. 5. P. 258–263.
12. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение / Т.Р. Газизов [и др.] // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5-2 (102). С. 425–432.
13. Система TALGAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://talgat.org/talgat-software/>, свободный. – (дата обращения: 10.10.2021).
14. Система EMPro [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html>, свободный. – (дата обращения: 10.10.2021).

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 004.94

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef3f4c51.56750950

## ИМИТАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ANYLOGIC И STATISTICA

**Антон Владиславович Холкин**, студент, ltonyhol1@gmail.com

**Александр Дмитриевич Павлов**, ассистент каф. АСОИУ  
googlabot@gmail.com

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань

*Аннотация. В данной статье описывается имитационная модель участка дороги в городе Казани, созданная с помощью системы имитационного моделирования AnyLogic. Описан процесс создания имитационной модели, оптимизация средствами СИМ AnyLogic, построена математическая модель потока автомобилей по результатам имитационного эксперимента с помощью программного пакета STATISTICA 10.*

*Ключевые слова: имитационное моделирование, дорожное движение, AnyLogic.*

### SIMULATION AND MATHEMATICAL MODELING OF AUTOMOBILE TRAFFIC BY MEANS OF ANYLOGIC AND STATISTICA

Anton V. Kholkin, Aleksandr D. Pavlov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan

*Abstract. This article describes a simulation model of a road section in the city of Kazan, created using the AnyLogic simulation modeling system. The process of creating a simulation model, optimization by AnyLogic SIM tools is described, a mathematical model of the flow of cars is constructed based on the results of a simulation experiment using the STATISTICA 10 software package.*

*Keywords: simulation modeling, traffic, AnyLogic.*

Анализ и моделирование процесса движения автомобилей по участку дороги является ключевым для организации дорожного движения и введения новых участков дорог для разгрузки существующих транспортных узлов с целью повышения их пропускной способности.

В настоящей работе рассматривается упрощенная модель участка дороги и приводится математическая интерпретация результатов имитационного эксперимента средствами программного пакета STATISTICA 10 [1].

Процесс моделирования участка дорожной сети осуществляется средствами системы имитационного моделирования (СИМ) AnyLogic. AnyLogic содержит специальную библиотеку для моделирования дорожного трафика «Библиотека дорожного движения» [2]. Библиотека позволяет визуализировать движение потока машин в реальном времени, а также моделировать движение различного вида транспорта – легкового, грузового,



транспортного, позволяет добавлять парковочные места, остановки общественного транспорта и т.п. В настоящей работе моделируется движение по центральным улицам города Казани – пересечение улиц Карла Маркса и Большая Красная с улицами Лобачевского, Театральная и Пушкина (рисунок 1). Модель строится на основе спутникового снимка местности, на который накладывается элемент «Дорога» из палитры библиотеки дорожного движения. Для остальных участков дороги предусмотрены свои соответствующие элементы секции «Разметка пространства»: «Перекресток», «Стоп-линия», «Автобусная остановка», «Парковка» - все эти элементы добавляются на моделируемый участок дороги в соответствии с их реальным месторасположением.



Рисунок 1 – Моделирование участка дороги в СИМ AnyLogic

После создания дорожной модели необходимо задать логику движения автомобилей по ней – для этого создается диаграмма процесса. Диаграмма процесса строится на основе блоков, моделирующих сценарии движения потоков машин. На рисунке 2 приведен пример одного из участков дорожной модели – логика движения автомобилей до парковочных зон.

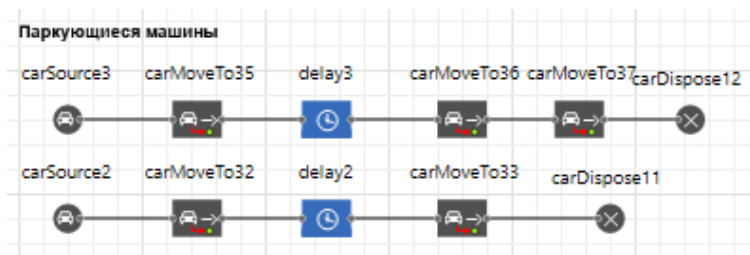


Рисунок 2 – Логика движения автомобилей до парковочных зон

Одними из основных блоков модели являются CarSource и CarDispose соответственно добавляющими и выводящими из модели агентов (автомобили) указанного типа. В приведенной модели существует 3 вида

агентов: легковой автомобиль, грузовой (с его помощью также моделируется аварийная ситуация), автобус. Блок CarMoveTo моделирует движение автомобиля к цели движения, блок TrafficLight моделирует светофор. С помощью блока Delay моделируется задержка – время парковки либо время посадки и высадки пассажиров общественного транспорта, а также моделирование аварийной ситуации на дороге. Для проведения оптимизации моделируемого процесса в модель добавляются такие блоки как RoadNetworkDescriptor и Histogram для вывода собранных статистических данных, а также несколько параметров (переменных). Помимо этого, в модель добавлены ползунки, позволяющие в режиме реального времени менять интенсивность движения транспорта по определенной дороге [3].

Для построения математической модели необходимо получить данные имитационного эксперимента. Для этого стандартными средствами системы AnyLogic был создан оптимизационный эксперимент [4], при проведении которого методом подбора выбираются наиболее оптимальные значения для минимизации функционала (целевой функции). В данной работе рассматривается минимизация времени проезда автомобиля по участку дороги за счет оптимизации сигналов светофора, следовательно, целевой функцией является среднее время пребывания агента в системе, параметрами – фазы светофора. Первой фазе светофора соответствует переключение сигнала с зеленого на красный, второй фазе – с красного на зеленый. Таблица 1 содержит описание ключевых параметров оптимизации.

*Таблица 1 – Описание ключевых параметров оптимизации*

Параметр, сек.	Описание
p1	первая фаза светофора на пересечении ул. Карла Маркса и ул. Лобачевского
p2	вторая фаза светофора на пересечении ул. Карла Маркса и ул. Лобачевского
p3	третья фаза светофора на пересечении ул. Карла Маркса и ул. Театральной
p4	первая фаза светофора на ул. Карла Маркса и ул. Театральной
p5	вторая фаза светофора на ул. Карла Маркса и ул. Пушкина
p6	первая фаза светофора на пересечении ул. Карла Маркса и ул. Пушкина
Функционал	Оптимизируемая (целевая) функция

Модель оптимизационного эксперимента содержит блок File для вывода статистических данных с целью дальнейшего анализа в программном пакете STATISTICA. В процессе подбора оптимальных значений в файл записывается каждая итерация с шагом 1, минимальное значение параметра – 10, максимальное – 240. Результат выполнения оптимизационного эксперимента представлен на рисунке 3.

Для построения математической модели полученные статистические данные импортируются в программный пакет STATISTICA 10. В качестве математической модели необходимо получить уравнение множественной

регрессии для целевой функции – среднего времени пребывания агента в дорожной системе. Предварительное вычисление парных коэффициентов линейной корреляции говорит о том, что существует некоторая взаимосвязь между исходными параметрами.

	Текущее	Лучшее
Итерация:	312	209
Функционал:	21.308	21.308
<b>Параметры</b>	Copy best	
км4	250	250
л1	250	250
т1	200	200
км1	500	500
бк1	250	250
п3	20	20
т3	15	15
р1	184	184
р2	43	207
р3	209	240
р4	23	23
р5	43	43
р6	198	190

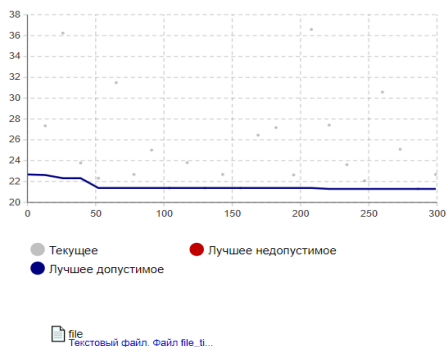


Рисунок 3 – Результат выполнения оптимизационного эксперимента

После проведения линейного регрессионного анализа средствами STATISTICA 10 было получено следующее уравнение множественной регрессии для целевой функции среднего времени пребывания автомобиля на данном участке дороги:

$$y = 27,03001 + 0,0006 \cdot p_1 + 0,00708 \cdot p_2 - 0,01065 \cdot p_3 - 0,00535 \cdot p_4 - 0,00884 \cdot p_5 - 0,00376 \cdot p_6$$

Полученная математическая модель описывает зависимость времени проезда автомобилем участка дороги от времени переключения сигналов светофора. Полученную математическую модель в дальнейшем можно существенно улучшить за счет получения более точных исходных значений, приближенных к реальным.

### Список литературы

1. Официальный сайт STATISTICA [Электронный ресурс] – URL: <https://statsoft.ru> (дата обращения: 06.10.2021).
2. Официальный сайт AnyLogic [Электронный ресурс] – URL: <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 06.10.2021).
3. Боев В.Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7 / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2014. – 432 с.
4. Оптимизационный эксперимент [Электронный ресурс] – URL: <https://help.anylogic.ru/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fexperiments%2FOptimization-experiment.html>.

Материал принят к публикации 12.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef4d7d55.34847065

## РАЗРАБОТКА ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ 1290ЕФ1

**Алексей Николаевич Школин**

Брянский государственный технический университет, научн. сотр., к.т.н.  
Россия, Брянск, uxe@yandex.ru

*Аннотация. Рассмотрен вопрос разработки поведенческой модели микросхем импульсных преобразователей напряжения на примере микросхемы отечественного производства 1290ЕФ1. В целях проверки адекватности модели с учетом частотных характеристик приведены рекомендации и основные требования при выполнении натурного и численного эксперимента по определению частотных характеристики данного вида нелинейных динамических объектов.*

*Ключевые слова: импульсные преобразователи напряжения, микросхемы, моделирование, частотный анализ, поведенческая модель.*

### DEVELOPMENT OF BEHAVIORAL MODEL FOR SWITCHING VOLTAGE REGULATOR MICROCIRCUIT 1290EF1

Alexei N. Shkolin

Bryansk State Technical University, research associate, associate professor, candidate of technical sciences, Russia, Bryansk, uxe@yandex.ru

*Abstract. The issue of developing a behavioral model of pulse voltage converter IC is considered on the example of a microcircuit of domestic production 1290EF1. In order to verify the adequacy of the model, taking into account its frequency characteristics, recommendations and basic requirements are given when performing a full-scale and numerical experiment to determine the frequency characteristics of such type of nonlinear dynamic objects.*

*Keywords: switching voltage converters, microcircuits, simulation, frequency response analysis, behavioral model.*

На сегодня импульсные источники достаточно широко применяются в различных устройствах электропитания, что связано с их высокими показателями энергетической эффективности и малыми массогабаритными показателями. При этом часто электрическая схема таких источников электропитания основана на использовании в своем составе специализированных интегральных микросхем (ИМС) импульсных регуляторов напряжения (ИРН).

Современный подход к разработке импульсных источников питания часто включает в себя этап частичного или полного моделирования такой системы. В последнем случае для выполнения моделирования полной электрической схемы разработчику требуется иметь в своем распоряжении

модели микросхем, что на практике часто является сложно преодолимой проблемой.

В рамках данной работы была разработана поведенческая модель интегральной микросхемы импульсного регулятора напряжения 1290ЕФ1 отечественного производства. Данная ИМС представляет собой ИРН понижающего типа с токовым управлением, встроенным силовым ключом, наличием выводов для подключения цепи частотной коррекции и цепи, задания частоты преобразования в диапазоне от 0,5 МГц до 4 МГц.

При разработке модели наиболее труд затратным этапом являлась экспериментальная часть, связанная с определением динамических свойств объекта моделирования и дальнейшая проверка адекватности самой модели [1]. Для этого было выполнено натурный и численный эксперимент по определению частотных характеристики. Частотные характеристики встроенного в микросхему блока усиления ошибки по выходному напряжению ИРН приведена на рис. 1.

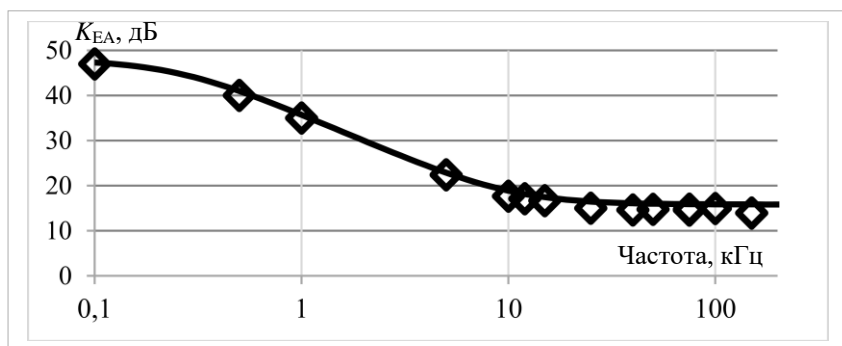


Рисунок 1 – Аппроксимация ЛАЧХ коэффициента усиления усилителя ошибки  $K_{EA}$

Согласно полученным экспериментальным данным ЛАЧХ была выведена для нее аппроксимирующая зависимость, в которой присутствует полюс на частоте 250 Гц и ноль на частоте 10,1 кГц и статический коэффициент усиления на уровне порядка 48 дБ. Найденный ноль ЛАЧХ относился с цепи компенсации, подключенной к выводу СОМР микросхемы, а найденный полюс и статический коэффициент усиления были использованы при составлении модели встроенного усилителя ошибки в рамках общей поведенческой модели ИМС 1290ЕФ1. Как видно из рис. 1 погрешность описания ЛАЧХ не превышала единиц процента.

#### Список литературы

1. Middlebrook R. D. Measurement of loop gain in feedback systems // International Journal of Electronics. 1975. № 4 (38). С. 485–512.

*Материал принят к публикации 18.10.21.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ САПР РЛС В СОЗДАНИИ И КОМПЛЕКСНОЙ ОТЛАДКЕ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ ЗАГОРИЗОНТНЫХ РЛС К ИОНОСФЕРНОЙ ОБСТАНОВКЕ

**Андрей Олегович Щирый**

АО «НПК «НИИДАР», ст.научн.сотр., к.т.н.

Россия, Москва, andreyschiry@gmail.com

*Аннотация. Обсуждается возможность применения опыта и разработок, полученных в ходе создания отечественной САПР РЛС, к задачам разработки и комплексной отладки новых подходов и алгоритмов адаптации загоризонтных РЛС к ионосферной обстановке; речь идет об опыте комплексного имитационного моделирования РЛС и их частей.*

*Ключевые слова: имитационное моделирование, мультиагентное моделирование, радиозондирование ионосферы, загоризонтная радиолокация.*

### USING OF EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF RADAR CAD IN THE DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR ADAPTING OVER-THE-HORIZON RADARS TO THE IONOSPHERIC ENVIRONMENT

Andrey O. Schiryi

NIIDAR, Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences

Russia, Moscow, andreyschiry@gmail.com

*Abstract. The possibility of using the experience and developments gained during the creation of the radar CAD to the tasks of developing algorithms for adapting over-the-horizon radars to the ionospheric environment is discussed. Special attention is paid to the experience of complex radar simulation.*

*Keywords: simulation, ionospheric chirpsounding, over-the-horizon radars.*

Работа радиолокационных станций (РЛС) загоризонтного обнаружения (ЗГО) основана на способности декаметровых (ДКМ) радиоволн многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования РЛС ЗГО является адаптация к ионосферным условиям. Существующие модели ионосферы не способны обеспечить приемлемую точность в интересах РЛС ЗГО. Поэтому для адаптации к ионосферным условиям проводят оперативную диагностику ионосферы [1-4], состояние которой зависит от времени, гелио- и геомагнитной активности, и других факторов, носящих случайный характер.

Из всех методов оперативной диагностики состояния ионосферы, в свете решаемых задач, наибольший интерес представляют вертикальное, наклонное, и возвратно-наклонное зондирование ионосферы (соответственно ВЗИ, НЗИ, ВНЗИ) коротковолновыми радиосигналами [3,4]. Основным способом представления данных радиозондирования является ионограмма. В случае

НЗИ ионограмма – это зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты зондирования и времени группового запаздывания радиоволны.

В задаче адаптации РЛС ЗГО крайне перспективным представляется использование достижений машинного обучения: сначала для обработки данных НЗИ и ВНЗ, далее для построения предиктивной модели состояния ионосферы. Наиболее сложной задачей при автоматизации обработки ионограмм является выделение треков мод сигнала: треки требуется выделить не только на фоне помех, но и отделить друг от друга, что является нетривиальной задачей. Далее, может быть нужно классифицировать треки по типам мод распространения (что, вообще говоря, может быть и не обязательно для адаптации РЛС ЗГО, но это зависит от алгоритмов адаптации: если алгоритм будет полагаться на существующую модель ионосферы, а идентифицированные треки использовать для калибровки модели, то этап нужен). Указанным процессам соответствуют классические задачи из теории обучения машин: задача кластеризации и задача классификации. Перспективным представляется применение глубокого обучения, способного выделять признаки самостоятельно. Важно понимать, что применение глубокого обучения требует больших обучающих выборок, причем размеченных данных; это требование вызвано большим числом внутренних параметров в моделях такого типа (а объектов для обучения должно быть гораздо больше, чем параметров модели, иначе модель просто «переобучится»). Также перспективно применение рекуррентных нейронных сетей, поскольку объекты на ионограмме имеют вполне «рекуррентную» природу (есть явная аналогия с обработкой сонограмм звучащей речи рекуррентными нейронными сетями с целью распознавания).

Для ныне существующих классов РЛС ЗГО надводных и воздушных целей с дальностью обнаружения до 3000 км полная автоматизация обработки данных диагностики ионосферы позволит существенно улучшить ТТХ (улучшить время реакции на обнаруженные угрозы и устранить влияние человеческого фактора) и эксплуатационные характеристики (устранение необходимости в подготовленных специалистах по интерпретации данных диагностики на каждом пункте управления РЛС); для несуществующего (уже и пока) РЛС ЗГО класса системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) с дальностью обнаружения до 10000 км (дальность «по земле») является необходимым условием возрождения систем данного класса [5] (работы по системам данного класса были прекращены по неудовлетворительным результатам опытной эксплуатации РЛС «Дуга»).

При этом обработку и отладку новых моделей ионосферы и алгоритмов адаптации необходимо производить с учетом условий и режимов функционирования РЛС ЗГО. Сложность самой развиваемой системы РЛС ЗГО, большая вариативность и неопределенность фоно-целевой обстановки приводят к невозможности произвести аналитическое сравнение всех возможных вариантов архитектуры системы в целом по всем ее параметрам и сделать ее однозначный рациональный выбор. Традиционным выходом в

такой ситуации было проведение множества натуральных испытаний. Однако дороговизна подобных испытаний в случае с образцами вооружения и военной техники, и тем более невозможность проведения натуральных испытаний в ряде случаев (пример, массированный удар межконтинентальных баллистических ракет) заставляет искать другие решения. Наиболее приспособленными для оценки эффективности сложных систем без проведения натуральных испытаний являются модели имитационного типа. Поэтому имитационное моделирование будет использовано здесь как для отработки новых методов и алгоритмов, так и для проверки достигнутых тактико-технических характеристик (ТТХ). И делается это посредством имитации различных вариантов оперативной, фоно-целевой, и геофизической обстановки, в различных режимах работы РЛС, при наличии или отсутствии помехового противодействия, с учетом сценариев действий сил и средств в периоды мирного времени, в периоды оперативного развертывания, в периоды ведения боевых действий.

Работы будут вестись с опорой на имеющийся у автора опыт участия в разработке отечественной системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС) [6-12] в части архитектуры моделирующей системы, общих концепций и подходов организации имитационного моделирования (мультиагентного типа, по дискретно-событийной схеме), особенностей имитационного моделирования боевых действий, а также создания частных моделей РЛС и их составных частей.

С алгоритмической и программно-архитектурной точки зрения потребная система имитационного моделирования состоит из диспетчера моделирования (и других «системных» частей, таких как визуализатор и редактор боевых сценариев), и имитационных моделей агентного типа, представляющих сущности моделируемой области, среди которых особое место занимает имитатор фоно-целевой обстановки. Функции диспетчера моделирования: чтение сценария, созданного пользователем и содержащего исследуемую конфигурацию сил и средств; загрузка и инициализация имитационных моделей (в том числе имитатора фоноцелевой обстановки); запуск сценария, управление имитационными моделями в процессе моделирования и мониторинг хода его исполнения. Описанная мультиагентная система работает по дискретно-событийной схеме, для реализации которой программно ведется динамическая очередь задач, управляемая диспетчером имитационного моделирования, который определяет порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями). Это делается для синхронизации "модельного времени", причем в условиях, когда модельные агенты "шагают" по времени исходя из своей внутренней логики, временными интервалами произвольного размера. Каждое событие, помещаемое в очередь задач, регистрируется на определенное модельное время. В процессе моделирования происходит логирование (сохранение в файлы) состояний системы в целом и атрибутов отдельных агентов. Полученные лог-файлы являются предметом дальнейшего



рассмотрения и анализа. По результатам моделирования оцениваются боевые возможности и боевая эффективность.

### Список литературы

1. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С.Ф. Боева. – М.: Техносфера, 2017. 492 с.
2. Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Служкин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы: Учебное пособие / Под ред. А.И. Николаева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 349 с.
3. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолоний: монография / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2013. – 147 с. – ISBN 978-5-94808-762-7.
4. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. – СПб., 2007. – 19 с.
5. Щирый А.О. О перспективах использования некоторых современных достижений ионосферного радиозондирования при воссоздании 3Г РЛС эшелона СПРН // Радиолокация, навигация, связь (RLNC2019): сб. тр. XXV Международной научно-технической конференции: в 6 т. / Воронежский гос. ун-т; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Изд-й дом ВГУ, 2019. – Т.3. – с.226-234.
6. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017, № 20. с.127-130.
7. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Концепция многоуровневого проектирования РЛС в разрабатываемой САПР РЛС полного сквозного цикла // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т.17. № 4. с.889-892.
8. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2018, Т.10, №1. с.40-47.
9. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №3. с.30-34.
10. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019, Т.11, №1. с.4-11.
11. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР // Вестник воздушно-космической обороны. 2020, № 4 (28). С.111-118.
12. Коновальчик А.П., Щирый А.О. Алгоритмы диспетчеризации и управления модельным временем в перспективной системе автоматизированного проектирования радиолокационных станций // Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Информатика и вычислительная техника"», 27-28 февраля 2020 г., г. Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА». – Анапа, 2020. – с. 142-153.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ»**

SECTION «MODELING AND IDENTIFICATION OF NONLINEAR  
DYNAMIC SYSTEMS AND PROCESSES»

УДК 681. 62-50

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef63e8b0.46491776

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ  
В ПРОЦЕССЕ ПРЯДЕНИЯ**

*Гулчехра Рахимжоновна Алимова*, докторант кафедры “Системы обработки информации и управления”, alimova250479@mail.ru

*Исамиддин Хакимович Сиддиков*, д.т.н., профессор кафедры “Системы обработки информации и управления”, isamiddin54@gmail.com

Ташкентский государственный технический университет  
Узбекистан, Ташкент

*Аннотация. В работе рассмотрены вопросы создания математической модели процесса вытягивания ленты с учетом натяжения нити. Для этой цели определены зависимость между натяжением нити и скоростью вращения электроприводов. Предложенная математическая модель процесса позволяет синтезировать высокоэффективные системы управления оборудования прядильного производства.*

*Ключевые слова: наматывания ленты, вытягивания, упругость, погрешность, тяговая устройства.*

**RESEARCH OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL  
OF THE THREAD TENSION SPEED IN THE SPINNING PROCESS**

Gulchekhra R. Alimova, doctoral student of the Department of Information Processing and Control Systems, alimova250479@mail.ru

Isamiddin Kh. Siddikov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Processing and Control Systems, isamiddin54@gmail.com

Tashkent State Technical University, Uzbekistan, Tashkent

*Abstract. The paper deals with the creation of a mathematical model of the process of stretching the tape, taking into account the tension of the thread. For this purpose, the relationship between the thread tension and the speed of expression of the electric drives is determined. The proposed mathematical model of the process allows one to synthesize highly efficient control systems for spinning equipment.*

*Keywords: tape winding, stretching, elasticity, error, traction device.*

Прядильное изделие отличается большой длиной и относительно малыми поперечными размерами. Этим обусловлено продольное осевое перемещение полуфабрикатов через рабочий узел машины путем размазывания их из одной емкости и наматывания на другую технологических операциях.

При этом происходит непрерывное формирование последовательных участков изделия из потоков полуфабрикатов. Наличие нескольких таких

взаимозависимых во времени потока требует обеспечения постоянства соотношения их поступления в рабочий узел в условиях действия различных возмущений. При всей своей кажущейся простоте непрерывное движение и операции на волокне представляют собой сложный процесс, включающий себя постоянные и переменные составляющие волновые импульсы колебания струны и т.д.) [1, 2]. Ролики и колеса участвующие в продвижении волокна, могут иметь несогласованность движений как следствие отклонений диаметров ленты от номинальных размеров, так и из-за люфтов, трения, износа кинематических пар и т.д. эта несогласованность может увеличиваться при независимом приводе отдельных механизмов и в переходных режимах [3].

Действие продвигающих пряжи устройств основано на законах простой механики, и так как масса волокно невелика по сравнению с массой и моментом инерции протягивающих и направляющий устройств, то чаще эти законы рассматриваются применительно названным устройствам, а не к волокну. Все это нарушает поддержание постоянной величины указанного соотношения и, следовательно, влияет на качество готового изделия. С другой стороны, качество последнего зависимость также от работ рабочего органа (узла) [4].

Таким образом, в качестве основных задач управления технологическими операциями в прядильном производстве следует выделить:

1. Управление непосредственно самими рабочими узлами, с помощью которых осуществляются технологические операции на вытяжной ленте;
2. Управление скоростью и натяжением вытягиваемой лены в области рабочего узла.

В операции наматывания ленты необходимо рассматривать переходный процесс или изменение во времени характера эластичный ленты. Затем необходимо стремится разрешить задачи связанной с исследованием статических и динамических свойств механической системы, характеризуемой сосредоточенными или распределенному параметрами (масса, упругость затухание и т.д) [5]. Для решения задачи автоматизации процесса регулирования технологических параметров вытягиваемой ленты (плотность) рассмотрим зависимость между натяжениями и скоростями тяговых устройств в области рабочего узла.

На участке между двумя тяговыми устройствами растяжению ( $T$ ) подвергается отрезок технологического звена, поступающий из предыдущего промежутка натяжением  $T$ . Ненапряженная длина отрезка  $l_0$  и между тяговыми устройствами может быть определена из выражения

$$l_0 = \frac{l}{1 + \xi},$$

где  $l$ -напряженная длина отрезка нити;

$\xi = \frac{T}{SE}$  - относительное упругое удлинение ( $S$  и  $E$ -поперечное сечение и модуля упругость волокна).

От действия натяжения  $T$ - $T$  отрезок  $l_0$  удлинится. Величина относительного упругого удлинения  $\xi(t)$  описывается уравнением Максвелла [3]

$$\xi(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{\eta} \int_0^t \sigma(t) dt, \quad (1)$$

где-  $\sigma(t)$  - напряжение нити в функции времени;

$\eta$  -коэффициент, обратно пропорциональный вязкости. При неизменном натяжении уравнению (5) принимает вид

$$\xi = \frac{K_k}{l_0} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma T}{\eta}, \quad (2)$$

где  $K_k$  –абсолютное упругое удлинение,

$T = \frac{l}{V_2}$  -время прохождения элементарного отрезка нити на участке между тяговыми устройствами.

Удлинение  $\eta_n$  с учетом (4) равно

$$K_H = \frac{V_2 \Delta t}{1 + \frac{T_2}{SE}} \cdot \frac{T_2 - T_1}{S} \left( \frac{1}{k} + \frac{T}{\eta} \right). \quad (3)$$

С другой же стороны

$$K_H = V_2 \Delta T - V_1 \Delta t. \quad (4)$$

Приравнивая друг к другу правые части уравнений (3) и (4) обозначая  $ES = a$

с учетом  $\frac{T_1}{SE} \ll 1$  имеем

$$T_2 = T_1 + \left( \frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \frac{a \epsilon}{\epsilon + aT}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что натяжение ленты в области рабочего узла зависит от скорости тяговых устройств. Влияние возмущающих воздействий на натяжение определяется по формуле (9):

$$\sigma T_2 = \frac{\Delta T_2}{T_2} = \left[ \frac{V_{20} a_0 b_0}{T_{20} V_{20} (b_0 + T_0 a_0)} \cdot \frac{(T_{20} - T_{10}) a_0 T_0}{T_{20} (b_0 + a_0 T_0)} \right] \sigma V_2 - \frac{V_{20} a_0 b_0}{V_{10} (b_0 + a_0 T_0)} \sigma V_1 + \frac{T_{10}}{T_2} \sigma T_1 + \frac{T_{20} - T_{10}}{T_2} \left( \frac{b_0 \delta a_0 + T_0 a_0 \delta b}{b_0 + a_0 T_0} \right), \quad (6)$$

где  $\delta$  - относительная погрешность ( $T_{10}, T_{20}, a_0, b_0, V_1, V_{20}$ ) значения величины в установившемся режиме. Для определения погрешности  $\delta V_2$  используем уравнение механической характеристики электропривода устройства

$$\delta M_{D_2} = \delta i_2 + \frac{1}{\eta i_{20} M_{D_{20}}} \left[ M_{c_0} \delta M_{c_0} + R_R T_{20} \delta T_2 - \frac{V_{cy_0}}{V_{20}} T_{30} R_2 (\delta V_3 - \delta V_2 + \delta T_3) \right], \quad (7)$$

где  $\delta M_{CB}$  -погрешность из изменения статического момента:  $\delta V_3$  и  $\delta T_3$  - погрешность скорости и натяжение. Погрешность  $\delta T_2$  в выражении (7) можно представить в виде

$$\delta T_2 = \delta T_2' + \delta T_2'',$$

где  $\delta T_2'$  включает в себя слагаемые (10) с сомножителями  $\delta V_2$  и  $\delta V_1$ ,  $\delta T_2''$  - остальные слагаемые. Тогда составляющую  $\delta T_2'$  можно уменьшить увеличением  $K_{c_2}$ , применением высокоточного датчика скорости и стабилизированного источника напряжения  $U_3$ , а  $\delta T_2''$ -регуляторами, непосредственно измеряющими натяжение технологического звена.

Однако реализация последнего предложения при натяжении ленты сдерживается отсутствием испытанных и надежных датчиков натяжения. При этом регулирования скорости отдающего и приемного устройств зависимости от радиусов намотка барабанов требует установки электромеханических компенсаторов. Таким образом, задача сводится в первую очередь к регулированию скорости и натяжения технологического звена между тяговыми устройствами что достигается управлением их электроприводами.

Для этого предлагаются две системы. Первая-следающая система электрического вала; во второй соотношения скоростей поддерживается с подошью частотных тахогенераторов и модулей комплекса типовых логических элементов микроконтроллере.

#### Список литературы

1. Битус Е.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов формирования гребенной ленты в шерстопрядении / Е. И. Битус. - Москва: Знание, 2007. - 238 с. : ил.
2. Ванин А.С., Козлов А.Б. Компьютерное моделирование нейросетевого регулятора // Текстильная промышленность (научный альманах), 2008.-№4. с.56-58.
3. И.Х.Сиддиков, Д.А.Халматов, Г.Р.Алимова. Адаптивно-нечеткая система автоматической регулирования вытяжки ленты//Текстильный журнал Узбекистана. 2020. №1. С.77-84
4. Hakimovich, S.I., Olimovich, K.U., Nikolayevna, I.R., Tashkenboevna, Y.S., Raximjonovna, A.G. Design of standart regulators for multi-link control objects. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education, 2021, 12(7), стр. 349-353
5. D.A.Khalmatov, U.O.Khuzhanazarov, G.R.Alimova, J.M.Murodov. (2021) Adaptive fuzzy control system for multi-dimensional dynamic object under the conditions of uncertainty of information, International journal of advanced research in science, engineering and technology vol. 8, issue 2 , february 2021. pp.16608-16612.

*Материал принят к публикации 28.09.21.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОЛЕБАНИЯ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

**Дмитрий Яковлевич Антипин**, директор УНИТ, доцент, к.т.н.  
adya24@rambler.ru

**Николай Александрович Лукашов**, аспирант каф. «ПСЖД»  
lukashov32@gmail.com

**Елена Витальевна Лукашова**, ассистент каф. «МиДПМ»  
leno4kachepikova@gmail.com

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

*Аннотация. Качество перевозок на железнодорожном транспорте во многом зависит от комфортного и безопасного передвижения пассажиров. Методом компьютерного моделирования были найдены частоты и формы колебаний кузова, оказывающие на человеческий организм отрицательное воздействие.*

*Ключевые слова: кузов пассажирского вагона, конечно-элементная модель, жесткость кузова, низкочастотные колебания, первый режим изгибных колебаний.*

### MODELING OF VIBRATION PROCESSES OF PASSENGER CAR BODY

Dmitry Ya. Antipin, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport, Docent, Candidate of Technical Sciences, adya24@rambler.ru

Nikolay Al. Lukashov, post-graduate student of the department "Rolling stock of railways",  
lukashov32@gmail.com

Elena V. Lukashova, assistant of the department "Mechanics and dynamics and strength of machines",  
leno4kachepikova@gmail.com  
Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk

*Abstract. The quality of rail transport largely depends on the comfortable and safe movement of passengers. By the method of computer modeling, the frequencies and modes of vibration of the body, which have a negative effect on the human body, were found.*

*Keywords: passenger car body, finite element model, body stiffness, low-frequency vibrations, first bending vibration mode.*

При проектировании пассажирских вагонов, одной из основных задач является снижение вибрационной нагруженности кузова, которая оказывает неблагоприятные воздействия на пассажиров и обслуживающий персонал поезда. При движении по железнодорожному пути, кузов вагона испытывает колебания, которые зависят от неровностей пути и конструктивных особенностей кузова. В месте соприкосновения колеса с рельсом появляются возмущения, которые обладают нелинейными функциями, являющиеся источником вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона.

Для определения низкочастотных колебаний инженерами используются три основных метода: экспериментальный, аналитический и метод

компьютерного моделирования. Два первых являются более затратными и требуют больше времени на исследование, поэтому на данный момент все большее распространение получил метод компьютерного моделирования.

Единым показателем, который позволяет оценить влияние конструктивных особенностей кузова на его динамические показатели, является частота первого режима изгибных колебаний кузова. Значение частоты во многом зависит от изгибной жесткости несущей конструкции кузова вагона [1].

Первый режим вертикального изгиба, также является основным при нарушении комфорта пассажиров. Диапазон частот, соответствующих данному режиму, является чувствительным для человеческого организма [2].

Смещение кузова  $w_c(x, t)$  является результатом наложения двух режимов колебаний - отскока  $z_c$  и первого режима собственных колебаний кузова - вертикального изгиба (симметричного изгиба). Смещение определяется по формуле:

$$w_c(x, t) = z_c(t) + \left(x + \frac{L_c}{2}\right) \theta_c(t) + X_c(x) T_c(t); \quad (1)$$

где  $T_c(t)$ - координата вертикального изгиба кузова,  $X_c(x)$ - представляет собой естественную функцию вибрационной моды, определяемую уравнением:

$$X_c(x) = \sin \beta_c x + \sinh \beta_c x - \frac{\sin \beta_c L_c - \sinh \beta_c L_c}{\cos \beta_c L_c - \cosh \beta_c L_c} (\cos \beta_c x + \cosh \beta_c x), \quad (2)$$

где

$$\beta_c = \sqrt[4]{\omega_c^2 p_c / EI},$$

и

$$\cos \beta_c L_c \cosh \beta_c L_c - 1 = 0,$$

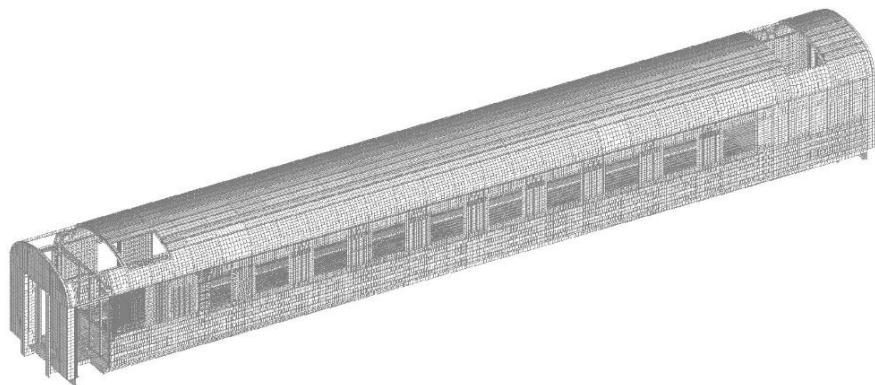
где  $\omega_c$ - собственная частота колебаний кузова. Каждая колесная база  $2ab$  представлена твердым телом массой  $m_b$  и инерционным моментом  $J_b$ , который способен выполнять два движения в вертикальной плоскости, такие как отскок ( $zbi$ ) и уклон ( $\theta bi$ ), для  $i = 1, 2$ .

В качестве объекта исследования был принят пассажирский вагон модели 61-4516 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

С помощью описанной методики была определена величина собственных изгибных колебаний кузова пассажирского вагона, которая составляет 10,94 Гц.

На основе полученных данных, была смоделирована пластинчатая конечно-элементная модель кузова пассажирского вагона, для определения собственных частот колебаний кузова в программном комплексе Simcenter Femap. Масса кузова вместе с оборудованием и внутренним интерьером

равномерно распределена по всем узлам конечно-элементной модели (рис.1). Созданная конечно-элементная модель демонстрирует собой оболочечную структуру, имеющую подкрепления, встраиваемые по срединной поверхности, на которой обшивка и каркас кузова выполнены трех узловыми и четырех узловыми пластинчатыми составляющими. Расчетная пластинчатая модель имеет 242 тыс. элементов, а число степеней свободы составляет более 900 тыс.



*Рисунок 1 – Конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона*

В конечном итоге было установлено, что предельные значения среднеквадратичного ускорения вагона были получены в центре кузова на напольном покрытии, при скоростях движения 80 - 120 км/ч.

Полученные всплески значений среднеквадратичных ускорений соответствуют диапазону частот от 7 до 18 Гц.

Исходя из этого было установлено, что для увеличения качества перевозок людей на железнодорожном транспорте, одной из первостепенных задач ставится увеличение частоты собственных изгибных колебаний, за счёт повышения жесткости кузова.

#### **Список литературы**

1. *Dumitriu, M.* Ride comfort enhancement in railway vehicle by the reduction of the car body structural flexural vibration / M. Dumitriu // Department of Railway Vehicles, University Politehnica of Bucharest, 313 Splaiul Independenței, 060042, Bucharest, Romania.
2. *Takahiro T. and Tadao T.* 2010 Reduction of bending vibration in railway vehicle carbody using carbody–bogie dynamic interaction Veh. Syst. Dyn. 48 467–486.
3. *CEN.* Railway applications – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation. EN 12299:2009, European Committee for Standardization, Brussels.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*



УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef7c2010.10019828

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПЭО

**Вета Робертовна Аубакирова**, ст. преподаватель, к.т.н., veta\_mr@mail.ru

**Гузель Рагиповна Мукаева**, доцент, к.т.н., mukaeva.guzel@yandex.ru

**Рузиль Галиевич Фаррахов**, доцент, к.т.н., frg1982@mail.ru

**Аким Витальевич Буторин**, магистрант, akim-butorin@mail.ru

**Евгений Владимирович Парфенов**, профессор, д.т.н., evparfenov@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет  
Россия, Уфа

*Аннотация. Рассмотрен вопрос математического моделирования толщины покрытия, тока и потенциала коррозии в зависимости от типа импульсного электрического режима обработки, частоты импульсов и длительности обработки.*

*Ключевые слова: оксидирование, биорезорбируемый магниевый сплав, математическое моделирование.*

### MATHEMATICAL MODELS OF COATING PROPERTIES UNDER DIFFERENT TECHNOLOGICAL MODES OF PEO

Veta R. Aubakirova, senior lecturer, candidate of technical sciences, veta\_mr@mail.ru

Guzel R. Mukaeva, associate professor, candidate of technical sciences, mukaeva.guzel@yandex.ru

Ruzil G. Farrakhov, associate professor, candidate of technical sciences, frg1982@mail.ru

Akim V. Butorin, student, akim-butorin@mail.ru

Evgeny V. Parfenov, professor, doctor of technical sciences, evparfenov@mail.ru

Ufa State Aviation Technical University, Russia, Ufa

*Abstract. The issue of mathematical modeling of the coating thickness, current and corrosion potential depending on the type of pulsed electrical processing mode, pulse frequency and processing duration is considered.*

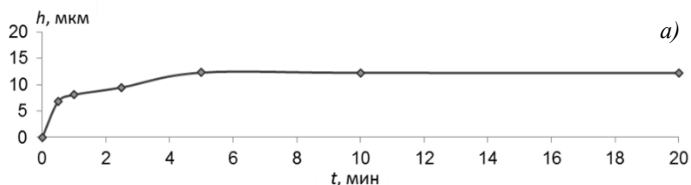
*Keywords: oxidation, bioresorbable magnesium alloy, mathematical model.*

Магний и его сплавы имеют применение в различных отраслях промышленности, например, в аэрокосмической и автомобильной. Также биосовместимые магниевые сплавы вызывают интерес для изготовления биорезорбируемых имплантатов [1]. Важной задачей для повышения эксплуатационных свойств изделий из магниевых сплавов является формирование защитных покрытий. Большими перспективами в данной области обладает экологичный и производительный процесс плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). [2] Однако, ПЭО сложный и нелинейный процесс, поэтому математическое моделирование свойств покрытия позволит сократить время разработки технологического режима для получения покрытия с заданными свойствами.

ПЭО образцов сплава AZ31 проводилось на автоматизированной технологической установке с одновременной регистрацией значений тока и напряжения в водном силикатно-щелочном электролите в импульсном униполярном и биполярном режимах. Частота импульсов в разных экспериментах 62 Гц, 713 Гц и 3136 Гц. Амплитуда импульсов 360 В. Исследовалась длительность обработки до 20 мин. После обработки измерялась толщина покрытия вихретоковым толщиномером Defelsko Positector 6000. Электрохимические исследования проводились с помощью потенциостата-гальваностата-импедансметра Элинс Р-5Х (Россия) в растворе Рингера в трехэлектродной ячейке объемом 80 мл с хлоридсеребряным электродом сравнения и платиновым противоз электродом. Испытания проводились при температуре 37 градусов. Было проведено измерение электродного потенциала и поляризационных кривых. Ток и ЭДС коррозии вычислялись по поляризационным кривым методом Тафеля.

На рис. 1 показаны графики изменения толщины покрытия во времени, из которых видно, что основной рост покрытия происходит в первые две минуты обработки. За 20 минут обработки в режиме РВР  $h = 16 \pm 0,78$  мкм, в режиме РUP  $h = 12,5 \pm 0,92$  мкм. На рисунке также показан характер изменения средних значений тока и напряжения, импеданса процесса. Значительное увеличение длительности обработки сказывается негативно на ток  $I_{corr}$  и ЭДС коррозии  $E_{corr}$  (Рис. 2). Для режима РВР наименьший ток коррозии достигается после 5-ти минут обработки, для режима РUP после 3-х минут. Наименьшее значение  $-E_{corr}$  соответствует длительности обработки 3 минуты, как для РUP, так и для РВР режима. Ухудшение коррозионных свойств с увеличением длительности обработки может быть связано с возникновением дефектов покрытия из-за того, что при достижении определенной толщины покрытия, энергии микроразрядов может быть недостаточно, чтобы пробить всю толщину покрытия и доставить расплав металла и покрытия на поверхность. Это бы способствовало росту покрытия, а пробой происходит на поверхности или в пузырьках газа в толщине покрытия, что приводит к возникновению дефектов, благоприятных для образования питтингов коррозии. Таким образом, оптимальное время ПЭО магниевого сплава 3-5 минут.

Частота импульсов также оказывает влияние на свойства покрытия, как показано на рис.3. С ростом частоты наблюдается уменьшение  $-E_{corr}$ . На низкой частоте 62 Гц наблюдалось повышенное значение  $I_{corr}$  в обоих РUP и РВР режимах. В режиме РВР на низких частотах формируется более толстое покрытие.



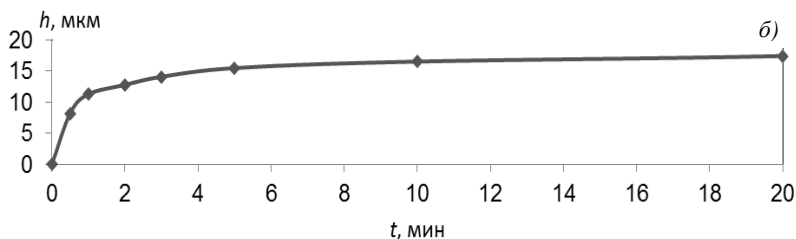


Рисунок 1 – Изменение толщины покрытия  $h$  во времени в режиме PUP (а) и PVP (б) при частоте импульсов 3136 Гц

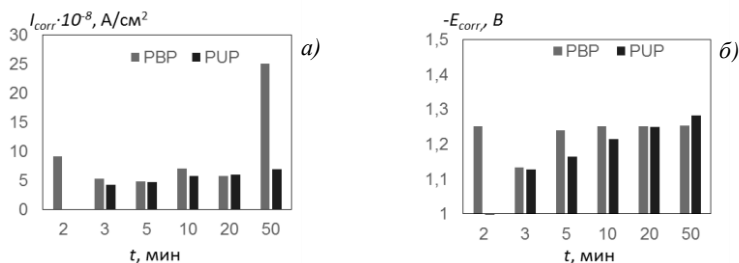


Рисунок 2 – Изменение тока коррозии  $I_{corr}$  (а) и ЭДС коррозии  $-E_{corr}$  (б) во времени для PUP и PVP режимов

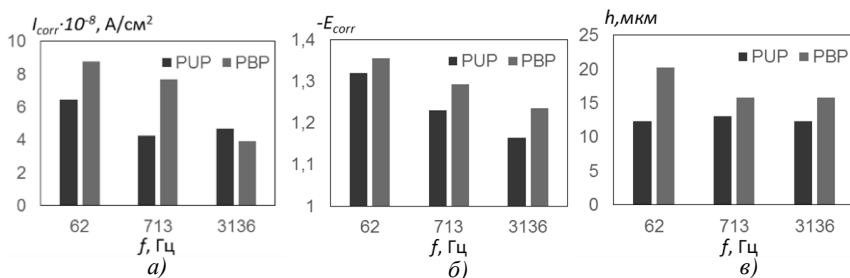


Рисунок 3 – Зависимость тока коррозии  $I_{corr}$  (а) и ЭДС коррозии  $-E_{corr}$  (б) и толщины покрытия  $h$  (в) от частоты для PUP и PVP режимов

Математические модели построены в виде аддитивных регрессионных уравнений, связывающих значения факторов режима обработки (PUP или PVP), частоты  $f$  и длительности обработки  $t$  со значениями тока и ЭДС коррозии  $I_{corr}$  и  $E_{corr}$  и толщиной покрытия  $h$ .

Для анализа значимости коэффициентов регрессионных моделей [4] проводилось масштабирование входных и выходных факторов в диапазон  $[-1, 1]$ .

Получены следующие регрессионные уравнения:

$$\hat{I}_{corr} = -0,26 - 0,14 \cdot f' + 0,44 \cdot t' - 0,29 \cdot r';$$

$$\hat{E}_{corr} = -0,73 + 0,53 \cdot f' - 0,34 \cdot t' + 0,23 \cdot r';$$

$$\hat{h} = 0,83 - 0,13 \cdot f' + 0,25 \cdot t' - 0,25 \cdot r'.$$

Модели коррозионных свойств  $I_{corr}$ ,  $E_{corr}$  построены на основе выборки из 23 экспериментов, модель толщины покрытия - на основе выборки из 35 экспериментов. Коэффициент детерминации  $R^2$  полученных моделей  $I_{corr}$ ,  $E_{corr}$  и  $h$  составил 0,66; 0,70 и 0,71 соответственно. Анализируя значения коэффициентов уравнений, можно сделать выводы о степени значимости входных факторов, и о влиянии на положительное или отрицательное изменение выходных факторов. Не очень высокие показатели коэффициента говорят, о более сложном, чем линейное влиянии входных факторов обработки на свойства покрытия, для описания которых будет собрана более обширная выборка экспериментальных данных. Все выбранные входные факторы характеризуются коэффициентами одного порядка и оказывают значительное влияние на выходные факторы. Ток коррозии уменьшается с ростом частоты, увеличивается при увеличении длительности обработки, ток коррозии в PUP режиме меньше. Потенциал коррозии принимает отрицательные значения, но становится более положительным (меньше по модулю) с ростом частоты и в режиме PUP по сравнению с PBP; увеличение длительности обработки сказывается негативно. Толщина покрытия уменьшается с ростом частоты, увеличивается во времени, и в PBP режиме покрытия толще.

Таким образом перспективными режимами для дальнейших исследования является PUP режим при частоте импульсов 700-800 Гц и PBP режим при частоте импульсов 3000-3200 Гц. Оптимальная длительность ПЭО магниевого сплава 3-5 минут.

*Исследование ПЭО магниевых сплавов осуществляется в рамках работы по программе Стипендии Президента РФ СП-1962.2019.4.*

#### Список литературы

1. Zheng Y. F., Gu X. N., Witte F. Biodegradable metals // Mater Sci Eng R Rep. 2014. № 77 pp. 1-34.
2. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S. J. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology, vol. 122, 1999, pp. 73–93.
3. Parfenov E. V., Yerokhin A., Nevyantseva R. R., Gorbatkov M. V., Liang C. J., Matthews A. Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling // Surface and Coatings Technology, vol. 269, 2015, pp. 2–22.
4. Кремер Н. Ш., Путько Б. А. Эконометрика: Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 311 с.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 517.93

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef87b033.35809465

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОСЦИЛЛЯТОРЫ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ: АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Валерий Васильевич Зайцев**, профессор, zaitsev@samsu.ru

**Альван Хусамулдин Касим**, студент, comphysics@samsu.ru

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Россия, Самара

*Аннотация. Предложен физически обоснованный метод синтеза нелинейных колебательных систем, осциллирующих в дискретном времени (ДВ). Синтезированные динамические системы находят применение в качестве нелинейных дискретных (цифровых) фильтров и базовых моделей элементов радиосистем.*

*Ключевые слова: колебания, нелинейность, дискретное время, автоколебания, динамический хаос.*

### NON-LINEAR OSCILLATORS IN DISCRETE TIME: ANALYSIS AND SYNTHESIS OF DYNAMIC SYSTEMS

Valery V. Zaitsev, professor, zaitsev@samsu.ru

Alalvan Husamuldin Kasim, student, comphysics@samsu.ru

Samara University, Russia, Samara

*Abstract. A physically justified method of synthesis of nonlinear oscillating systems oscillating in discrete time (DT) is proposed. Synthesized dynamic systems are used as nonlinear discrete (digital) filters and basic models of radio system elements.*

*Keywords: oscillations, nonlinearity, discrete time, self-oscillations, dynamic chaos.*

В качестве аналогового прототипа семейства ДВ-осцилляторов выбрана динамическая система с уравнением движения

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \mu \omega_0^2 F_R(x) + \frac{\omega_0}{Q} (pF_A(x) - 1) \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 \xi(t), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  и  $Q$  – собственная частота и добротность осциллятора с тождественно равными нулю активной  $F_A(x)$  и реактивной  $F_R(x)$  нелинейностями,  $\mu$  и  $p$  – параметры нелинейностей,  $\xi(t)$  – внешнее воздействие. Уравнение (1), в частности, описывает два классических осциллятора: ван дер Поля (при  $F_A(x) = 1 - x^2$ ,  $F_R(x) \equiv 0$ ) и Дюффинга (при  $F_A(x) \equiv 0$ ,  $F_R(x) = x^3$ ).

Синтез ДВ-осциллятора проводится в два этапа. На первом из них дифференциальный оператор в левой части уравнения (1) заменяется разностным оператором второго порядка с выполнением следующих условий: он должен быть консервативным и порождать в дискретном времени

собственные колебания  $x_n = x(n\Delta)$  с частотой  $\Omega_0 = \omega_0 / \omega_d$ , где  $\omega_d = 2\pi / \Delta$ . Результатом этапа является уравнение вида

$$x_n - \cos(2\pi\Omega_0)x_{n-1} + x_{n-2} = F(x_{n-1}, x_{n-2}, n-1). \quad (2)$$

Явный вид правой части (2) выпишем, например, для осциллятора ван дер Поля:

$$F(\circ) = 2\pi \frac{\Omega_0}{Q} (p(1-x_{n-1}^2) - 1)(kx_{n-1} - x_{n-2}) + 4\pi^2 \Omega_0^2 \xi_{n-1}. \quad (3)$$

В разностном уравнении (2)–(3) использован коэффициент  $k$ , определяемый на втором этапе синтеза. Он должен быть таким, чтобы решение методом Эйлера укороченного уравнения для амплитуды автоколебаний осциллятора (1) совпадало с разностным укороченным уравнением для амплитуды осциллятора (2). Результат второго этапа:  $k = \cos(2\pi\Omega_0)$  [1].

Заметим, что для осцилляторов томсоновского типа при  $\Omega_0 \ll 1$  соотношение (2) – алгоритм решения уравнения (1).

Когда собственная частота ДВ-осциллятора находится в диапазоне  $0.2 \leq \Omega_0 < 0.5$ , динамика системы в дискретном времени приобретает новые черты, не наблюдаемые в непрерывном времени. В частности, значительную роль приобретает неустраимый эффект подмены частот гармоник нелинейных колебаний [3]. В неизохронном ДВ-автогенераторе, например, в автогенераторе ван дер Поля–Дюффинга, срыв самосинхронизации на подменённой третьей гармонике переводит динамическую систему в режим генерации хаотических автоколебаний [2].

### Список литературы

1. Зайцев В.В. Дискретный осциллятор ван дер Поля: Конечные разности и медленные амплитуды // Известия вузов. ПНД. 2017. Т. 25, № 6. С. 70–78. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-6-70-78.
2. Зайцев В.В. Физически обоснованная дискретизация времени в математических моделях генераторов регулярных и хаотических колебаний // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 3. С. 44–48.
3. Зайцев В. В., Стулов И. В. О влиянии подмененных гармоник на динамику автоколебаний в дискретном времени / В.В. Зайцев, И.В. Стулов // Известия вузов. ПНД. 2015. Т. 23, вып. 6. С. 40–46. DOI: 10.18500/0869-6632-2015-23-6-40-46.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 519.6

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997ef950b69.16628663

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ MULTI-SCROLL СИСТЕМЫ

**Руслан Рустемович Раупов**, студент, 89172662137rrr@gmail.com

**Вадим Владимирович Афанасьев**, д.т.н., профессор

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Республика Татарстан, Казань

*Аннотация. В работе исследованы особенности моделирования конфиденциальных систем передачи информации на основе эффектов динамического хаоса в multi-scroll системах. Получены рекомендации по выбору параметров multi-scroll системы, применяемой при передаче информации на основе псевдослучайных сигналов дискретно-нелинейной системы по схеме Jerk.*

*Ключевые слова: динамический хаос, multi-scroll система, прямохаотическая система.*

### FEATURES OF SIMULATION OF CONFIDENTIAL INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON PSEUDO-RANDOM SIGNALS OF MULTI-SCROLL SYSTEM

Ruslan R. Raupov, student, 89172662137rrr@gmail.com

Vadim V. Afanasyev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI  
Russia, Republic of Tatarstan, Kazan

*Abstract. The paper investigates the features of modeling confidential information transmission systems based on the effects of dynamic chaos in multi-scroll systems. Recommendations for the choice of parameters of a multi-scroll system used in information transmission based on pseudo-random signals of a discrete-nonlinear system according to the Jerk circuit are obtained.*

*Keywords: dynamic chaos, multi-scroll system, direct chaotic system.*

Использование в современных системах передачи информации псевдослучайных сигналов в качестве носителей информации имеет преимущества по сравнению с использованием гармонических сигналов. Псевдослучайные сигналы обладают такими свойствами, как большая информационная емкость, возможность получения сложных колебаний с помощью простых по структуре устройств, возможность управления режимами путем малых изменений параметров системы [1]. Перспективным вариантом реализации псевдослучайных сигналов служит генератор, построенный на основе multi-scroll системы по схеме Jerk [2]. В отличие от типовых радиоэлектронных систем с динамическим хаосом multi-scroll системы имеют более сложное динамическое поведение, что позволяет использовать их при построении конфиденциальных систем передачи информации.

Цель работы – исследование особенностей моделирования конфиденциальных систем передачи информации на основе эффектов динамического хаоса в multi-scroll системах с обоснованием инженерных рекомендаций по выбору параметров генератора псевдослучайных сигналов дискретно-нелинейной multi-scroll системы по схеме Jerk.

Первые работы по возможности применения эффектов динамического хаоса при передаче сообщений предполагали использование явления хаотической синхронизации и синхронного отклика. Приемник и передатчик должны были содержать идентичные генераторы хаоса, которые синхронизируются в процессе приема-передачи информации. Позднее было установлено, что системы передачи информации, использующие хаотическую синхронизацию, имеют серьезные ограничения на качество канала связи и требуют высокую степень идентичности генераторов хаоса, поэтому они не являются на ближайшую перспективу практически применимыми [3].

В работе рассмотрены особенности моделирования прямохаотической системы передачи информации при использовании сигналов дискретно-нелинейной multi-scroll системы по схеме Jerk.

Прямохаотическая система связи в отличие от систем передачи, базирующихся на принципе синхронизации, содержит лишь один источник псевдослучайных сигналов. Информационным носителем в прямохаотической схеме связи являются хаотические радиоимпульсы, представляющие собой фрагменты прямохаотического сигнала с длиной, превышающей длину «квазипериода» хаотических колебаний [4].

В прямохаотических системах связи могут использоваться различные виды модуляции: COOK модуляция, PPM модуляция, DCSK модуляция и т.д.

Передатчик прямохаотической системы связи с PPM модуляцией реализуется следующим образом [4]:

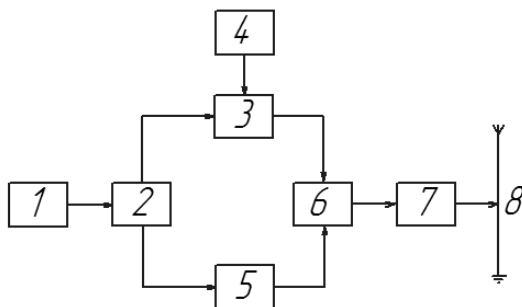


Рисунок 1 – Структурная схема передатчика прямохаотической системы связи с PPM модуляцией (1 – источник хаотических радиоимпульсов; 2 – делитель; 3 – модулятор; 4 – информационный поток; 5 – задержка; 6 – сумматор; 7 – усилитель; 8 – антенна)

Эффективно построение генератора хаотических радиоимпульсов на основе multi-scroll систем с хаотической динамикой по схеме Jerk. Один из



широко используемых вариантов реализации схемы Jerk описывается системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = z \\ \dot{z} = -x - y - a \cdot z + f(x), \end{cases}$$

где  $x, y, z$  – переменные системы;  $a$  – параметр системы; функция  $f(x)$  определяет количество спиралей в фазовом портрете исследуемой динамической системы.

Численное решение нелинейной дифференциальной системы, описывающей динамику схемы Jerk, проводилось на базе средств Matlab методом Рунге-Кутты. Величина относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний в моделируемой системе, выбрана равной 0,1.

Полученный в результате моделирования характерный фазовый портрет multi-scroll системы по схеме Jerk для варианта с 4-мя спиральями при значении базового параметра  $a = 0,6$  представлен на рис.2.

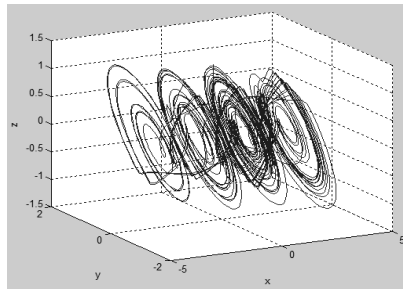
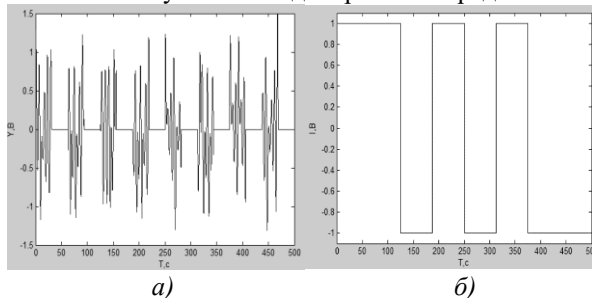


Рисунок 2 – Фазовый портрет multi-scroll системы для случая с 4-мя спиральями.

Кроме того, установлено, что при заданных параметрах моделирования для получения хаотического режима в системе рекомендуется выбирать значение базового параметра  $a$  в диапазоне:  $0,3 \leq a \leq 1,1$ .

В программной среде Matlab проведено моделирование блоков передатчика прямохаотической системы с PPM модуляцией при использовании псевдослучайных сигналов дискретно-нелинейной multi-scroll системы по схеме Jerk. Результаты моделирования представлены на рис.3.



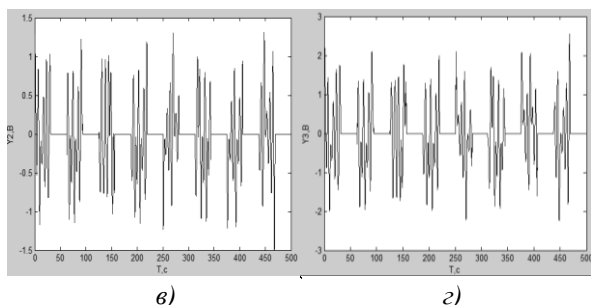


Рисунок 3 – Результаты моделирования: а) поток хаотических радиоимпульсов компоненты  $Y$  multi-scroll системы; б) информационный сигнал; в) сигнал с выхода модулятора; г) сигнал с выхода сумматора

Multi-scroll система по схеме Jerk формирует хаотические радиоимпульсы с защитными интервалами (рис.3а), которые проходят через делитель. Сигнал с первого выхода делителя модулируется информационным двоичным сигналом (рис.3б). Сигнал с выхода модулятора представлен на рис.3в. Сигнал со второго выхода делителя проходит через блок задержки и поступает на сумматор, где он суммируется с модулированным сигналом. Суммированный сигнал (рис.3г) усиливается и поступает на передающую антенну для передачи по каналу связи.

Таким образом, проведено исследование особенностей моделирования блоков формирования и обработки сигналов в конфиденциальной прямохаотической системе связи с дискретно-нелинейной multi-scroll системой. Выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров генератора псевдослучайных сигналов multi-scroll системы по схеме Jerk.

#### Список литературы

1. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний/ Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин. - М.: Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.
2. Раупов Р.Р. Формирователи псевдослучайных сигналов по схеме Jerk для аппаратуры волоконно-оптических линий связи/ Р.Р. Раупов, В.В. Афанасьев. – VII Молодежная международная научно-техническая конференция «ПРЭФЖС – 2020», 2020 – 616 с.
3. Устройство для секретной передачи информации: пат. 57538 Рос. Федерация: МПК H04L9/00/ А.А. Короновский [и др.]. - №2006125565/22, заявл. 18.07.2006; опубл. 10.10.2006.
4. Дмитриев А.С. Прямохаотическая относительная схема передачи данных/ А.С. Дмитриев, Т.И. Мохсени, К.М. Сьерра-Теран// Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, т.10, №6, г. Москва, 2019. – с. 45-50.

Материал принят к публикации 08.10.21.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОТДЕЛКИ ТКАНЕЙ

*Давронбек Абдалимович Халматов*, доцент, к.т.н., holdav@mail.ru

*Дилноза Рахмановна Хушназарова*, ст. преп., dxushnazarova@mail.ru

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, кафедра  
«Автоматизация и управление технологических процессов и производств»  
Узбекистан, Ташкент

*Аннотация. В статье рассмотрен процесс отделки тканей как линейный динамический объект. Представлена математическая модель на основе методов аппроксимации.*

*Ключевые слова: передаточная функция, нелинейной зависимость, коэффициент усиления, процесс дозирования химикатов, линейный динамический объект.*

### DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE FABRIC FINISHING PROCESS

Davronbek Ab. Khalmatov, associate professor, candidate of technical sciences, holdav@mail.ru

Dilnoza R. Khushnazarova, senior lecturer, dxushnazarova@mail.ru

Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Department of Automation and Control of  
Technological Processes and Production, Uzbekistan, Tashkent

*Abstract. In the article considered the process of dosage of chemicals for bleaching of tissues as a linear dynamic object. Presented a mathematical model based on approximation methods.*

*Keywords: transfer function, nonlinear dependence, gain, chemical dosing process, linear dynamic object.*

**Введение.** В настоящее время огромное значение приобретает обеспечение высокого уровня механизации и автоматизации технологических процессов текстильной промышленности, в том числе и отделочного производства. В основных направлениях экономического и социального развития Узбекистана в данный период перед легкой промышленностью поставлена задача улучшения автоматизации прядильных, ткацких, трикотажных, в том числе и отделочных производств, быстрого переназначивания поточных линии по выпуску массовых видов тканей, модной одежды высокого качества. Для отделочного производства текстильной промышленности выполнение этой программы связано с техническим перевооружением, переходом к новому автоматизированному оборудованию, использованием интенсифицированных и ускоренных технологических процессов, происходящих в растворах при повышенных температурах и давлениях, в условиях совмещения ряда операции и перехода к малоотходной технологии. Высокое качество продукции и необходимая производительность

труда могут быть достигнуты только при соблюдении комплекса оптимальных технологических параметров и жесткой технологической дисциплины [1].

**Постановка задачи.** Для качественного ведения процессов отделки в текстильной промышленности первостепенное значение имеют вопросы автоматической регламентации расхода жидких, сыпучих и вязких сред. Создание автоматических систем управления во многих случаях осложнено отсутствием точных и адекватных математических моделей, и процесса управления [2].

Процесс белиения, являющийся частью отделки, выполняется для повышения степени белизны ткани. Сущность процесса белиения состоит в разрушении природных красящих веществ с помощью окислителей.

В целом на производстве обеспечиваются контроль и регулирование температуры воды в ваннах, уровня и концентрации рабочих растворов в ваннах и т.д. Однако, самым уязвимым местом, которое почти не поддается автоматизации, является поддержание необходимой концентрации растворов в ваннах щелочной, кисловочной и особенно перекисной машин. Это объясняется отсутствием надежных датчиков концентрации и исполнительных механизмов на линиях подачи растворов в ванны.

**Методы решений.** В настоящее время решение этой проблемы тем более необходимо, поскольку в более совершенных отбельных машинах разрабатываются и внедряются системы автоматического управления технологическом процессом с использованием средств вычислительной техники.

Предполагая, что процесс дозирования как объект управления является линейным динамическим объектом, идентификацию его переходных функций произведем на основе методов аппроксимации в классе экспоненциальных функций [3,4].

Запишем переходную функцию объекта управления в параметрическом виде, представляя её звеньями второго порядка:

$$h(t) = k + \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t},$$

где  $k$  – коэффициент усиления  $p_1, p_2$  – корни характеристического уравнения.

Свободная составляющая переходной функции определяется как разность:

$$U(t) = h(t) - k = \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t}.$$

Из асимптотического свойства переходной функции для устойчивых объектов следует, что величина  $h(t)$  стремится к коэффициенту усиления, поэтому величину установившегося значения определим непосредственно из экспериментальных данных. После этого определяются значения приближаемой функции:

$$U_1 = h_1 - k; \quad U_2 = h_2 - k; \dots U_i = h_i - k \quad i = 1, N.$$

Сравнивая поочередно эти значения приближающей функции, получим нелинейную систему уравнений относительно искомых параметров:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t} \\
 U_2 &= \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t} \\
 &\dots\dots\dots \\
 U_N &= \alpha_1 e^{p_1 t} + \alpha_2 e^{p_2 t}
 \end{aligned}$$

Если расстояние между соседними точкам одинаково и равно  $\Delta$ , то заменяя  $t_i = t_1 + (i+1)\Delta$ , и переходя к новым обозначениям:

$$\begin{aligned}
 f_i &= \alpha_i e^{p_i t} i z_i = e^{p_i \Delta}, \text{ получим:} \\
 U_1 &= f_1 + f_2 \\
 U_2 &= f_1 z_1 + f_2 z_2 \\
 U_3 &= f_1 z_1^2 + f_2 z_2^2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 U_N &= f_1 z_1^{N-1} + f_2 z_2^{N-1}
 \end{aligned}$$

Для того чтобы данная система уравнений имела единственное решение, необходимо составить четыре уравнения (по числу неизвестных). Для определения решения системы составим вспомогательный характеристический многочлен  $\pi(z) = (z - z_1)(z - z_2) = z^2 + C_1 z + C_0$ . Корни данного многочлена являются решением системы уравнения (1). Для определения корней, найдем коэффициенты  $C_1$  и  $C_0$ :

$$C_0 = \frac{U_2 U_4 - U_3^2}{U_1 U_3 - U_2^2}; \quad C_1 = \frac{U_2 U_3 - U_1 U_4}{U_1 U_3 - U_2^2},$$

где  $U_1, U_2, U_3, U_4$  – четыре равностоящих значения приближаемой функции.

Подставляя  $C_1$  и  $C_0$  в характеристический многочлен определяем его корни  $Z_1, Z_2$ . Из полученных значений  $Z_1$  и  $Z_2$  по формулам

$$P_i = (1/\Delta) \ln z_i; \quad \alpha_1 = [(-KP_2)/(P_2 - P_1)]; \quad \alpha_2 = [(KP_1)/(P_2 - P_1)]$$

определяем искомые параметры. Выражая  $P_{1,2} = -x \pm jy$  получим:

$$h(t) = K + \alpha_1 e^{(-x-jy)t} + \alpha_2 e^{(-x+jy)t} = K + e^{-xt} (\alpha_1 e^{-jy} + \alpha_2 e^{jy})$$

Учитывая, что  $\alpha_1 = -A - jB$ ;  $\alpha_2 = -A + jB$  и раскрывая показательные функции по формуле Эйлера  $e^{j\phi} = \cos\phi + j \sin\phi$ , получим:

$$\begin{aligned}
 h(t) &= K + e^{-xt} (\alpha_1 (\cos(-ty) + j \sin(-ty)) + \alpha_2 (\cos(ty) + j \sin(ty))) = \\
 &= K + e^{-xt} ((\alpha_1 + \alpha_2) \cos yt + (\alpha_2 - \alpha_1) j \sin yt) = K + e^{-xt} (-2A \cos yt + B \sin yt) \\
 h(t) &= K - 2e^{-xt} (A \cos yt - B \sin yt).
 \end{aligned}$$

Согласно формуле Хэвисайда [3], передаточную функцию можно определить из выражения характеристики при отсутствии кратных корней:

$$h(t) = (Q(0)/P(0)) + \sum_{j=1}^n [Q(p_j)/P_j P(p_j)] e^{p_j t},$$

где  $Q(p)$  и  $P(p)$  – соответственно полиномы числителя и знаменателя передаточной функции;  $P_i$  – корни характеристического уравнения  $P(p) = 0$

$$P(p_i) = (d/dp)P(p) / P = P_i.$$

Поскольку для устойчивых объектов действительные части всех корней отрицательны, то при  $t \rightarrow \infty$  установившееся значение переходной функции:

$$h(\infty) = (Q(o)/P(o)) = K.$$

Раскладывая полином  $P(p)$  на множители, его можно выразить, через корни характеристического уравнения:

$$P(p) = \prod_{i=1}^n (P - P_i) / \left[ (-1)^n \prod_{i=1}^n P_i \right].$$

Или для случая комплексно сопряженных корней:

$$P(p) = \frac{(p - p_1)(p - p_2)}{p_1 p_2} = \frac{(p + x + jy)(p + x - jy)}{(-x - jy)(-x + jy)} = \frac{p^2 + px - jpy + px + x - jxy + y^2}{x^2 + y^2}.$$

Для простоты будем считать, что полином  $Q(p)$  числителя передаточной функции – нулевого порядка. Тогда необходимо, чтобы выполнялись равенства:

$$\alpha_1 = K / [P_1 P(p_1)]; \quad \alpha_2 = K / [P_2 P(p_2)]$$

Величина  $P_2 P(p_1)$  в знаменателе определяется из выражения:

$$P_i P^i(p_i) = \left[ p_i \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (p_i - p_j) \right] / \left[ (-1)^n \prod_{i=1}^n P_i \right]; \quad P_1 P(p_1) = (p_1 - p_2) / p_2; \quad P_2 P'(p_1) = \frac{P_2 - P_1}{P_1}.$$

Выразим  $\alpha_1 = -A - jB$  и  $\alpha_2 = -A + jB$  через  $x$  и  $y$

$$\alpha_2 = \frac{kP_1}{p_2 - p_1} = \frac{k(-x - jy)}{-x - jy - jy + x} = \frac{-kx - jky}{-2jy} = \frac{kx}{2y} j + \frac{k}{2}$$

$$\alpha_1 = \frac{kP_2}{p_1 - p_2} = \frac{k(-x + jy)}{-x + jy + jy + x} = \frac{-kx + jky}{2jy} = -\frac{kx}{2y} j + \frac{k}{2}.$$

Тогда

$$A = K / 2; B = (kx) / (2y).$$

Подставляя значения  $A$  и  $B$  в полученное ранее уравнение переходной характеристики имеем:

$$h(t) = k + e^{-xt} ((-2kx/2) \cos yt - (2kx/2y) \sin yt) = k - ke^{-xt} (\cos yt + (x/y) \sin yt).$$

Передаточная функция в этом случае выглядит как:

$$W(p) = \frac{k}{P(p)} = \frac{k}{p^2 / (x^2 + y^2) + (2xp / (x^2 + y^2)) + 1}.$$

Полученные выше числовые значения  $x$  и  $y$  для каждой кривой разгона являются довольно грубым приближением, так как определялись они лишь по 4 точкам экспериментальных данных, имеющих большой разброс. Поэтому примем их за начальные приближения, а для получения более достоверной модели объекта воспользуемся методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов можно сформулировать как нахождение минимума функционала:

$$J(x, y) = \sum_{i=1}^n (h_i - k + ke^{-xt} (\cos yt_i + (x/y) \sin yt_i))^2.$$

Так как имеет место случай нелинейной зависимости функции  $h(t, x, y)$  от параметров  $x, y$ , то известные начальные приближенные значения параметров заменим на  $x_0$  и  $y_0$ , отличающихся от искомым значений  $x, y$  малыми поправками  $\Delta x, \Delta y$ . Тогда с достаточной степенью точности имеют место равенства:

$$h(t_i, x_0, y_0) = (d/dx)h(t_i, x_0, y_0) + (d/dy)h(t_i, x_0, y_0).$$

Вводя обозначения:

$$\begin{aligned} A_i &= (d/dx)h(t_i, x_0, y_0) = ke^{-xt} (t_i \cos y_0 t_i + ((x_0 t_i - 1) / (y_0)) \sin y_0 t_i) \\ B_i &= (d/dy)h(t_i, x_0, y_0) = -ke^{-xt} ((x_0 t_i / y_0) \cos y_0 t_i + x_0) / ((y_0^2) \sin y_0 t_i) \\ F_i &= h_i - h(t_i, x_0, y_0) = h_i - k + ke^{-xt} (\cos y_0 t_i + (x_0 / y_0) \sin y_0 t_i), \end{aligned}$$

получим для определения поправок  $\Delta x, \Delta y$  системы условных уравнений:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ A_1 & B_2 \\ \cdot & \cdot \\ A_N & B_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ F_N \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_N \\ B_1 & B_2 & \dots & B_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ A_1 & B_2 \\ \cdot & \cdot \\ A_N & B_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_N \\ B_1 & B_2 & \dots & B_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ F_N \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1 = \sum_{i=1}^n A_i^2 & C_2 = \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ C_2 = \sum_{i=1}^n A_i B_i & C_3 = \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 = \sum_{i=1}^n A_i F_i \\ D_2 = \sum_{i=1}^n B_i F_i \end{bmatrix}$$

Обозначив решение данной системы через:

$$\Delta X^0 = \frac{D_2 C_2 - D_1 C_3}{C^2 - C_3 C_1} \quad \Delta Y^0 = \frac{D_2 C_2 - C_2 D_1}{C_1 C_3 - C_2^2}$$

получим следующее приближение параметров  $x' = x_0 + \Delta x^0$ ;  $y' = y_0 + \Delta y^0$ . Принимая их за новое приближение параметров, это действие можно повторять до тех пор, пока с заданной точностью поправки не будут равны нулю.

**Вывод:** Построив по полученным данным графики переходных процессов можно убедиться в достаточно высокой точности приближения. С другой стороны предлагаемый способ построения математической модели может быть использован для идентификации объекта при построении адаптивной системы управления процессом дозирования химикатов.

#### Список литературы

1. Д.Р.Хушназарова. Анализ процесса отбеливания ткани в автоматизированной системе управления. "Science and Education" Scientific Journal. September 2021. Volume 2 / Issue 9. 210-214 стр.
2. Назарова М.В., Романов В. Ю. Автоматизация технологических процессов в текстильной промышленности. Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2014. 160 с.
3. С. В. Звонарев. Основы математического моделирования. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.
4. Halmatov D.A., Yunusova S.T., Xushnazarova D.R., Hujanazarov U.O. Fuzzy Model of Control by Technological Parameters of Heat Generating Plants. International journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 6, Issue 5, May 2016, pp.296-298.

*Материал принят к публикации 05.10.21.*



УДК 621.396.41

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997efaeaab7.63562209

## **КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НЕВЯЗКУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ КРИВЫХ, ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ $p$ - $n$ - ПЕРЕХОДА НА ИМПУЛЬСНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛАХ**

**Глеб Михайлович Шевченко**, ассистент, gleb.m.shevchenko@tusur.ru

**Эдуард Валерьевич Семенов**, профессор, д.т.н., edwardsemyonov@narod.ru

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, Россия, Томск

*Аннотация. В статье рассмотрены ключевые факторы, влияющие на невязку экспериментальных и модельных кривых, при моделировании  $p$ - $n$ -перехода на импульсных широкополосных сигналах. Причина невязки заключается в квазистатическом представлении процессов прямого и обратного восстановления  $p$ - $n$ -перехода в стандартной SPICE-модели. Квазистатическое приближение не учитывает переходные процессы в  $p$ - $n$ -переходе, которые связаны со временем протекания неосновных носителей заряда и последовательным сопротивлением потерь.*

*Ключевые слова:  $p$ - $n$ - переход, последовательное сопротивление потерь, SPICE-модель, диффузионный заряд.*

### **KEY FACTORS AFFECTING THE DISCONNECTION OF EXPERIMENTAL AND MODEL CURVES IN MODELING $P$ - $N$ -TRANSITION ON PULSE BROADBAND SIGNALS**

Gleb M. Shevchenko, assistant, gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Edward V. Semyonov, professor, doctor of engineering sciences, edwardsemyonov@narod.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk

*Abstract. The article discusses the key factors influencing the discrepancy between the experimental and model curves when simulating a  $p$ - $n$  junction on pulsed broadband signals. The reason for the discrepancy lies in the quasi-static representation of the forward and backward reconstruction of the  $p$ - $n$  junction in the standard SPICE model. The quasi-static approximation does not take into account the transient processes in the  $p$ - $n$  junction, which are associated with the transit time of minority charge carriers and the series resistance of losses.*

*Keywords:  $p$ - $n$ - junction, series loss resistance, SPICE model, diffusion charge.*

Проектирование любых радиоэлектронных средств не обходится без предварительного компьютерного проектирования. Качество моделирования определяет количество итераций при разработке макетов. В свою очередь, это значительно сказывается, в большую сторону, на сроках и стоимости разрабатываемого устройства.

Обычно работа  $p$ - $n$ - перехода в установившемся режиме анализировалась с использованием основных уравнений дрейфовой диффузии, которые удовлетворительно описывали переходные процессы  $p$ - $n$ - перехода. Со

временем наблюдались более сложные эффекты, и стали заметны новые подходы. При моделировании, вопросы возникают на этапе исследования динамического поведения  $p-n$ - перехода, таких как работа переменного тока или быстрое переключение.

Во многих источниках [1, 2] последовательное сопротивление потерь принимается постоянным значением, что противоречит его фактическому поведению и приводит к существенной погрешности моделирования на импульсных сигналах при прямом восстановлении  $p-n$ - перехода. На переходной характеристике прямого восстановления  $p-n$ - перехода наблюдается выброс напряжения (рис. 1, кривая 1). Выброс напряжения объясняется зависимостью последовательного сопротивления  $p-n$ - перехода от накопленного в нем диффузионного заряда [3].

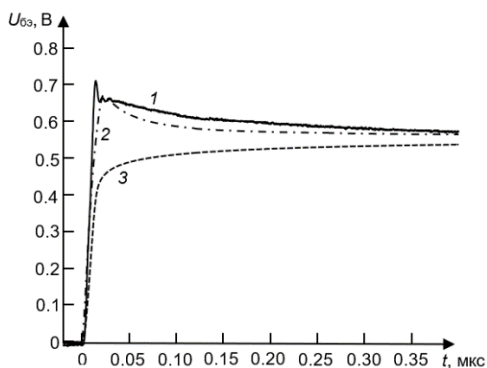


Рисунок 1 – Прямое напряжение на  $p-n$ -переходе: кривая 1 – эксперимент; кривая 2 – неквазистатическая модель; кривая 3 – квазистатическая модель

Невязка экспериментальной кривой (рис. 1, кривая 1) с разработанной неквазистатической моделью (рис. 1, кривая 2) не превышает  $\pm 9\%$ . Квазистатическая модель (рис. 1, кривая 3) имеет отклонение от экспериментальной кривой до  $\pm 35\%$ .

Кроме последовательного сопротивления потерь, существенную роль играет диффузионный заряд, который влияет на процесс обратного восстановления. Рис. 2 иллюстрирует кривые импульса тока обратного восстановления, полученные с помощью эксперимента и моделирования.

Из рис. 2 видно, что кривая, полученная с помощью неквазистатической модели (рис. 2, кривая 2) имеет отклонение 3% от экспериментальной (рис. 2, кривая 1). В то время как квазистатическая модель отклоняется на  $\pm 35\%$  (рис. 2, кривая 3).

Экспериментально установлено неравномерное изменение последовательного сопротивления потерь при включении и выключении  $p-n$ -перехода, следовательно, оно не постоянно и зависит от диффузионного заряда [3]. Кроме этого, предложенные эквивалентные схемы [4, 5], при реализации в используемом САПР вызывают трудности у пользователей, связанные с

описанием в нем дифференциальных уравнений с помощью рекурсивного алгоритма. Рекурсивные алгоритмы более затратные как с точки зрения производительности ЭВМ, так и требуют специальных знаний у пользователей для их реализации.

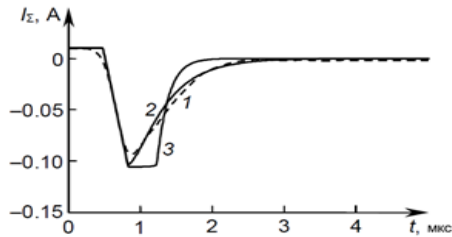


Рисунок 2 – Импульс ток обратного восстановления диода 2Д510: Кривая 1 – эксперимент, кривая 2 – неквазистатическая модель, кривая 3 – квазистатическая модель

Известно, что диффузионный заряд от тока электропроводности через диод. Существующие системы автоматизированного проектирования используют в своих SPICE-моделях квазистатическое приближение диффузионного заряда:

$$Q_d(t) = i(t)T, \quad (1)$$

где  $i(t)$  – описываемый вольт-амперной характеристикой ток электропроводности;  $T$  – время жизни неравновесных носителей заряда.

Такое решение не позволяет корректно охарактеризовать инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда при прямом и обратном восстановлении  $p-n$ - перехода. Это сказывается на переходной характеристике прямого восстановления  $p-n$ - перехода при его моделировании на импульсном воздействии.

*Заключение.* Использование неквазистатической модели позволит существенно уменьшить невязку между экспериментальными кривыми. Минимизация невязки в 5-7 раз достигается путем учета внутренней инерции последовательного сопротивления потерь и диффузионного заряда. Кроме этого, малая погрешность моделирования позволит в разы снизить время и стоимость конечного продукта (радиоэлектронного устройства).

#### Список литературы

1. Ebers, J.J. Moll, J.L. Large-Signal Behavior of Junction Transistors, Proceedings of the IRE, vol. 42, pp. 1761 - 1772.
2. Arkaprava Bhattacharyya. NQS Effects Investigation For Compact Bipolar Transistor Modeling, 2014. – 156 с.
3. Tseng K.J. Int. J. Electron. – 1998. – V. 84. – P. 437–444.
4. Lauritzen P., Ma C. IEEE Trans. Power Electron. – 1991. – V. 6. – No. 2. – P. 188–191.
5. Yang A.T., Liu Yu, Yao J.T. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1994. – V. 13. – No. 2. – P. 231–23.

Материал принят к публикации 07.10.21.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СЕНСОРОВ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Светлана Петровна Коноваленко**

Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), доцент,  
к.т.н., доцент, Россия, Таганрог, svetlana\_s12@mail.ru

*Аннотация. Разработан подход для моделирования газочувствительных и физико-химических свойств материалов на основе органических полупроводников. В основе подхода лежит использование различных методов моделирования: линейный, нелинейный регрессионный анализ и нейронные сети. В качестве внешних сигналов для моделирования выбраны параметры технологического процесса формирования материалов: массовая доля металла в пленкообразующем растворе, температура и время первого и второго этапа отжига.*

*Ключевые слова: моделирование, газочувствительность, регрессионный анализ, полиакрилонитрил.*

### MODELING THE PROPERTIES OF GAS SENSOR MATERIALS BASED ON ORGANIC SEMICONDUCTORS

Svetlana P. Konovalenko

Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) RSEU (RINH), Associate Professor,  
Candidate of Technical Sciences, Docent, Russia, Taganrog, svetlana\_s12@mail.ru

*Abstract. An approach has been developed for modeling the gas-sensitive and physicochemical properties of materials based on organic semiconductors. The approach is based on the use of various modeling methods: linear, nonlinear regression analysis and neural networks. The parameters of the technological process of the formation of materials were selected as external signals for modeling: the mass fraction of metal in the film-forming solution, the temperature and time of the first and second stages of annealing.*

*Keywords: modeling, gas sensitivity, regression analysis, polyacrylonitrile.*

Для детектирования токсичных газов в воздухе необходимым является поиск новых материалов и создание на их основе эффективных газоанализаторов. Одним из перспективных направлений в этой области является создание сенсоров на основе органических полупроводников. Такие сенсоры обладают высокой чувствительностью и достаточно просты в проектировании. Одним из таких материалов является полиакрилонитрил (ПАН).

С целью сокращения эксперимента для уменьшения материальных и временных издержек необходима разработка математических моделей для определения физико-химических свойств газочувствительного материала и функциональных характеристик сенсоров газов на их основе.

При моделировании зависимости свойств объектов от технологических параметров необходимо определить область определения функция, в пределах

которой наблюдается свойство объекта (например, полупроводниковые свойства материалов). Функциональную зависимость можно определить, используя метод наименьших квадратов или нейросетевой подход.

Для моделирования физико-химических свойств материалов и функциональных характеристик сенсоров газов на основе кобальтсодержащего ПАН в качестве входных параметров (дескрипторов) являются параметры технологического процесса формирования органического полупроводника. Для моделирования необходимо выделить входные и выходные сигналы. Для разных подходов моделирования (методов) в качестве выходных являются технологические параметры создания газочувствительных пленок: массовая доля кобальта ( $\omega$ ), температура и время первого ( $T_1, t_1$ ) и второго этапов ( $T_2, t_2$ ) ИК-отжига.

Полученные модели в пределах экспериментальной ошибки удовлетворительно описывает собранные данные, что позволяет с ее помощью оптимизировать химический состав и условия термообработки для получения эффективных низкотемпературных сенсоров газа на основе полиакрилонитрила.

С целью моделирования рассматривались нейронные сети в виде многослойного персептрона. Установлено, что лучшая работоспособность для прогнозирования газочувствительности наблюдается в сетях с двумя скрытыми слоями: в первом слое 8 нейронов, во втором – 5. Для обучения сети использовался один из методов, показавший наибольшую эффективность: быстрого распространения, дельта-дельта-с-чертой, Квази-Ньютон, обратного распространения, сопряженных градиентов, Левенберга-Маркар. В результате теоретического исследования выбран метод обратного распределения ошибки.

*Материал принят к публикации 05.10.21.*

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОСИСТЕМ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, ПРОИЗВОДСТВЕ, НАУЧНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ И В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ»**

SECTION «SIMULATION OF ELECTRONIC ELECTROTECHNICAL, PHYSICAL  
AND RADIO SYSTEMS IN DESIGNING, PRODUCTION, SCIENTIFIC RESEARCHES  
AND IN THE EDUCATIONAL PROCESS»

УДК 004.3.047

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997efc75c07.80090736

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОДНОРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
MAX, MIN НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ДВУЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ**

*Дмитрий Васильевич Андреев*, профессор каф. «Проектирование  
и технология электронных средств», доцент, д.т.н., d.andreev1@yandex.ru

*Артём Юрьевич Дороднов*, магистрант, aptyxa730@mail.ru

*Данил Сергеевич Любецкий*, магистрант, lyubetsky98@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет  
Россия, Ульяновск

*Аннотация. Рассмотрены примеры применения двузначных логических функций  
для описания базовых операций многозначной логики.*

*Ключевые слова: двузначные логические функции, многозначная логика,  
однородные устройства.*

**MATHEMATICAL MODELS OF HOMOGENEOUS ELEMENTS  
MAX, MIN BASED ON TWO-DIGIT LOGIC FUNCTIONS**

Dmitriy V. Andreev, professor at the department of «Design and technology of electronic means»,  
docent, dr.tech.sc., d.andreev1@yandex.ru

Artem Y. Dorodnov, master's student, aptyxa730@mail.ru

Danil S. Lyubetsky, master's student, lyubetsky98@mail.ru

ULSTU, Russia, Ulyanovsk

*Abstract. Examples of using two-digit logical functions to describe basic operations of  
multi-valued logic are discussed.*

*Keywords: two-digit logical functions, multi-valued logic, homogeneous devices.*

Элементы MAX, MIN являются базовыми элементами логических модулей с многозначным входным (выходным) алфавитом. При этом, если многозначность обрабатываемых переменных задается кортежем двоичных сигналов, то указанные элементы строятся на основе функций двузначной логики. В работах [1-5] рассмотрены элементы MAX, MIN, в математических моделях которых использован булевый функциональный базис. Недостатком таких элементов является неоднородность аппаратного состава, обусловленная тем, что они содержат логические элементы нескольких типов.

© Андреев Д.В., Дороднов А.Ю., Любецкий Д.С., 2021

САИР и моделирование в современной электронике. С. 213 – 216.

В данной работе предлагаются математические модели элементов MAX, MIN, свободных от указанного недостатка.

Рассмотрим следующую функцию двузначной логики:

$$c_{n-i} = \overline{a_{n-i} \vee z_{1(i-1)} \vee b_{n-i} \vee z_{2(i-1)}}, \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, n}$ ;  $a_{n-i}, b_{n-i} \in \{0, 1\}$  – соответствующие разряды  $n$ -разрядных двоичных переменных  $A = (a_{n-1} \dots a_0)_2$ ,  $B = (b_{n-1} \dots b_0)_2$ ;  $\vee, \overline{\phantom{x}}$  – символы операций ИЛИ, НЕ;

$$z_{1(i-1)} = \begin{cases} 0 & \text{при } i=1 \\ \overline{a_{n-i+1} \vee z_{1(i-2)} \vee b_{n-i+1} \vee z_{2(i-2)} \vee z_{1(i-2)}} & \text{при } i > 1 \end{cases}; \quad (2a)$$

$$z_{2(i-1)} = \begin{cases} 0 & \text{при } i=1 \\ \overline{b_{n-i+1} \vee z_{2(i-2)} \vee a_{n-i+1} \vee z_{1(i-2)} \vee z_{2(i-2)}} & \text{при } i > 1 \end{cases}. \quad (2б)$$

В табл.1 приведены значения реализуемых выражениями (2) функций  $z_{1(i-1)}(z_{1(i-2)}, z_{2(i-2)}, a_{n-i+1}, b_{n-i+1})$ ,  $z_{2(i-1)}(z_{1(i-2)}, z_{2(i-2)}, a_{n-i+1}, b_{n-i+1})$  на всех возможных наборах значений их аргументов.

Таблица 1 – Значения выражений (2) при  $i > 1$

$z_{1(i-2)}$	$z_{2(i-2)}$	$a_{n-i+1}$	$b_{n-i+1}$	$z_{1(i-1)}$	$z_{2(i-1)}$
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0

Из табл.1 следует, что: 1)  $z_{1(i-1)} = 0$  и  $z_{2(i-1)} = 1$  ( $z_{1(i-1)} = 1$  и  $z_{2(i-1)} = 0$ ) когда  $z_{1(i-2)} = 0$  и  $z_{2(i-2)} = 1$  ( $z_{1(i-2)} = 1$  и  $z_{2(i-2)} = 0$ ) или  $z_{1(i-2)} = z_{2(i-2)} = 0$  и  $a_{n-i+1} < b_{n-i+1}$  ( $z_{1(i-2)} = z_{2(i-2)} = 0$  и  $b_{n-i+1} < a_{n-i+1}$ ); 2)  $z_{1(i-1)} = z_{2(i-1)} = 0$  когда  $z_{1(i-2)} = z_{2(i-2)} = 0$  и  $a_{n-i+1} = b_{n-i+1}$ .

Таким образом, с учетом (1) имеем

$$c_{n-1} = \begin{cases} a_{n-1} & \text{при } a_{n-1} \leq b_{n-1} \\ b_{n-1} & \text{при } b_{n-1} < a_{n-1} \end{cases}, \quad (3a)$$

$$c_{n-k} = \begin{cases} a_{n-k} & \text{при } a_{n-1} \dots a_{n-k+1} = b_{n-1} \dots b_{n-k+1} \text{ и } a_{n-k} \leq b_{n-k} \\ & \text{или при } a_{n-1} \dots a_{n-k+1} < b_{n-1} \dots b_{n-k+1} \\ b_{n-k} & \text{при } a_{n-1} \dots a_{n-k+1} = b_{n-1} \dots b_{n-k+1} \text{ и } b_{n-k} < a_{n-k} \\ & \text{или при } b_{n-1} \dots b_{n-k+1} < a_{n-1} \dots a_{n-k+1} \end{cases} . \quad (36)$$

Здесь и ниже  $k = \overline{2, n}$ ;  $a_{n-1} \dots a_{n-k+1}$  и  $b_{n-1} \dots b_{n-k+1}$  – фрагменты  $n$ -разрядных двоичных переменных  $A = (a_{n-1} \dots a_0)_2$ ,  $B = (b_{n-1} \dots b_0)_2$ . Из равенств (3) следует, что  $n$ -разрядная двоичная переменная  $C = (c_{n-1} \dots c_0)_2$ , разряды которой формирует функция (1), является результатом операции  $\min(A, B)$ .

Далее рассмотрим функцию двузначной логики, полученную с помощью двойственного преобразования функции (1) и имеющую следующий вид:

$$c_{n-i}^{\text{д}} = D(c_{n-i}) = \overline{\overline{a_{n-i} \cdot z_{1(i-1)}^{\text{д}} \cdot b_{n-i} \cdot z_{2(i-1)}^{\text{д}}}} , \quad (4)$$

где

$$z_{1(i-1)}^{\text{д}} = D(z_{1(i-1)}) = \begin{cases} 1 & \text{при } i=1 \\ \overline{\overline{a_{n-i+1} \cdot z_{1(i-2)}^{\text{д}} \cdot b_{n-i+1} \cdot z_{2(i-2)}^{\text{д}} \cdot z_{1(i-2)}^{\text{д}}}} & \text{при } i > 1 \end{cases} ; \quad (5a)$$

$$z_{2(i-1)}^{\text{д}} = D(z_{2(i-1)}) = \begin{cases} 1 & \text{при } i=1 \\ \overline{\overline{b_{n-i+1} \cdot z_{2(i-2)}^{\text{д}} \cdot a_{n-i+1} \cdot z_{1(i-2)}^{\text{д}} \cdot z_{2(i-2)}^{\text{д}}}} & \text{при } i > 1 \end{cases} . \quad (5b)$$

Здесь  $D()$  и  $\cdot$  – оператор двойственного преобразования и символ операции И.

В табл.2 приведены значения представляемых выражениями (5) функций  $z_{1(i-1)}^{\text{д}}(z_{1(i-2)}^{\text{д}}, z_{2(i-2)}^{\text{д}}, a_{n-i+1}, b_{n-i+1})$ ,  $z_{2(i-1)}^{\text{д}}(z_{1(i-2)}^{\text{д}}, z_{2(i-2)}^{\text{д}}, a_{n-i+1}, b_{n-i+1})$  на всех возможных наборах значений их аргументов.

Таблица 2 – Значения выражений (5) при  $i > 1$

$z_{1(i-2)}^{\text{д}}$	$z_{2(i-2)}^{\text{д}}$	$a_{n-i+1}$	$b_{n-i+1}$	$z_{1(i-1)}^{\text{д}}$	$z_{2(i-1)}^{\text{д}}$
1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0



Анализ данных, приведенных в табл.2, позволяет заключить, что: 1)  $z_{1(i-1)}^{\text{д}} = 1$  и  $z_{2(i-1)}^{\text{д}} = 0$  ( $z_{1(i-1)}^{\text{д}} = 0$  и  $z_{2(i-1)}^{\text{д}} = 1$ ) когда  $z_{1(i-2)}^{\text{д}} = 1$  и  $z_{2(i-2)}^{\text{д}} = 0$  ( $z_{1(i-2)}^{\text{д}} = 0$  и  $z_{2(i-2)}^{\text{д}} = 1$ ) или  $z_{1(i-2)}^{\text{д}} = z_{2(i-2)}^{\text{д}} = 1$  и  $a_{n-i+1} > b_{n-i+1}$  ( $z_{1(i-2)}^{\text{д}} = z_{2(i-2)}^{\text{д}} = 1$  и  $b_{n-i+1} > a_{n-i+1}$ ); 2)  $z_{1(i-1)}^{\text{д}} = z_{2(i-1)}^{\text{д}} = 1$  когда  $z_{1(i-2)}^{\text{д}} = z_{2(i-2)}^{\text{д}} = 1$  и  $a_{n-i+1} = b_{n-i+1}$ .

С учетом (4) и результатов указанного анализа можно записать

$$c_{n-1}^{\text{д}} = \begin{cases} a_{n-1} & \text{при } a_{n-1} \geq b_{n-1} \\ b_{n-1} & \text{при } b_{n-1} > a_{n-1} \end{cases}, \quad (6a)$$

$$c_{n-k}^{\text{д}} = \begin{cases} a_{n-k} & \text{при } a_{n-1} \cdot a_{n-k+1} = b_{n-1} \cdot b_{n-k+1} \text{ и } a_{n-k} \geq b_{n-k} \\ & \text{или при } a_{n-1} \cdot a_{n-k+1} > b_{n-1} \cdot b_{n-k+1} \\ b_{n-k} & \text{при } a_{n-1} \cdot a_{n-k+1} = b_{n-1} \cdot b_{n-k+1} \text{ и } b_{n-k} > a_{n-k} \\ & \text{или при } b_{n-1} \cdot b_{n-k+1} > a_{n-1} \cdot a_{n-k+1} \end{cases}. \quad (6b)$$

На основании выражений (6) нетрудно сделать вывод, что функция (4) формирует разряды  $n$ -разрядной двоичной переменной  $C^{\text{д}} = (c_{n-1}^{\text{д}} \dots c_0^{\text{д}})_2$ , для которой справедливо равенство  $C^{\text{д}} = \max(A, B)$ .

Таким образом, логические функции (1), (4) являются математическими моделями элементов MIN, MAX, соответственно. При этом такие элементы будут иметь однородный аппаратный состав, поскольку элемент MAX (MIN) может быть построен с использованием логических элементов И-НЕ (ИЛИ-НЕ).

### Список литературы

1. Андреев, Д.В. Универсальные логические модули для обработки многозначных и континуальных данных / Д.В. Андреев. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 234 с.
2. Пат. 2300130 на изобретение, Российская Федерация, МПК G 06 F 7/02. Устройство селекции меньшего из двух двоичных чисел / Андреев Д.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т». – № 2006100459/09; заявл. 10.01.2006; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15. – 6 с.
3. Пат. 2300135 на изобретение, Российская Федерация, МПК G 06 F 7/02. Устройство селекции большего из двух двоичных чисел / Андреев Д.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т». – № 2006100469/09; заявл. 10.01.2006; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15. – 6 с.
4. Пат. 2363034 на изобретение, Российская Федерация, МПК G 06 F 7/02. Устройство селекции большего из двух двоичных чисел / Андреев Д.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т». – № 2008100526/09; заявл. 09.01.2008; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21. – 6 с.
5. Пат. 2606311 на изобретение, Российская Федерация, МПК G 06 F 7/00. Селектор двоичных чисел / Андреев Д.В., Каргов П.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т». – № 2015117731; заявл. 12.05.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 10 с.

*Материал принят к публикации 08.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997efd35509.26510616

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В САПР MATLAB

**Никита Ильич Антоненко**, студент, nantonenko59@gmail.com

**Александр Сергеевич Меркутов**, к.т.н., доцент, merkutov@yandex.ru

Владимирский государственный университет имени Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Российская Федерация, Владимир

*Аннотация. Приведён обзор средств моделирования усилителей радиопередающих устройств в САПР Matlab, а также их возможности и ограничения.*

*Ключевые слова: радиопередающее устройство, САПР Matlab, усилитель, предвысказатель.*

### MODELING OF RADIO TRANSMITTER AMPLIFIERS IN MATLAB CAD

Nikita I. Antonenko, student, nantonenko59@gmail.com

Aleksandr S. Merkutov, candidate of technical sciences, assistant professor, merkutov@yandex.ru

Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Russian Federation, Vladimir

*Abstract. A review of modeling tools for radio transmitter amplifiers in Matlab CAD, as well as their capabilities and limitations, is given.*

*Keywords: radio transmitting device, Matlab CAD, amplifier, predistorter.*

Современные стандарты связи четвёртого и пятого поколения используют OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) модуляцию, отличительной особенностью которой является наличие множества близко расположенных ортогональных поднесущих сигнала. Шумоподобная структура сигнала с периодически возникающими большими пиками мгновенной мощности может привести к значительному увеличению уровней внутрисполосных интермодуляционных составляющих и боковых лепестков в спектре мощности на выходе усилителя [1].

Требования к уровням внеполосных излучений радиопередающего устройства регламентируются стандартами связи и накладывают ограничения на мощность выходного сигнала и эффективность усилителя. Для соблюдения вышеуказанных требований необходимо, чтобы усилитель работал в линейном режиме с низким значением коэффициента полезного действия, который не будет превышать 10%. Линеаризация усилителя позволит повысить его эффективность при функционировании в нелинейном режиме [2]. Для линеаризации усилителей используются цифровые предвысказатели, вносящие в передаваемый сигнал искажения, обратные тем, которые накладываются на сигнал при его прохождении через усилитель.

Цель моделирования усилителей заключалась в исследовании энергоэффективных способов предвысказания сигнала.

© Антоненко Н.И., Меркутов А.С., 2021

САПР и моделирование в современной электронике. С. 217 – 220.

САПР Matlab предоставляет набор инструментов для моделирования усилителей. Для проведения исследований был использован OFDM сигнал с модуляцией QAM-64 символов поднесущих и следующими параметрами: ширина полосы 100 МГц, частота дискретизации 700 МГц.

На начальных этапах исследований были рассмотрены модели усилителей без памяти. Эффект памяти в усилителях определяется наличием реактивных цепей в схеме усилителя.

В САПР Matlab для моделирования усилителей предлагается использовать класс Amplifier. Класс имеет 4 типа моделей усилителя, определяемых их передаточными характеристиками.

Кубический полином. Данная модель описывается выражением

$$F_{AM/AM}(|s_{in}|) = c_1 |s_{in}| + \frac{3}{4} c_3 |s_{in}|^3$$

где  $F_{AM/AM}$  – амплитуда выходного сигнала,  $s_{in}$  – входной сигнал,  $c_1$  и  $c_3$  – коэффициенты [3].

На рисунке 1 представлен спектр сигнала до и после усилителя. Параметры модели усилителя: коэффициент усиления  $G = 10$  дБ, точка насыщения по входу  $P_{in,sat} = 20$  дБм, мощность сигнала на входе усилителя  $P_{s,in} = 9,34$  дБм. отличии от

Мощность выходного сигнала усилителя была нормализована к мощности входного сигнала для удобства сравнения. Мощность на входе усилителя (дБм) вычислялась по формуле

$$P_{s,in} = P_{in,sat} - PAPR \quad (2)$$

где  $PAPR$  – отношение пиковой мощности к средней в дБ, которое для входного OFDM сигнала составило 10,65 дБ.

При такой мощности сигнала наблюдаются искажения, приводящие к росту уровней боковых лепестков спектра сигнала в полосе от -150 МГц до -50 МГц и полосе от 50 МГц до 150 МГц. За пределами двух указанных полос увеличения мощности не наблюдается.

В стандартах систем связи для оценки уровня боковых лепестков используется параметр  $ACLR$  – Adjacent Channel Leakage Ratio, который вычисляется как отношение мощности сигнала в основной полосе (для тестового сигнала от -50 МГц до 50 МГц) к мощности сигнала в соседней полосе (для тестового сигнала есть две полосы от -150 МГц до -50 МГц и от 50 МГц до 150 МГц).  $ACLR$  для входного сигнала усилителя составило 55 дБ, а для выходного сигнала - плюс 37 дБ, что на 18 дБ меньше чем у входного.

Класс Amplifier включает ещё 3 типа моделей усилителя: модель Салеха, модифицированная модель Раппа, и табличную модель.

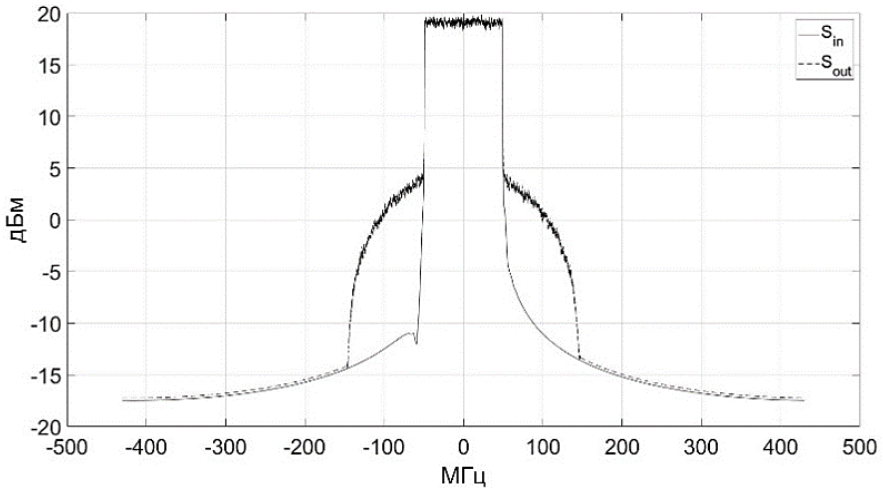


Рисунок 1 – Спектр сигнала до и после усилителя

Для моделирования усилителя, обладающего эффектом памяти, используются модели на основе рядов Вольтерры [2]. Для этого в Matlab сначала необходимо определить коэффициенты полинома, используя динамическую характеристику тестируемого усилителя. Коэффициенты рассчитываются на основании метода наименьших квадратов. После их получения можно использовать класс `comm.DPD` для моделирования усилителя. Данный класс предназначен для моделирования предсказателей, но так как модель усилителя от модели предсказателя отличается только коэффициентами полинома, то данный класс также можно использовать и для моделирования самих усилителей.

При проведении тестирования использовались коэффициенты, рассчитанные для усилителя NXP Airfast LDMOS Doherty PA. Коэффициент передачи этого усилителя  $G = 29$  дБ, точка насыщения  $P_{in,sat} = 29$  дБм. Спектр входного и выходного сигнала представлен на рисунке 2. Мощность входного сигнала рассчитывалась по формуле (2) и составила 0,06 дБм. ACLR выходного сигнала составило 39 дБ, что отличается от результата, полученного для модели без памяти на 2 дБ.

Как видно из рисунка 2, боковые лепестки спектра присутствуют также и в диапазонах частот от 150 МГц до 500 МГц и от -500 МГц до -150 МГц в отличии от модели без памяти.

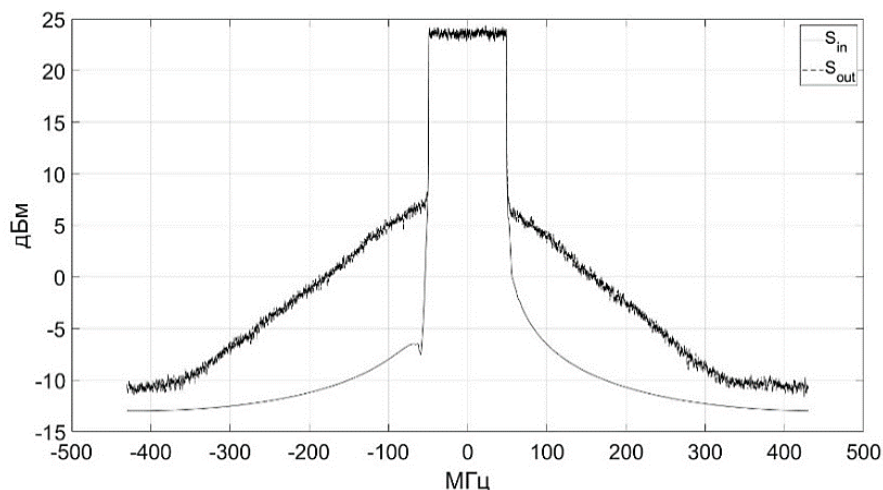


Рисунок 2 – Спектр сигнала до и после усилителя

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Модель усилителя без памяти по уровню ACLR в полосах от -150 МГц до -50 МГц и от 50 МГц до 150 МГц отличается от модели с памятью незначительно (на 2 дБ). Моделирование усилителя с памятью показало, что искажения, наблюдаются в частотных диапазонах от -500 МГц до -150 МГц и от 150 МГц до 500 МГц, которые отсутствуют в модели без памяти. Подготовка коэффициентов для моделей с памятью требует получения результатов предварительного измерения динамической характеристики усилителя, что усложняет процесс моделирования.

#### Список литературы

1. Mathias, Friese OFDM SIGNALS WITH LOW CREST-FA / Friese Mathias// GLOBECOM 97. IEEE Global Telecommunications Conference. Conference Record. — Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1997. — С. 290-294.
2. Fadhel, M, Ghannouchi, Oualid, Hammi, Mohamed Behavioral modeling and predistortion of wideband wireless transmitters / M, Ghannouchi, Oualid, Hammi, Mohamed Fadhel. — edition first. — Chennai: Willey, 2015. — 253 с.
3. Nonlinearities and Noise in Idealized Baseband Amplifier Block // mathworks: [сайт]. — URL: [https://www.mathworks.com/help/simrf/gs/noise-and-nonlinearities-in-idealized-amplifier-and-mixer-blocks.html#mw\\_4e9fbda6-4fc8-455e-ad29-2f53dfa6184a](https://www.mathworks.com/help/simrf/gs/noise-and-nonlinearities-in-idealized-amplifier-and-mixer-blocks.html#mw_4e9fbda6-4fc8-455e-ad29-2f53dfa6184a) (дата обращения: 5.10.2021).

Материал принят к публикации 12.10.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997efdee645.92575803

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

*Денис Викторович Барабанов*, студент, dinsdeni322@gmail.com

*Александр Анатольевич Пугачев*, зав. кафедрой, д.т.н., доцент  
alexander-pugachev@rambler.ru

Брянский государственный технический университет  
Российская Федерация, Брянск

*Аннотация.* Приведены результаты моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов синхронного двигателя мощностью 8,1 кВт в режиме компенсации реактивной мощности в программном комплексе Matlab Simulink.

*Ключевые слова:* электропривод, синхронный двигатель, коэффициент мощности.

### SIMULATION OF REACTIVE POWER COMPENSATION OF SYNCHRONOUS MOTOR

Denis V. Barabanov, student, dinsdeni322@gmail.com

Alexander A. Pugachev, head of department, doctor of technical sciences, docent  
alexander-pugachev@rambler.ru

Bryansk State Technical University, Russian Federation, Bryansk

*Abstract.* Simulation results of electromagnetic and electromechanical processes of 8,1 kW synchronous motor in transient mode are presented. Simulation was carried out by means of Matlab Simulink for the motor with feedback on power factor to provide compensation of reactive power.

*Keywords:* electric drive, synchronous motor, power factor.

В настоящее время синхронные двигатели находят все большее применение в высоковольтных электроприводах. Основной причиной внедрения синхронных двигателей является возможность регулирования коэффициента мощности их обмотки статора за счет применения автоматических систем регулирования тока возбуждения. В данной статье приведены результаты моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов синхронного двигателя в режиме компенсации реактивной мощности.

В качестве базовой модели взята математическая модель синхронного двигателя, приведенная в работе [1], основанная на дифференциальных уравнениях, описывающих переходные процессы в двухфазной системе координат, вращающейся с частотой вращения магнитного поля ротора. Коэффициент мощности вычислен на основе обратных связей по току и напряжению статора посредством известных выражений [2]. Для усиления

рассогласования сигналов задания и обратной связи применен ПИ-регулятор, сигнал с которого является управляющим для преобразователя напряжения обмотки возбуждения. Результаты моделирования синхронного двигателя мощностью 8.1 кВт приведены на рис. 1 – 3. Пуск двигателя осуществлен на холостом ходу, в момент времени  $t = 4$  с момент сопротивления изменен ступенчато от  $M_c = 0$  до  $M_c = 55$  Нм, в момент времени  $t = 6$  с момент сопротивления изменен ступенчато от  $M_c = 0$  до  $M_c = 35$  Нм.

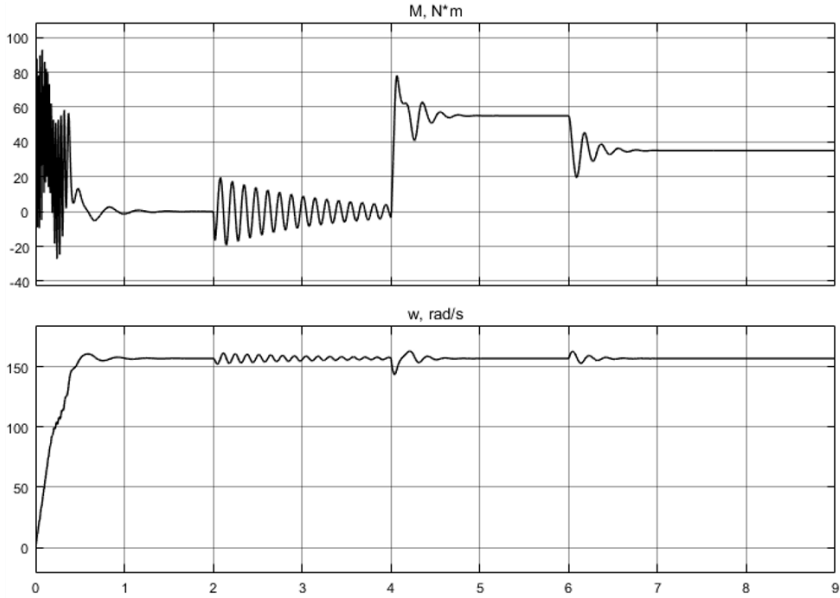


Рисунок 1 – Осциллограммы момента и частоты вращения синхронного двигателя

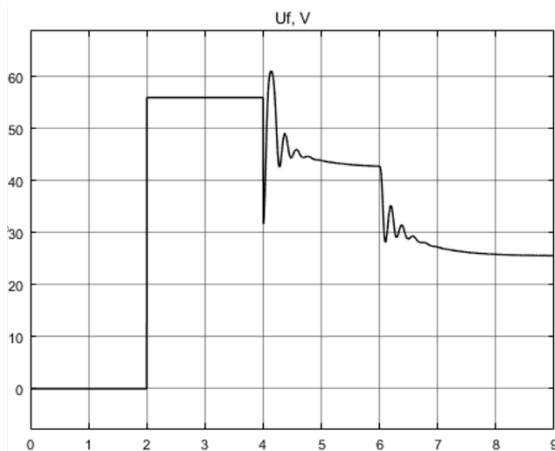


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения обмотки возбуждения двигателя

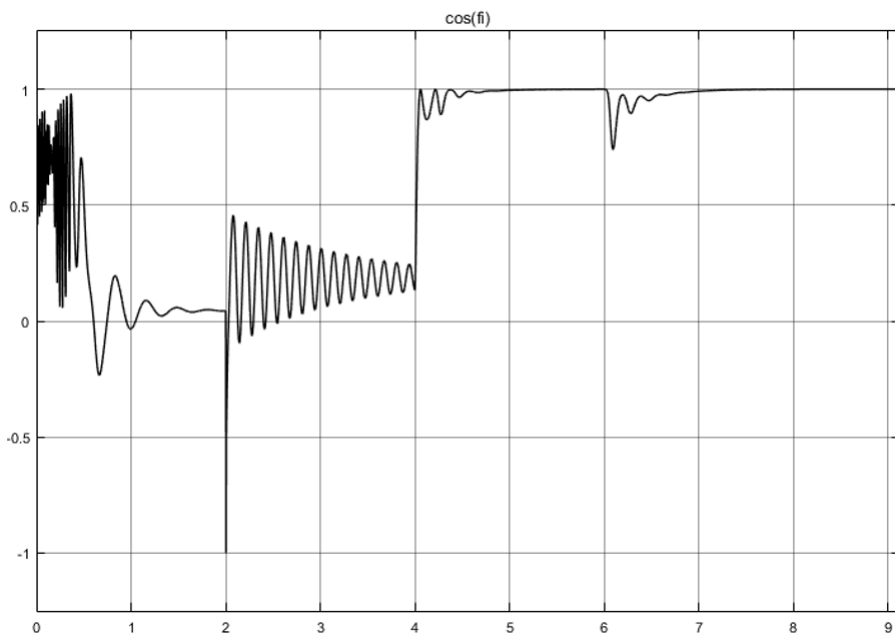


Рисунок 3 – Осциллограммы коэффициента мощности

Заданием на коэффициент мощности при работе под нагрузкой является единица. Результаты моделирования показывают, что синтезированный ПИ-регулятор обеспечивает выполнение поставленной задачи при выбранных моментах сопротивления. Графики механических переменных и напряжения обмотки возбуждения также подтверждают адекватность разработанной модели электропривода с синхронным двигателем в режиме компенсации реактивной мощности. Следующей задачей исследования ставится применение дискретного преобразователя напряжения в цепи обмотки возбуждения, а также учет насыщения и других типовых нелинейностей при работе двигателя.

#### Список литературы

1. Boldea, I. Synchronous Generators / I. Boldea. – CRC Press. – 2016. – 496 p.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов – М.: Высш.шк., 2001 – 327 с.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*



УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997efea06a2.89863759

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С МНОГОУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

**Денис Викторович Барабанов**, студент, dinsdeni322@gmail.com

**Александр Анатольевич Пугачев**, зав. кафедрой, д.т.н., доцент  
alexander-pugachev@rambler.ru

Брянский государственный технический университет  
Российская Федерация, Брянск

*Аннотация. Выполнено моделирование электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты с многоуровневыми инверторами напряжения, приведены и проанализированы сравнительные результаты моделирования, даны рекомендации по дальнейшему направлению исследований.*

*Ключевые слова: электропривод, преобразователь частоты, многоуровневый инвертор.*

### SIMULATION OF MULTI-LEVEL VOLTAGE SOURCE INVERTER FREQUENCY CONVERTER

Denis V. Barabanov, student, dinsdeni322@gmail.com

Alexander A. Pugachev, head of department, doctor of technical sciences, docent, alexander-pugachev@rambler.ru

Bryansk State Technical University, Russian Federation, Bryansk

*Abstract. Simulation of induction motor electric drive with multi-level voltage source inverter frequency converter are carried out, the comparative simulation results are presented and discussed, the recommendations on further investigations are highlighted.*

*Keywords: electric drive, frequency converter, multilevel inverter.*

Современный электропривод с асинхронным двигателем содержит в силовом канале преобразователь частоты, выполненный по схеме «выпрямитель – звено постоянного тока – автономный инвертор напряжения». Улучшение механических, регулировочных и энергетических характеристик электропривода долгое время шло за счет совершенствования алгоритмов и систем управления двигателя и инвертора. Однако в последние десятилетия наметилась устойчивая тенденция к разработке новых топологий преобразователей частоты за счет применения многоуровневых инверторов, активное внедрение которых происходит, прежде всего, в высоковольтных электроприводах. Основным преимуществом такого преобразователя является использование только низковольтных компонентов, при этом он дает возможность управлять нагрузкой среднего и высокого диапазона напряжения. Другим преимуществом многоуровневых автономных инверторов напряжения является повышение надежности их работы за счет увеличения полупроводниковых приборов и появления определенной

избыточности, что обуславливает их применение и в низковольтных электроприводах. Помимо этого, целью применения многоуровневых преобразователей является улучшение гармонического состава выходных напряжений и токов, увеличение частоты коммутации полупроводниковых приборов, уменьшение скорости изменения выходного напряжения полупроводников  $du/dt$ , что ведет, в свою очередь, к меньшим габаритам выходных фильтров и реакторов (при их наличии) [1].

В данной работе проведено моделирование одного из вариантов многоуровневого инвертора (на примере 5-, 7- и 11-уровневого исполнения), выполненного по каскадной схеме включения. Инвертор с каскадной схемой включения состоит из нескольких однофазных инверторов (силовых ячеек), соединенными последовательно для формирования фазы. Главным достоинством каскадных схем является относительная простота алгоритмов коммутации, основные проблемы – необходимость в доступе к обоим концам обмотки статора или присутствие в схеме двух не связанных общим потенциалом конденсаторов звена постоянного тока, что вызывает проблему выравнивания их зарядов.

Принципиальная схема силовой ячейки показана на рис. 1а. Здесь приняты обозначения:  $VD1...VD4$  – диоды,  $VT1...VT4$  – транзисторы,  $U_d$  – напряжение выпрямителя (на рис. 1 не показан),  $p$  и  $n$  – положительный и отрицательный потенциалы соответственно. На рис. 1б показана реализация силовой ячейки и ее системы управления в Matlab SimPowerSystems и Simulation. Силовая ячейка содержит трехфазный мостовой выпрямитель, выполненный на основе стандартного блока Universal Bridge, сглаживающий конденсатор и однофазный инвертор, построенный на основе четырех блоков IGBT/Diode. На каждый транзистор подаются управляющие импульсы, сформированные системой управления. Система управления синтезирована по аналогии с системой управления двухуровневого инвертора и основана на формировании широтно-импульсного сигнала с использованием источника синусоидального и треугольного сигналов, а также логических элементов.

На рис. 2 приведена схема модели преобразователя частоты с 7-уровневым инвертором. В состав 7-уровневого преобразователя входят 9 однофазных инверторных ячеек (по три на каждую фазу). Нагрузкой является асинхронный двигатель. В связи с особенностями технической реализации напряжение на выпрямителе многоуровневого преобразователя частоты поступает от вторичных обмоток трансформатора. В разработанной модели входной трансформатор отсутствует и напряжение поступает от идеального источника трехфазного напряжения.

На рис. 3 – 6 представлены результаты моделирования 5-, 7- и 11-уровневых инверторов напряжения. Частота пульсаций выходного напряжения преобразователя частоты при неизменной частоте широтно-импульсной модуляции возрастает при увеличении числа ячеек в одной фазе. Пульсации напряжения в 7-уровневом преобразователе не превышают  $1/3$  его амплитуды, в 11-уровневом –  $1/5$ , в то время как в классическом

двухуровневом инверторе с широтно-импульсной модуляцией амплитуда пульсаций выходного напряжения равна амплитуде напряжения. Следовательно, форма кривой выходного напряжения у преобразователей частоты с каскадными схемами включения ближе к синусоиде, при этом чем больше силовых ячеек в фазе имеет преобразователей, тем лучше форма кривой напряжения.

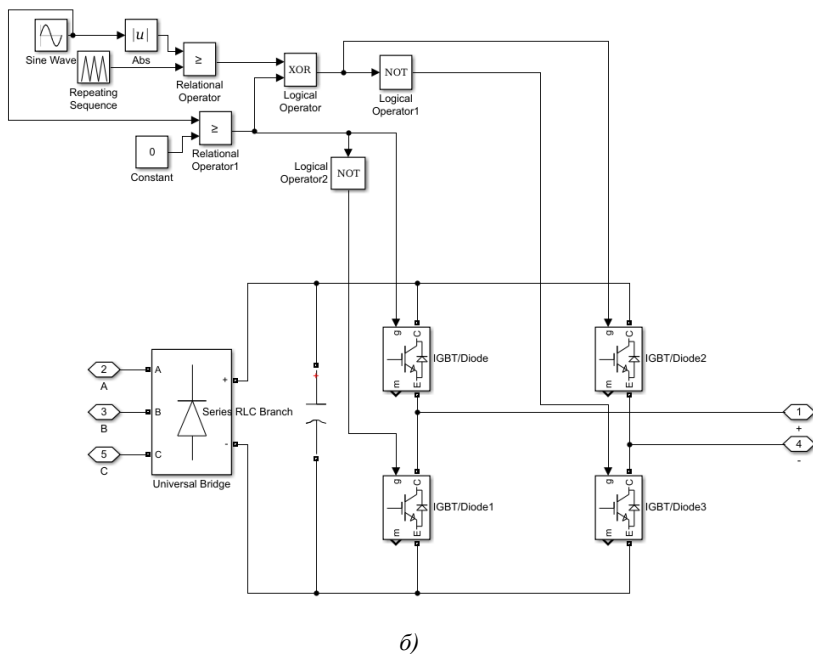
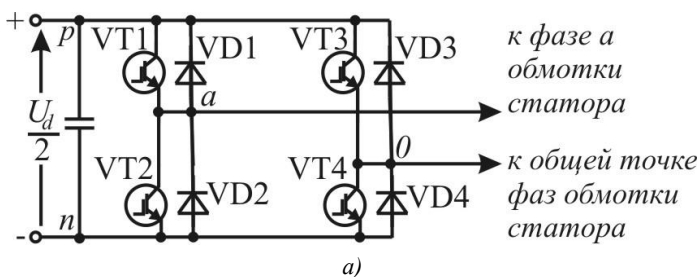


Рисунок 1 – Силовая ячейка инвертора с каскадной схемой включения

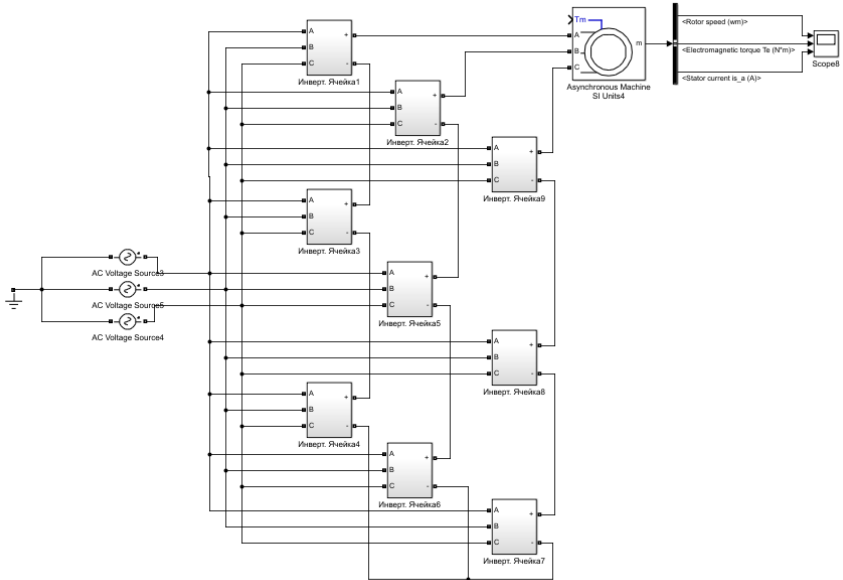


Рисунок 2 – Общий вид модели электропривода с 7-уровневым автономным инвертором напряжения

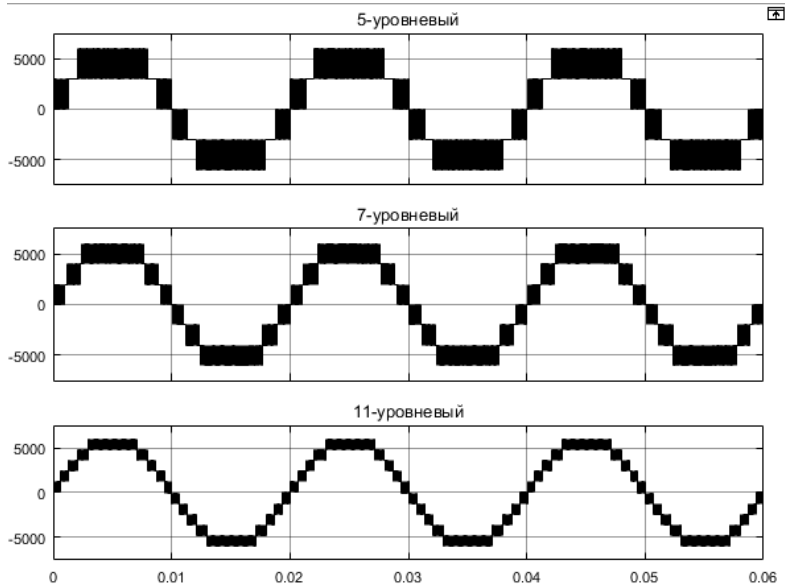
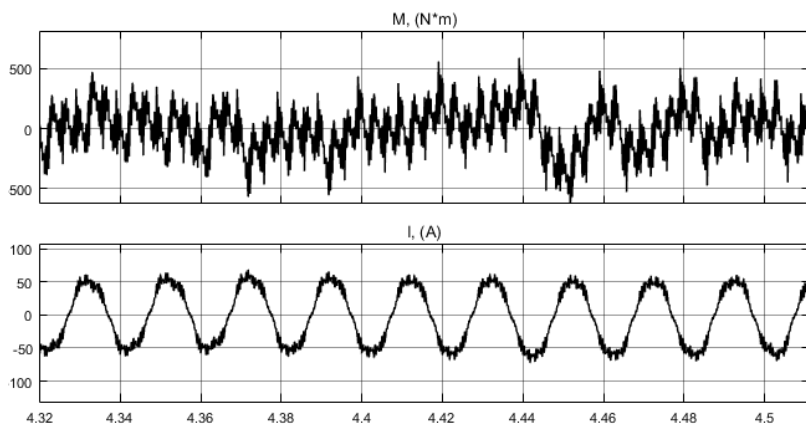
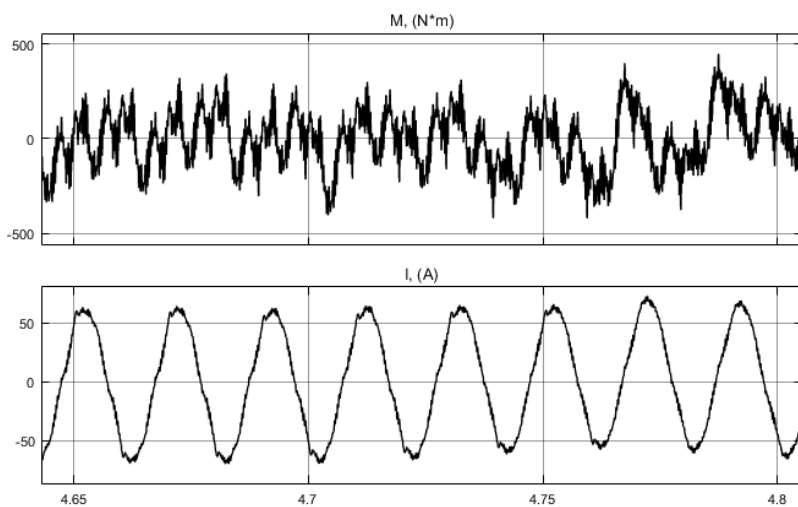


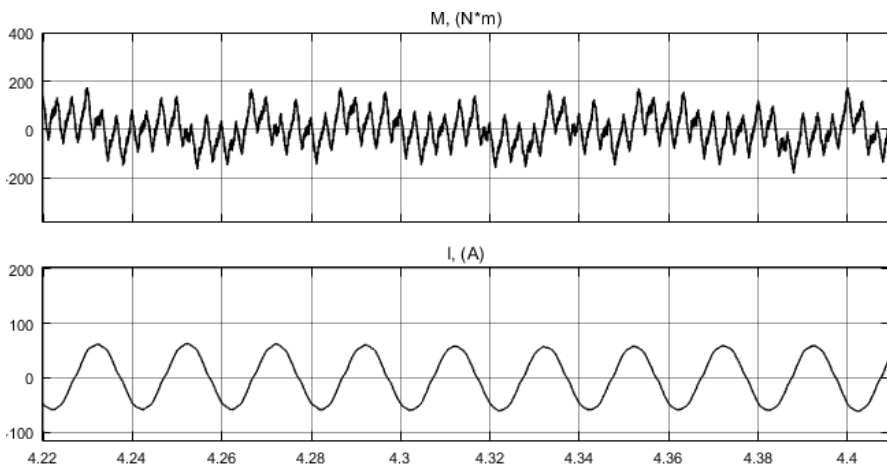
Рисунок 3 – Осциллограммы фазного напряжения на выходе преобразователя частоты



*Рисунок 4 – Осциллограммы момента и тока асинхронного двигателя при использовании 5-уровневого инвертора*



*Рисунок 5 – Осциллограммы момента и тока асинхронного двигателя при использовании 7-уровневого инвертора*



*Рисунок 6 – Осциллограммы момента и тока асинхронного двигателя при использовании 11-уровневого инвертора*

Таким образом, разработанная модель электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты с 7-уровневым автономным инвертором напряжения показала свою работоспособность. Следующей актуальной задачей исследования станет разработка модели высокودинамичной системы векторного управления или прямого управления моментом с использованием многоуровневого преобразователя с реализацией функции уменьшения потерь мощности.

#### **Список литературы**

1. Применение тяговых электроприводов с двух- и трехуровневыми автономными инверторами напряжения / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Наука и техника транспорта, 2013. - №1. – С.74 – 83.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

УДК 621.396.946

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0025624.78943589

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

**Мария Эдуардовна Буравлева**, студент, mariya.buravleva@mail.ru

**Давыд Денисович Кликно**, студент, kliknodavid@mail.ru

**Андрей Борисович Гладышев**, зав. кафедрой, к.т.н., a-glonass@yandex.ru

Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

*Аннотация.* В работе приведены результаты разработки программно-аппаратного комплекса для моделирования канала спутниковой связи. Показана структурная схема, состав и результаты экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* программно-аппаратный комплекс, спутниковые системы связи, DVB-S2, TCP/IP.

### SOFTWARE AND HARDWARE FOR MODELING A BROADBAND SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM

Maria E. Buravleva, student, mariya.buravleva@mail.ru

Davyd D. Klikno, student, kliknodavid@mail.ru

Andrey B. Gladyshev, head of department, candidate of technical sciences, a-glonass@yandex.ru

Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk

*Abstract.* The paper presents the results of the development of a software and hardware complex for simulating a satellite communication channel. Shown is a block diagram, composition and results of experimental studies.

*Keywords:* hardware and software complex, satellite communication systems, DVB-S2, TCP/IP.

В настоящий момент развитие удалённых и труднодоступных территорий, в том числе северных регионов Российской Федерации, обладает несомненной актуальностью. Данные территории богаты значительными природными ресурсами и имеют важное геополитическое значение для нашей страны [1].

Для успешного развития данных территорий необходимо создание сети телекоммуникаций и предоставление услуг связи. Одним из решений этой проблемы является использование спутниковой связи и применение методов широкополосного доступа к мультимедийным ресурсам и сети Интернет. Широкополосные сигналы с шириной спектра сигнала до 500 МГц являются наиболее перспективными в настоящее время [2].

Спутниковая связь обладает важнейшими достоинствами, необходимыми для построения крупномасштабных телекоммуникационных сетей.

На сегодняшний день наибольшими перспективами в области передачи данных обладают VSAT сети.

VSAT сети организованы по принципу применения в качестве абонентских терминалов – малых земных станций спутниковой связи (Very Small Aperture Terminal). Сеть малых земных станции спутниковой связи (МЗССС) управляется центральной земной станцией спутниковой связи (ЦЗССС). Особенностью таких станций является ее малые габариты и небольшой диаметр антенной системы. Классическая схема сети VSAT предоставляющей не только услуги связи, но и широкополосного доступа представлена на рис. 1.

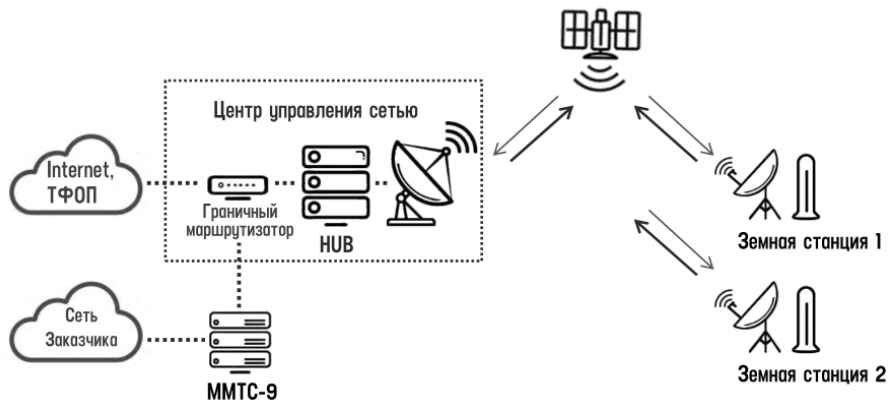


Рисунок 1 – Схема спутниковой системы по технологии VSAT

С помощью технологии VSAT можно достаточно оперативно организовать каналы связи и передачи данных на большой территории и практически не ограниченному количеству абонентов.

Сети VSAT могут иметь топологии: звезда, когда МЗССС может напрямую, «в один скачок», связаться с ЦЗССС, и полносвязная топология, когда абонентские станции могут связываться друг с другом (рис 2).

На сегодняшний день спутниковые системы связи, основанные на VSAT технологии могут предоставить услуги качественной телефонии, обеспечить высокую степень защиты при предоставлении широкого набора мультисервисных услуг, полнофункциональные сетевые услуги связи по протоколу IPv4 (с поддержкой IPv6).

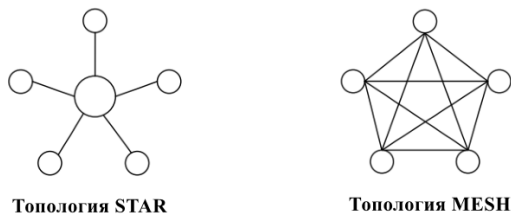


Рисунок 2 – Топология сетей VSAT



Стек протоколов TCP/IP — это концептуальная модель и набор коммуникационных протоколов, используемых в Интернете и других подобных компьютерных сетях. Но существуют проблемы, связанные с применением этих протоколов, обусловленные разбросом скоростей сетевых каналов, встречающихся при передаче трафика. Следовательно, возникают такие проблемы, как буферизация, фрагментация, отбрасывание пакетов, что является одной из основных причин падения скорости.

Формирование, прием и обработка протокола TCP/IP с использованием сигнально-кодовых конструкций стандарта DVB-S2 в широкой полосе позволяет значительно расширить канал передачи данных и, как следствие увеличить скорость передачи данных с использованием спутниковой связи. Это позволит более эффективно использовать спутниковую связь для передачи данных.

Для отладки методов широкополосного доступа на основе протокола TCP/IP был разработан программно-аппаратный комплекс моделирования канала спутниковой связи (ПАК). Основными элементами ПАК является имитатор земной станции и ретранслятор, работающие в существующих и перспективных диапазонах частот (Ku/Ka/Q). Кроме этого, ПАК обеспечивает имитацию работы системы обработки данных в канале спутниковой системы связи [3,4].

Структурная схема ПАК представлена на рис. 3.

Схему ПАК можно разделить на следующие элементы:

1)приемо-передающие устройства, имитирующее наземный сегмент ( NI PXIe-1085 – первая ЗССС, отладочная плата Zynq UltraScale+ RFSoc – вторая ЗССС);

2)приемо-передающее устройство, имитирующее бортовой сегмент (программно-определяемое реконфигурируемое радиоустройство NI-USRP 2954R – ретранслятор с обработкой на борту);

3)измерительная аппаратура;

4)управляющий компьютер с программным обеспечением, обеспечивающий управление имитационной моделью, а также отображение и документирование результатов.

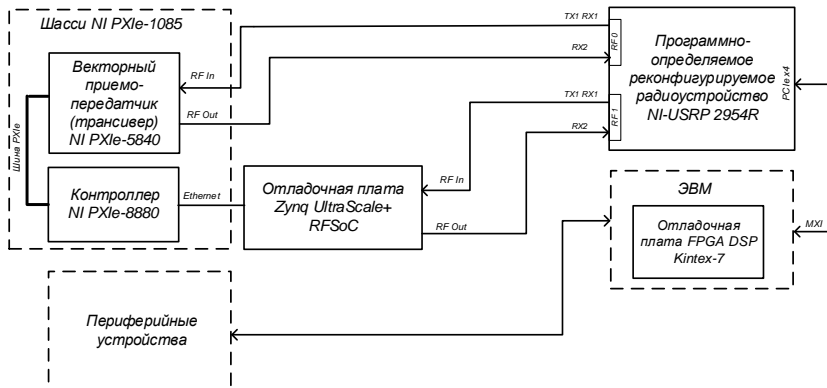


Рисунок 3 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

С помощью ПАК удалось сформировать сигналы DVB-S2, передать данные сигналы с первой ЗССС через ретранслятор на вторую ЗССС, осуществить их демодуляцию и получить преданное информационное сообщение.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволили показать пути для упрощения архитектуры земных станций спутниковой связи на основе использования уже имеющиеся каналы связи DVB-S2 для передачи данных по протоколу TCP/IP.

#### Список литературы

1. Организация выхода в интернет через спутник на севере Якутии / А.В. Мордовской, Л.Н. Румянцев, И.М. Гаврильева // Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы освоения Арктической зоны Северо-Востока России». 2018. С. 190-193.
2. Программно-аппаратный комплекс разработки и отладки методов формирования перспективных сигналов систем спутниковой связи / А.В. Мишуров, А.В. Жгун, М.А. Голубятников // Проспект свободный – 2019: материалы XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2019. С. 1889–1892.
3. Software and Hardware Development and Testing of Repeaters of Communication Satellites / Gladyshev A.B., Dmitriev D.D., Tyapkin V.N. // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 - Proceedings 2019. С. 8729616
4. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet / Dmitriev, D.D., Gladyshev, A.B., Ratuschnyak, V.N., Grithan, O.B. // Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1515(3), 032041.

Материал принят к публикации 05.10.21.

УДК 681.3.06

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f010a200.70586047

## **САПР ДЛЯ РЕШЕНИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

**Валентин Яковлевич Горин**, к.т.н., доц., gorinvya@gmail.com

**Евгения Витальевна Куть**, инженер, kut18forwork@gmail.com

**Ирина Борисовна Гуляева**, к.т.н., доц., iraguliaeva1969@gmail.com

Донецкий национальный технический университет, ДНР, Донецк

*Аннотация. Создание учебно-исследовательского варианта системы автоматизированного проектирования современных кабельных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения находится на завершающем этапе. Для УИ САПР КЛ разработано программное обеспечение, позволяющее решать проектно – исследовательские задачи для силового кабеля на напряжение 35-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Выполнена разработка документальной подсистемы УИ САПР КЛ, которая полностью отвечает нормативным требованиям.*

*Ключевые слова: создание системы автоматизированного проектирования кабельных линий, учебно-исследовательский вариант, кабель напряжением 35-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, документальная подсистема УИ САПР КЛ.*

### **CAD FOR SOLVING EDUCATIONAL RESEARCH PROBLEMS WHEN DESIGNING MODERN HIGH AND EXTRA HIGH VOLTAGE CABLE LINES**

Valentin Y. Gorin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, gorinvya@gmail.com

Evgeniya V. Kut, engineer, kut18forwork@gmail.com

Irina B. Gulyaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, iraguliaeva1969@gmail.com  
Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk

*Abstract. The development of teaching and research version of the computer aided design of cable lines of high and extra-high voltage is at the final stage. For TR CAD CL, software has been developed that allows solving design and research problems for a power cable for a voltage of 35-500 kV with XLPE insulation. The development of the documentary subsystem TR CAD CL, which fully meets the regulatory requirements, has been completed.*

*Keywords: development of the computer aided design of cable lines, teaching and research version, cable for a voltage of 35-500 kV with XLPE insulation, documentary subsystem TR CAD CL.*

На кафедре электрических систем ДонНТУ, начиная со второй половины 70х годов прошлого столетия, результативно и в достаточном для вуза объеме решались и решаются в настоящее время в полном соответствии с рекомендациями [1] проблемы создания, использования и постоянного развития САПР воздушных ЛЭП напряжением 35 – 750 кВ. Приобретенный и накопленный опыт работы с этой САПР позволил на определенном этапе предложить аналогичный по структуре, но с учетом специфики

проектируемого объекта (ВЛ или КЛ), учебно-исследовательский вариант УИ САПР кабельных ЛЭП с изоляцией из сшитого полиэтилена (КСПЭ) напряжением 35 – 500 кВ.

Предложенная изначально структура базовой версии УИ САПР КЛ [2,3,4], которой присвоен условный индекс 01.КЛ, предусматривает ее использование в виде двух характерных взаимосвязанных системных проектирующих модулей высокого уровня (своего рода «надсистем») с соответствующими функциональными признаками: техническая и документальная. Техническая система содержит линейную и строительно-монтажную подсистемы. Проектные разработки с использованием создаваемой УИ САПР КЛ завершались на определенных этапах оформлением соответствующих версий структурных (функциональных) схем. Такая поэтапная реструктуризация позволяет не только успешно решать локальные проектные задачи, но также совершенствовать и развивать саму УИ САПР КЛ как эффективный инструмент для проектирования современных кабельных ЛЭП ВЛ и СВЛ. Если базовая версия 01.КЛ использовалась для расчета конструктивных элементов проектируемого кабеля и частично электрического расчета [3,4], то версии 02.КЛ и 03.КЛ позволили завершить разработки программных модулей для электрического и теплового расчетов [5,6,7]. Версии 04.КЛ и 05.КЛ были построены уже по модульному принципу и прошли технологическую проверку в пробных проектных расчетах кабелей напряжением 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Результаты проверки подтвердили [6] эффективность использования полученных модульных разработок в линейной подсистеме. Наряду с этим, предложено провести модульную реструктуризацию линейной подсистемы, остановившись на трехмодульной структуре этой подсистемы:

М-1: модуль расчета конструктивных параметров кабеля;

М-2: модуль электрического расчета;

М-3: модуль теплового расчета.

Такое укрупнение, по нашему мнению, позволило унифицировать разрабатываемое прикладное программное обеспечение, выполняя необходимые проектные расчеты с учетом структурных связей между вновь образованными модулями линейной подсистемы.

Сегодня нами предлагается новая версия 0.6 КЛ структурной схемы УИ САПР КЛ ВЛ И СВЛ (рис.1). При этом обращаем внимание на следующие обстоятельства. Если разработку модулей М-1 и М-3 можно считать в определенной мере завершенной, то для модуля М-2 предстоит создать прикладное программное обеспечение для проведения проектных расчетов заземления рассчитываемого кабеля, что и является одной из задач настоящей работы.

По результатам автоматического расчета системы заземления пользователь выбирает её исполнение: «разомкнутая» или «замкнутая». Выбор конфигурации несет экономический эффект: «замкнутая» система заземления предусматривает протекание тока по экрану, что несет

дополнительные потери мощности. «Разомкнутая» система исключает траты на дополнительные электрические потери, но сооружение КЛ такой конфигурации более затратный. В первом случае также снижается пропускная способность КЛ и требуется большее сечение токопроводящей жилы. Сравнение систем реализовано в модифицированном программном обеспечении.

Для КЛ ВН и СВН рассчитываются три схемы соединения экранов: двухстороннее, одностороннее и транспозиционное. Выбор пользователя основывается на значениях токов трехфазного КЗ, однофазного КЗ, максимального рабочего тока. Также для системы с двусторонним заземлением рассчитывается коэффициент  $k_u$ , отображающий степень использования пропускной способности КЛ и равный отношению длительно допустимого тока в жиле с учетом его протекания в экране к силе тока в идеальных условиях (без его протекания в экране). Такой способ заземления кабеля можно считать эффективным, если значение  $k_u$  стремится к 0,9–1,0.

Строительно-монтажная подсистема состоит из пяти структурных звеньев, получивших на начальных этапах разработок УИ САПР КЛ названия «расчетных блоков» в ранних версиях, или «проектных модулей» в последних разработках [7]. Это выбор трассы; рытье траншей; укладка кабелей; установка соединительных муфт; закрытие траншей. К настоящему времени эта подсистема играет очень важную роль в практической реализации разработанного с помощью УИ САПР КЛ проекта кабельной ЛЭП.

Документальная система УИ САПР КЛ состоит из девяти основных типов документов (Д), в которые поэтапно заносится информация в процессе проектирования. В её состав входят: сертификат качества кабеля; журнал прокладки кабелей; акты разбивки кабеля; приемки траншей, каналов под прокладку КЛ; на монтаж кабельных муфт; осмотра кабелей, проложенных в траншеях перед закрытием; проверки и опробования автоматических установок систем пожарной сигнализации. Кроме того, выполняется вычерчивание трассы КЛ, профиля трассы КЛ в местах ее пересечений с дорогами и прочими коммуникациями.

Создание документальной системы является второй задачей разработок настоящей работы в области автоматизации проектирования современных кабельных ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения.

Учитывая, что в настоящее время информационные технологии все шире входят в жизнь человека, меняют ее, формируют новые потребности и открывают возможности, которые не были доступны ранее, разрабатываемая УИ САПР КЛ ВН и СВН будет выглядеть как web-страница.

В качестве языка программирования в разработках на этом этапе использован JavaScript, web-страница создана при помощи HTML и CSS.

Разработанное программное обеспечение для вновь организованных модулей М-1, М-2 и М-3 использовано в проектных компьютерных расчетах в линейной подсистеме УИ САПР для КСПЭ напряжением 110 кВ. Результаты

проектных расчетов, выполненных на базе разработанного ПО, приводятся в магистерских диссертациях студентов-выпускников кафедры.

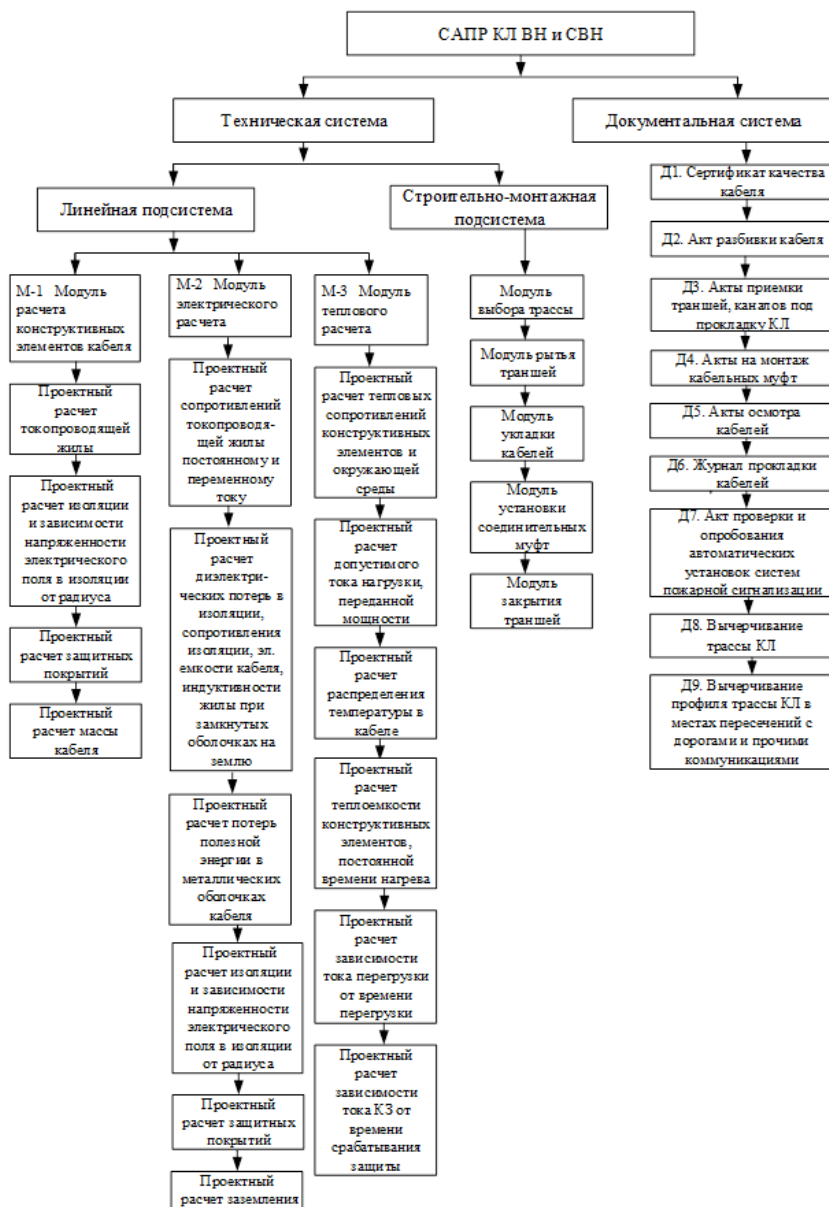


Рисунок 1 – Структурная схема УИ САПР КЛ ВН и СВН (версия 0.6 КЛ)

Как показал опыт пробного использования УИ САПР КЛ ВН и СВН, разработанной на кафедре электрических систем ДонНТУ, можно считать достаточно удобным и эффективным средством при проектировании современных кабельных ЛЭП напряжением 35-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

### Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7.
2. Горин В.Я., Ширококорядова Т.В. Розробка програмного забезпечення лінійної підсистеми навчально-дослідницької системи автоматизованого проектування кабельних ЛЕП високої та надвисокої напруги. – Наук. праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика», вип. 1(16). - Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 45-50.
3. Горин В.Я. Использование САПР для решения учебно-исследовательских задач при проектировании современных кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения/Е.В. Куть, Д.С. Христенко// САПР и моделирование в современной электронике [Текст] + [Электронный ресурс]: сб. науч. трудов I Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2017г., с. 49-53, БГТУ, Брянск.
4. Горин В.Я. Расширение функциональной области программного обеспечения в линейной подсистеме учебно-исследовательской САПР современных кабельных линий напряжением 35-330 кВ /Е.В. Куть, М.А. Минаев // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 26-28 мая 2020 г. Донецк: ДонНТУ, 2020. Т. 2: 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2020. - С. 79-82.
5. Горин В.Я. Разработка строительно-монтажной подсистемы САПР для решения учебно-исследовательских задач при прокладке современных кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения /Е.В. Куть, Г.М. Беркевич // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. IV международной научно-практической конференции, 22-23 октября 2020 г./ под общ. ред. А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 358– 363. ISBN 978-5-907271-73-9.

*Матеріал прийнят к публікації 12.10.21.*

УДК 621.382

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f01d0487.24220511

## ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

**Виталий Фёдорович Зотин**

Брянский государственный технический университет, доцент, к.т.н.  
Российская Федерация, Брянск, v.f.zotin@gmail

*Аннотация.* Предложена схема устройства для автоматизированного контроля ряда параметров высоковольтных диодов и транзисторов. Компьютерным моделированием подтверждены заявленные характеристики устройства.

*Ключевые слова:* программируемый источник напряжения, контроль параметров, моделирование.

### PROGRAMMABLE HIGH VOLTAGE SOURCE FOR PARAMETER MONITORING SEMICONDUCTOR DEVICES

Vitaly F. Zotin

Bryansk State Technical University, Associate Professor,  
Candidate of Technical Sciences, Bryansk, Russian Federation, v.f.zotin@gmail

*Abstract.* The scheme of the device for automated control of a number of parameters of high-voltage diodes and transistors is proposed. Computer modeling has confirmed the claimed characteristics of the device.

*Keywords:* programmable voltage source, parameter control, modeling.

При производстве карбидокремниевых диодов Шоттки и полевых транзисторов возникает задача автоматизированного контроля таких параметров, как обратный ток диода и начальный ток стока транзистора. Для приборов относительно небольшой мощности величина контролируемых токов находится в диапазоне 0...1 мА при испытательном напряжении до 1500 В.

Автор предлагает использовать в составе автоматизированного измерительного комплекса программируемый высоковольтный источник напряжения, схема которого в среде Simscap приведена на рис. 1.

Источник  $U_{in}$  моделирует задающий сигнал, формируемый контроллером измерительного комплекса. Этот сигнал вместе с сигналом обратной связи (делитель  $R_5$ ,  $R_6$ ) воспринимается операционным усилителем DA1, выполняющим функции регулятора.

В качестве исполнительного устройства применён высоковольтный каскад на транзисторах VT1 и VT2. При этом транзистор VT1 является стабилизатором суммарного тока через транзистор VT2 и нагрузку RC\_Load, имитирующую испытуемое изделие. Этот ток соответствует току короткого замыкания. Величина суммарного тока определяется «взвешенным» источником тока  $J=5\mu\text{A}$  и сопротивлениями резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .



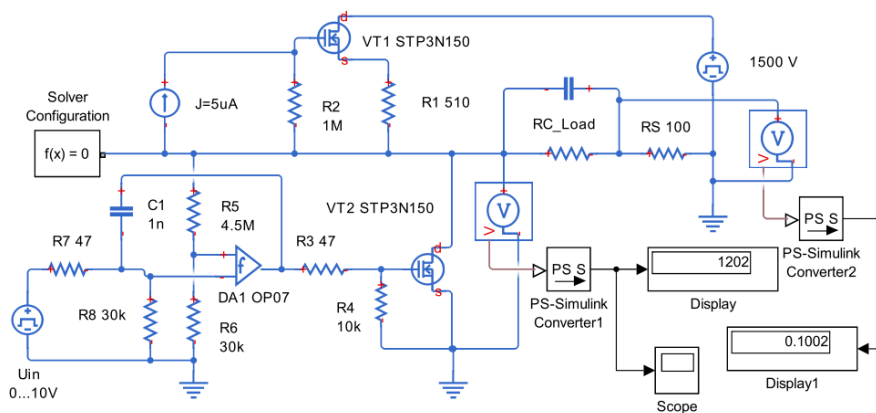


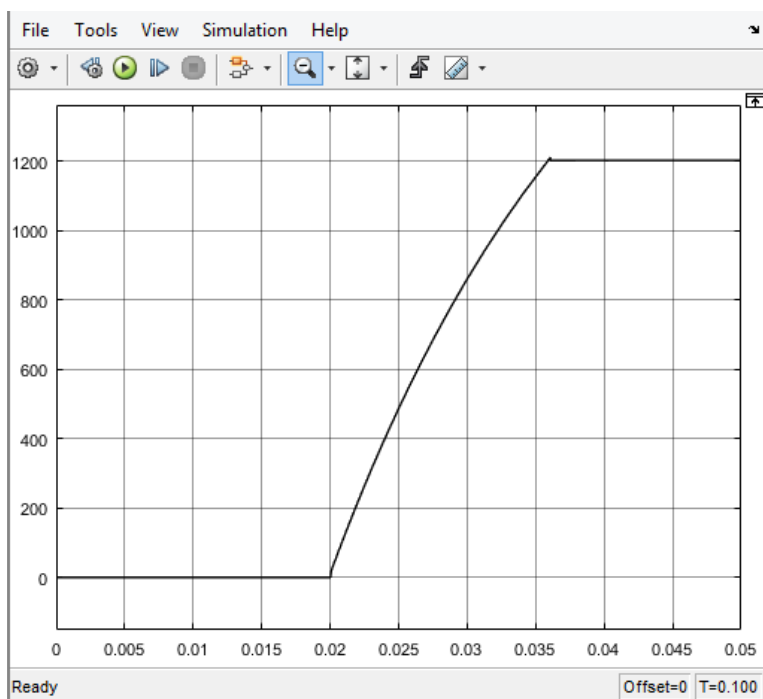
Рисунок 1 – Схема модели программируемого источника напряжения

Параметры модели операционного усилителя DA1 (рис. 2) выбраны в соответствии с типовыми значениями, указанными в документации производителя [1]. Это же касается и параметров транзисторов VT1 и VT2 [2].

Parameters	
Gain, A:	2e5
Input resistance, Rin:	20e7 Ohm
Output resistance, Rout:	60 Ohm
Minimum output, Vmin:	- 12 V
Maximum output, Vmax:	12 V
Maximum slew rate, Vdot:	1e5 V/s
Bandwidth, f:	6e5 Hz
Initial output voltage, V0:	0 V

Рисунок 2 – Параметры модели операционного усилителя DA1

Схема на рис. 1 содержит контрольные средства: измеритель установившегося выходного напряжения (Display) и измеритель тока (Display1) на основе шунта RS. Оценка динамических свойств программируемого источника производится с помощью Scope. Показания измерителей соответствуют заданию  $U_{in} = 8$  В и сопротивлению нагрузки 1,2 МОМ. Для этих исходных данных при ступенчатом нарастании напряжения  $U_{in}$  получена осциллограмма выходного напряжения, представленная на рис. 3. Она свидетельствует об отсутствии значительного перерегулирования.



*Рисунок 3 – Осциллограмма выходного напряжения*

С помощью серии имитационных экспериментов на основе модели по схеме рис. 1 установлено:

- 1) ступенчатое задание сигнала  $U_{in}$  не приводит к значительному перерегулированию, что важно при испытании полупроводниковых приборов;
- 2) вариация барьерной ёмкости испытуемого изделия не влияет на устойчивость контура регулирования и характер изменения выходного напряжения;
- 3) при выходном напряжении в диапазоне (15...1500) В обеспечивается максимальный ток нагрузки не менее 1 мА;
- 4) установившийся ток короткого замыкания в нагрузке при любом заданном напряжении не превышает 1,6 мА.

При технической реализации предложенной схемы программируемого источника напряжения необходим эквивалент «взвешенного» источника тока  $J=5\mu\text{A}$  (рис. 1). Предлагается использовать для этой цели микросхему фотоэлектрического изолятора PVI1050NS [3]. Микросхема содержит две оптопары с приёмником излучения в виде цепочки фотодиодов. Каждая из оптопар при токе излучающего диода, равном 10 мА, обеспечивает ток в сопротивлении нагрузки 1 МОм не менее 2,5 мкА. Поэтому целесообразно излучающие диоды соединить последовательно, а фотоприёмники – параллельно.

Необходимо отметить, что изоляция между входами и выходами данной микросхемы способна выдерживать напряжение с действующим значением до 2500 В.

Электропитание излучающих диодов микросхемы PVI1050NS возможно от источника напряжения  $\pm 12$  В (на схеме рис. 1 отсутствует), предназначенного для питания операционного усилителя. Целесообразно предусмотреть возможность подстройки тока излучающих диодов.

Очевидно дополнительная доработка предложенной схемы требуется и для узла формирования измерительного сигнала при контроле токовых параметров испытываемых изделий. Несмотря на то, что стандарт допускает погрешность измерения начального тока стока и обратного тока диода до 10%, проблема заключается в весьма широком диапазоне возможных значений – от 10 нА до 1 мА.

Предлагается диапазон измерения токов разбить на 5 поддиапазонов с верхними пределами 0,2, 2, 20, 200 и 2000 мкА. В этом случае шунт (RS на схеме рис. 1) должен иметь 5 номиналов сопротивления и коммутатор, управляемый контроллером измерительного комплекса. Для формирования измерительного сигнала, передаваемого в контроллер, целесообразно применить прецизионный инструментальный усилитель, например, микросхему INA818 [4].

Применение предела 2000 мкА позволяет идентифицировать перегрузку по выходу источника напряжения, включая короткое замыкание, без трансляции сигнала обратной связи по напряжению и его обработки контроллером.

В заключение необходимо отметить, что эксперименты, проведённые с опытным образцом устройства, содержащем регулятор и высоковольтный каскад согласно схемы рис. 1, подтвердили его работоспособность в заданных диапазонах напряжений и токов с показателями, близкими к полученным путём моделирования.

#### Список литературы

1. Analog Devices. Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/OP07.pdf> (дата обращения 08.10.2021).
2. STFW3N150, STH3N150-2 STP3N150, STW3N150 Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp3n150.pdf> (дата обращения 08.10.2021).
3. Infineon [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PVI1050N-DS-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462602a9dc801607b6ff00c5cca](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PVI1050N-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462602a9dc801607b6ff00c5cca) (дата обращения 08.10.2021).
4. Texas Instruments. INA818 35- $\mu$ V Offset, 8-nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Noise, Low-Power, Precision Instrumentation Amplifier [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina818.pdf> (дата обращения 08.10.2021).

*Материал принят к публикации 20.10.21.*

УДК 621.315.1

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f02afeb6.50235475

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАКЕТА МАТЛАБ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ В ЛЭП

**Артём Юрьевич Киселев**, магистрант, rs\_art@mail.ru

**Павел Сергеевич Пинчуков**, директор Электроэнергетического института, доцент кафедры «Системы электроснабжения», к.т.н., dee@festu.khv.ru

Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, Хабаровск

*Аннотация. Описаны возможности созданной в пакете Matlab имитационной модели участка ЛЭП номинальным напряжением 220 кВ при воздействии грозовых разрядов.*

*Ключевые слова: грозовые разряды, линии электропередачи, имитационная модель, Matlab.*

### THE PROSPECTS OF USING THE MATLAB PACKAGE FOR MODELING LIGHTNING DISCHARGES IN POWER TRANSMITTING LINES

A.Y. Kiselev, Master's degree student, rs\_art@mail.ru

P.S. Pinchukov, Director of the Electric Power Institute, Associate Professor of the Department of "Power Supply Systems", Candidate of Technical Sciences, dee@festu.khv.ru

Far Eastern State University of Railway Transport,  
Russian Federation, Khabarovsk

*Abstract. The possibilities of a simulation model of a power line section with a rated voltage of 220 kV created in the Matlab package under the influence of lightning discharges are described.*

*Keywords: lightning discharges, power lines, computer model, Matlab.*

Гротовые перенапряжения на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) возникают как при непосредственном поражении линии грозowymi разрядами (перенапряжения прямого удара молнии), так и при разрядах молнии в землю в окрестности линии (индуцированные перенапряжения). Перенапряжения прямого удара молнии представляют наибольшую опасность, и грозозащита линий должна ориентироваться именно на этот вид перенапряжений.

Для исследования грозовых перенапряжений выбран фрагмент ЛЭП номинальным напряжением 220 кВ протяженностью 1 км, содержащий шесть опор. Каждый из данных фрагментов, в свою очередь, состоит из двух элементарных участков линии (трех фазных проводов и одного грозозащитного троса) длиной 100 м, созданием которых представляется возможность моделировать разряд молнии в середину фазного провода и грозозащитного троса.

Имитационная модель участка ЛЭП, выполненная программными средствами Matlab/Simulink/SimPowerSystems, показана на рис.1.

Основными элементами модели являются:

1. Элементарный участок линии длиной 1 км, схема замещения которого представляет эквивалентную модель, состоящую из трех фазных проводов и одного грозозащитного троса (при необходимости имеется возможность введения в схему второго грозотроса подключением концевых клемм к свободным входам шестиполусников, являющихся эквивалентом схемы замещения опор ЛЭП). Между всеми пятью проводниками этого участка линии, а также землей существуют взаимные индуктивные и емкостные связи, для определения значений которых в работе использовалась специализированная программа, входящая в состав пакета Matlab – Powergui Compute RLC Line Parameters.

2. Эквивалентная схема замещения опоры ЛЭП согласно [1] содержит набор индуктивностей, вычисленных для каждого участка опоры по значению погонной индуктивности. Модель опоры включает также гирлянду изоляторов, представленную в виде эквивалентной емкости, значение которой определялось по [2].

3. Заземление опоры моделируется в виде активного сопротивления, значение которого может варьироваться в широких пределах. При необходимости в схему замещения сложного заземляющего устройства можно ввести присущую ему индуктивность, а в грунтах с высоким удельным сопротивлением и емкость [3].

4. Импульсный генератор тока, моделирующий разряд молнии амплитудой 100 кА, представленный в виде управляемого источника тока. При этом форма тока задана биэкспоненциальной функцией Брюса-Голда, которая с учетом рассчитанных декрементов в Simulink имеет вид:

$$100000/e^{-0,017 \cdot u} \cdot (e^{(-14300 \cdot u)} - e^{(-6 \cdot u)}).$$

5. Сопротивление нагрузки, подключенное на конце участка линии.

6. Виртуальные осциллографы как средство отображения кривых напряжений и токов в элементах линии, киловольтметры и килоамперметры.

Уникальность данной модели обусловлена следующим: во-первых, модель является оптимальной (не перегружена большим количеством опор ЛЭП, которое в практике для одной ЛЭП класса напряжения 220 кВ может составлять 500-600 опор), при этом позволяет моделировать разряды молний и получать данные переходных процессов в любом элементе ЛЭП с минимальным временем компьютерных итераций.

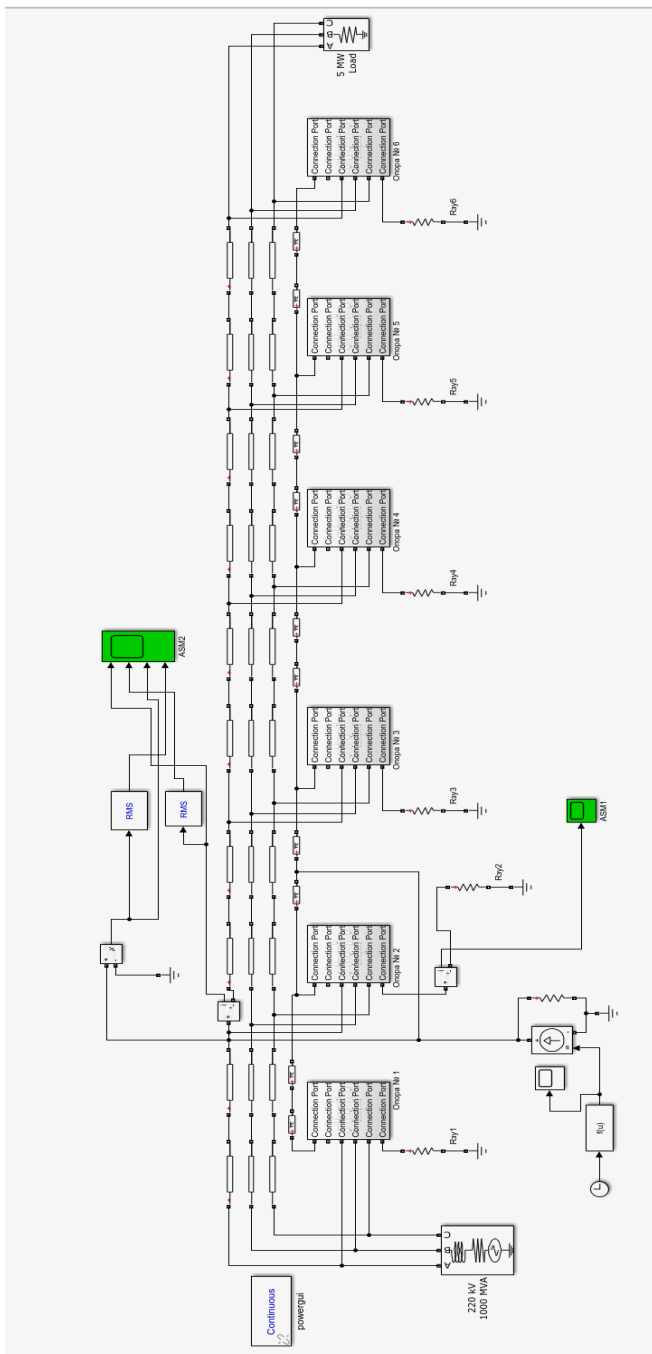


Рисунок 1 – Имитационная модель участка ЛЭП номинальным напряжением 220 кВ

Во-вторых, позволяет моделировать прямые удары молний со стандартной амплитудой тока 100 кА (или произвольно заданной) в фазные провода и грозозащитный трос в середине пролета опор ЛЭП, а также в опору ЛЭП. Генератор тока имитирует разряд молнии отрицательной полярности, что реализуется на практике в большинстве случаев, при этом имеется возможность внести изменения в расчетную зависимость кривой тока молнии, чтобы получить грозовой импульс положительной полярности (при необходимости) или другой формы.

В-третьих, в модели имеется возможность изменения параметров ЛЭП, таких как: сопротивление заземляющего устройства опор, сопротивление и емкость проводов и грозозащитных тросов (число тросов – до двух), емкость гирлянды изоляторов, взаимная индуктивность проводов и грозотросов, длина пролетов ЛЭП.

Разработанная модель может быть полезна для анализа переходных процессов при разрядах в разные элементы ЛЭП, например, позволяет установить зависимость скорости снижения тока молнии и величины падения напряжения на опоре ЛЭП от индуктивного сопротивления опоры и эквивалентного сопротивления заземляющего устройства.

#### Список литературы

1. *Подольцев А.Д.* Компьютерное моделирование грозовых перенапряжений в высоковольтной воздушной линии электропередачи // труды Института электродинамики НАН Украины. – 2017. С.94-106. – вып.16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29077287> (дата обращения – 17.03.2021).

2. *Разевиг Д.В.* Техника высоких напряжений / Под редакцией Д.В. Разевига. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 472 с.

3. *РД 153-34.3-35.125-99.* Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rd\\_153-34\\_3-35\\_125-99.pdf](https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rd_153-34_3-35_125-99.pdf) (дата обращения: 09.03.2021).

*Материал принят к публикации 05.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f037f3f9.88585937

## РАЗРАБОТКА ДАЛЬНОМЕРА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА РАССТОЯНИЯ HC-SR04

**Константин Павлович Клямеров**<sup>1</sup>, студент, k.klyamerov@gmail.com

**Андрей Александрович Лысенков**<sup>1</sup>, студент, lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>АО «НПК «Тристан», Россия, Смоленск

<sup>2</sup>Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация. В статье рассматривается разработка измерителя дальности до объекта в сантиметрах на основе ультразвукового датчика расстояния HC-SR04.*

*Ключевые слова: дальномер, таймер, прерывание по фронту, семисегментный индикатор, микроконтроллер.*

### DEVELOPMENT OF RANGE FINDER BASED ON ULTRASONIC DISTANCE SENSOR HC-SR04

Konstantin P. Klyamerov<sup>1</sup>, student, k.klyamerov@gmail.com

Andrei Al. Lysenkov<sup>1</sup>, student, lysenkovandrew02@gmail.com

<sup>1</sup>NPK Tristan JSC, Russia, Smolensk

Sergey Al. Amelin<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The article considers the development of a range meter to an object in centimeters based on an ultrasonic distance sensor HC-SR04.*

*Keywords: range finder, timer, front interruption, seven-segment indicator, microcontroller.*

Для разработки роботехнических устройств, способных к самостоятельному передвижению актуальной задачей является разработка встроенной системы координации в пространстве. Одним из наиболее простых и часто применяемых датчиков, используемых для таких систем, является ультразвуковой датчик расстояния *HC-SR04*. Этот датчик способен измерять расстояние в диапазоне 4 – 400 см. В разрабатываемом устройстве измеренное значение в десятичном коде выводится на четырехразрядный семисегментный индикатор. Измерение однократное, по нажатию кнопки.

Для получения данных с этого датчика необходимо выполнить следующую последовательность действий: подать на выход *Trig* импульс длительностью 10 мкс; датчик преобразует этот сигнал, посылает в препятствие и принимает отражённый сигнал; датчик преобразует полученную информацию в прямоугольный импульс, длительность которого прямо пропорциональна расстоянию до объекта; полученный импульс передаётся в микроконтроллер через выход *Echo* датчика.



Микроконтроллер в данном устройстве будет измерять длительность импульса с выхода *Echo* датчика. Существует несколько вариантов построения измерителя длительности импульса на основе микроконтроллера (МК) *ATmega16*. Одним из них является организация подсчета числа импульсов эталонной частоты  $f_{\text{эт}}$  между последовательными фронтами и срезом импульса [1].

Для выполнения заданных условий желательно использовать таймер с разрядностью не меньшей 8. Для вывода измеренной информации на 4 семисегментных индикатора будем использовать динамическую индикацию. Динамическую индикацию четырехразрядного десятичного числа можно осуществить последовательным выводом каждого десятичного разряда с частотой развертки  $f_p = 100 \text{ Гц}$  [2].

Структурная схема разрабатываемого устройства представлена на рисунке 1.

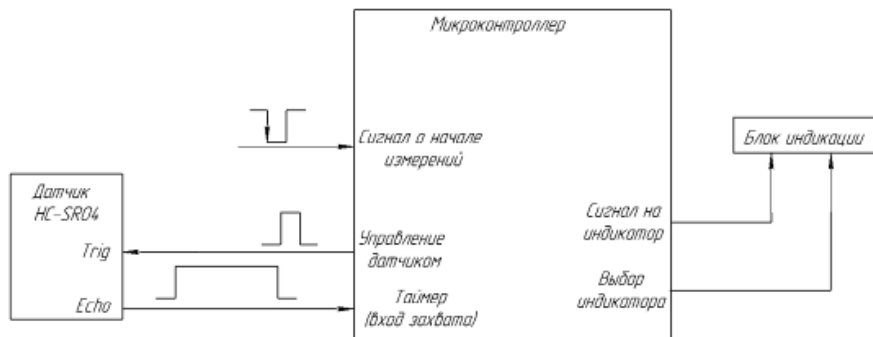


Рисунок 1 – Структурная схема измерителя периода импульсов

Из внешних периферийных устройств также понадобится ультразвуковой датчик расстояния *HC-SR04*.

Для питания составных частей устройства необходим источник питания или внешнее кондиционированное напряжение питания. Напряжением 5 В будет запитываться микроконтроллер и датчик расстояния.

Микроконтроллер работает по программе, реализующей измерительный алгоритм и осуществляющий вывод измеренного значения через катодные ключи на блок из 4 7-сегментных индикаторов.

Устройство взаимодействует с пользователем следующим образом. Нажатием на кнопку, подается сигнал о начале измерений. Микроконтроллером подается импульс длительностью 10 мс на вход датчика. После датчиком выдается на вход захвата таймера *TCNT0* импульс, чья длительность измеряется с помощью импульсов эталонной частоты. С его помощью по запросу осуществляется непрерывный процесс измерения периода. Вывод же данных будет осуществляться постоянно при помощи динамической индикации на блок 7-сегментных индикаторов. В устройстве предполагается производить измерение расстояния до объекта только по

запросу от пользователя. Реализовано это следующим образом: при помощи прерывания *INT1*, реагирующего на срез импульса, детектируется нажатие кнопки. При срабатывании прерывания происходит подача прямоугольного импульса длительностью 10 мс на вход *Trig* датчика. Сигнал с выхода датчика *Echo* отслеживается про помощи прерывания *INT0* по переднему фронту импульса.

Длительность импульсов в микросекундах вычисляется как сумма регистра счёта *TCNT0* и умноженного на 256 счетчика переполнений таймера. Измеренное расстояние почти всегда содержит целую и дробную части. Программно отделяется целая часть числа от дробной и по разработанному алгоритму преобразует отдельные цифры числа – расстояния до объекта в индексы соответствующих чисел в массиве знакогенератора. Для реализации динамической развертки четырех семисегментных знаков необходимо использовать 7 разрядов одного порта для управления сегментами и 4 разряда другого порта — для организации развертки по знакоместам. Выводы сегментов всех 4 индикаторов объединяются (рис. 2).

В бесконечном цикле фоновой программы происходит опрос нажатия кнопки пользователем. Если кнопка нажата, то производится вывод на датчик сигнала о необходимости начала измерений и обработка измеренного результата. Затем активизацией очередного общего катода, выбирается определенное знакоместо и выводится на семисегментный индикатор код, соответствующий каждой из цифр измеренного расстояния.

Моделирование в среде *PROTEUS* (рис. 2, 3) показало, что программа выполняет свои функции корректно.

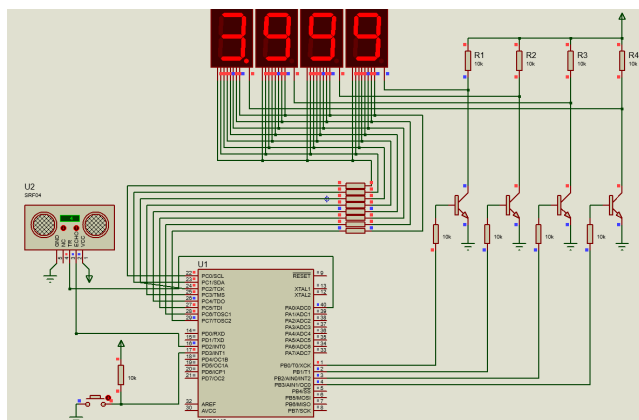


Рисунок 2 – Расстояние до объекта 4 см

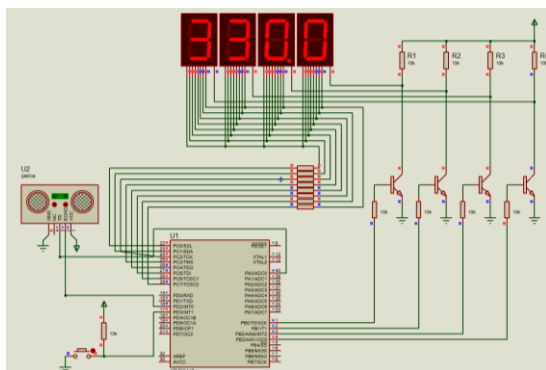


Рисунок 3 – Расстояние до объекта 330 см

Тестирование с использованием отладочной платы EasyAVR5A продемонстрировало работоспособность устройства (рис. 4).



Рисунок 4 – Результаты тестирования измерителя дальности до объекта

Устройство промоделировано и работает корректно, измеряет расстояние до объекта в пределах от 4 до 400 см. Модуль выводит измеренное расстояние на семисегментный индикатор, используя динамическую индикацию с частотой развертки 100. Программный модуль на основе ультразвукового дальномера, может с успехом использоваться в различных системах ориентирования в пространстве, разрабатываемых для роботов различных специализаций.

### Список литературы

1. Амелина М.А., Троицкий Ю.В. Программирование микроконтроллеров семейства AVR в устройствах промышленной электроники на языке Си. Лабораторный практикум в 2-х частях по курсу «Основы микропроцессорной техники». Часть 2. Смоленск: РИО филиала МЭИ в г. Смоленске, 2015. 108 с.

Материал принят к публикации 30.09.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0431748.26288605

## РАЗРАБОТКА SPICE-МОДУЛЯ МИКРОСХЕМЫ HV9931 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

**Константин Павлович Клямеров**<sup>1</sup>, студент, k.klyamerov@gmail.com

**Андрей Александрович Лысенков**<sup>1</sup>, студент, lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>АО «НПК «Тристан», Россия, Смоленск

<sup>2</sup>Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске Россия, Смоленск

*Аннотация. Приведен процесс разработки SPICE-модели ШИМ контроллера HV9931 и тестирование в типичной схеме включения.*

*Ключевые слова: ШИМ, контроллер, SPICE-модель, HV9931.*

### DEVELOPMENT OF SPICE MODULE OF HV9931 CHIP FOR SIMULATION OF ELECTRONIC CIRCUITS

Konstantin P. Klyamerov<sup>1</sup>, student, k.klyamerov@gmail.com

Andrei Al. Lysenkov<sup>1</sup>, student, lysenkovandrew02@gmail.com

<sup>1</sup>NPK Tristan JSC, Russia, Smolensk

Sergey Al. Amelin<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The process of development of the PWM SPICE model of the HV9931 controller and testing in a typical switching-on scheme is given.*

*Keywords: PWM, controller, SPICE model, HV9931.*

Современный процесс разработки невозможно представить без применения средств математического моделирования для выявления особенностей работы разрабатываемых электронных схем. Необходимо разрабатывать новые модели электронных устройств наиболее универсальными, например, в виде подсхемы SPICE. Создание SPICE-подсхем ШИМ контроллеров светодиодов является актуальной задачей.

Компания *SupertexInc* выпускает ряд ШИМ-контроллеров, использующихся при разработке современных стабилизаторов тока светодиодов, например, микросхема *HV9931* [2]. Разработанную ранее макромоделю данного ШИМ-контроллера [4] возможно использовать только в среде математического моделирования *Micro-Cap*. Целью данной работы является создание подсхемы ШИМ-контроллера на языке SPICE и исследование ее работы. При помощи программы схемотехнического моделирования *Micro-Cap* возможно транслировать файл макромоделей микросхемы в файл на языке SPICE. Генерируется файл формата *.ckt*, с описанием функционирования модели на языке *PSPICE*.

Директивы, находящиеся в начале сгенерированной программы на языке *PSPICE*, к определению подсхемы микросхемы *HV9931* отношения не имеют.

Они являются вспомогательными файлами, определяющими функции (.FUNC) и глобальные параметры (.PARAM) (рис. 1).

```
.FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)+I(D)>MAX),1,0)}
.FUNC HOTB(Q,MAX) {IF((VCE(Q)+IC(Q)+IB(Q)-VBE(Q)>MAX),1,0)}
.FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)+ID(M)>MAX),1,0)}
.PARAM LOW3MIN=(IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES))
.PARAM HIGH3MAX=(IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES))
.PARAM LOWLVDS=(IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT))
.PARAM HILVDS=(IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT))
.PARAM LIMTLVDS=(IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS))
.FUNC SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS) {(PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-
-PI*(RADIUS-SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)**2))*DCRES}
.FUNC SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM) {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F)))}
.FUNC SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ) {(PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-
-PI*(RADIUS-SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)**2))*DCRES}
.FUNC SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ) {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ)))}
```

Рисунок 1 – Листинг программы (директивы)

Описание макромодели начинается с директивы .SUBCKT и заканчивается директивой .END. Между ними находится описание компонентов, которые использовались при создании макромодели (рис. 2).

```
.SUBCKT HV9931 VIN VDD CS1 CS2 PWM_D RT GATE AGND PARAMS: ROSC=205K
R1 PWM_D 0 100k
ROSC 0 0 205k
U1 DLYLINE $G_DPWR $G_DGND 11 12
+ 1 IO_STD IO_LEVEL=0 MNTYMKDLY=0
V1 1 0 8
V2 9 0 DC 0 AC 1 0 Pulse 0 7.5 0 0 0 1u {(ROSC)/25E9+22/25E6}
X1 VIN 1 VDD COMP PARAMS: VH=7.5
X2 0 CS1 5 COMP PARAMS: VH=7.5
X3 0 CS2 7 COMP PARAMS: VH=7.5
X4 VDD 9 10 AND2 PARAMS: VH=7.5
X5 5 7 11 OR2 PARAMS: VH=7.5
X6 11 12 13 OR2 PARAMS: VH=7.5
X7 PWM_D 14 BUF PARAMS: GAIN=1
X8 10 13 15 16 RS-TR PARAMS: VH=7.5
X9 15 14 17 M2 PARAMS: VH=7.5
X10 17 GATE BUF PARAMS: GAIN=1
.MODEL 1 UDLY (DLYMN=214N DLYMX=215N DLYTY=216N)
.MODEL IO_STD UIO (
+ DRVH=130 DRVL=130
+ ATOD1="ATOD_STD" ATOD2="ATOD_STD_NX"
+ ATOD3="ATOD_STD" ATOD4="ATOD_STD_NX"
+ DTOA1="DTOA_STD" DTOA2="DTOA_STD"
+ DTOA3="DTOA_STD" DTOA4="DTOA_STD"
+ TSWHL1=3.310NS TSWHL2=3.310NS
+ TSWHL3=3.310NS TSWHL4=3.310NS
+ TSWHL1=2.115NS TSWHL2=2.115NS
+ TSWHL3=2.115NS TSWHL4=2.115NS
+ DIGPOWER="DIG1PWR")
.MODEL D074 NX DOUTPUT (
+ S0NAME="0" S0VLO=-1.5 S0VHI=1.4
+ S1NAME="1" S1VLO=1.4 S1VHI=5.5)
.MODEL Q74 NFN (ISE=1E-16 ISC=4E-16 BF=49 BR=.04 CJE=1P CJC=.5P VJE=.9
+ VJC=.8 MJE=.5 MJC=.33 TF=.2N TR=10N CJS=3P VJS=.7
+ RC=40 MJS=.33)
.MODEL D74CLMP D (IS=1E-14 CJO=5P M=.5 RS=0)
.MODEL D74 D (IS=1E-14 CJO=5P M=.5)
.MODEL DINT74 DINPUT (
+ S0NAME="0" S0TSW=3.5NS S0RLO=7.1 S0RHI=170 ;@6.8 OHMS, .2V
+ S1NAME="1" S1TSW=7.5NS S1RLO=415 S1RHI=195 ;@133 OHMS, 3.4V
+ S2NAME="F" S2TSW=3.5NS S2RLO=41.8 S2RHI=107 ;@30.1 OHMS, 1.4V
+ S3NAME="R" S3TSW=3.5NS S3RLO=41.8 S3RHI=107 ;@30.1 OHMS, 1.4V
+ S4NAME="X" S4TSW=3.5NS S4RLO=41.8 S4RHI=107 ;@30.1 OHMS, 1.4V
+ S5NAME="2" S5TSW=3.5NS S5RLO=1MEG S5RHI=1MEG)
*
.ENDS HV9931
```

Рисунок 2 – Листинг программы (начало описания макромодели HV9931)

После директивы .SUBCKT записано название макромодели (HV9931), имена узлов (VIN, VDD, CS1, CS2, PWM\_D, RT, GATE, AGND). Ключевым словом .PARAMS обозначен параметр, который может быть изменен пользователем при моделировании. В разработанной макромодели

микросхемы *HV9931* это сопротивление внешнего резистора *ROSC*, который задаёт частоту генератора тактовой частоты *V2*.

Описание используемых при создании макромоделли компонентов приводится после окончания ее описания. Типовое описание модели начинается с названия компонента (для совместимости с *SPICE* название конденсатора должно начинаться с *C*, резистора с *R*, источников напряжения с *V*, а функциональных блоков с *X*). Далее указаны номера (или символические имена) узлов к которым подключён компонент и заданный параметр элемента. Заканчивается описание макромоделли директивой *.ENDS* после которой пишут название макромоделли, используемое вначале (*.ENDS HV9931*).

В сгенерированной программе присутствуют также и описания моделей функциональных блоков [3], из которых моделировалась внутренняя структура ШИМ-контроллера стабилизатора тока светоизлучающих диодов (рис. 3). Описание моделей функциональных блоков структурно аналогичны структуре макромоделли микросхемы *HV9931*.

```
.SUBCKT BUF PINA PINB PARAMS: GAIN=1
E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
R1 0 PINA 100Meg
RE1 PINA 0 1G;added by E1
.ENDS BUF
```

Рисунок 3 – Листинг программы (описание модели буферного усилителя)

Разработанная *SPICE*-подсхема ШИМ-контроллера стабилизатора тока светодиодов *HV9931* была проверена в типичной схеме включения для оценки корректности ее работы в программе *Micro-Cap* (рис. 4).

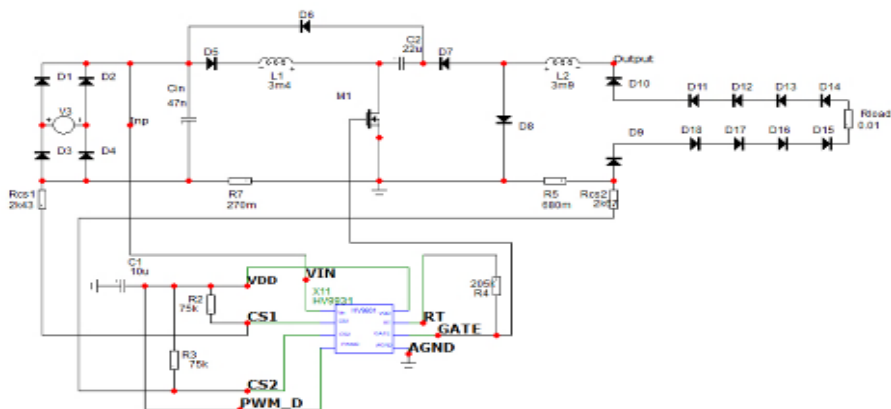


Рисунок 4 – Модель ШИМ-стабилизатора тока светодиодов

Моделирование показало корректность работы разработанной подсхемы стабилизатора тока светодиодов *HV9910* на языке *PSPICE*. Эта модель поддерживает на выходе ток светоизлучающего диода на постоянном уровне (рис. 5).

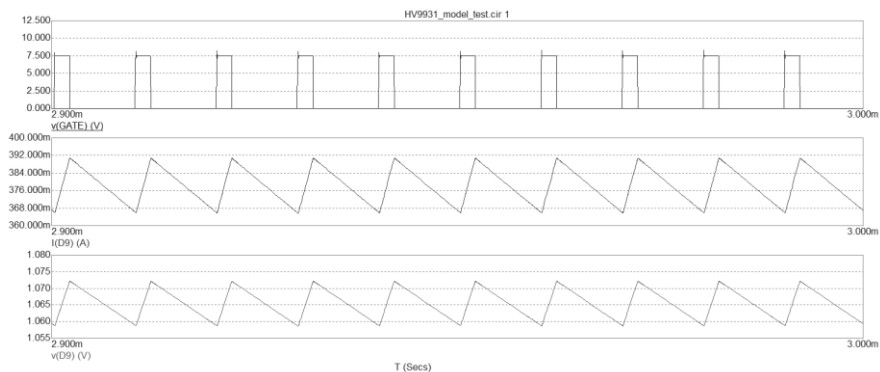


Рисунок 5 – Временные диаграммы тока и напряжение на светодиоде VD2

Разработанная в среде схемотехнического моделирования программы *Micro-Cap* макромодель ШИМ- стабилизатора стабилизатора тока светодиодов *HV9931* успешно транслирована в подсхему на языке *PSPICE*. Изучена структура разработанной программы. Проверка показала, что полученная *SPICE*-подсхема работает корректно, а, значит, возможно ее использование для разработки, устройств, содержащих узлы на основе ШИМ-контроллера стабилизатора тока светодиодов *HV9931*.

#### Список литературы

1. Амелина М.А., Амелин С.А Программа схемотехнического моделирования MICRO-CAP. Версии 9, 10 – Санкт-Петербург, Издательство Лань, 2014, 632 С.
2. Universal High Brightness LED Drivers HV9931. Supertex inc. Doc.# DSFP-HV9931.
3. Амелин С.А., Амелина М.А. Библиотека функциональных блоков. Системы компьютерной математики и их приложения. 2013. № 14. С. 5-7.
4. Клямеров К.П., рук. С.А. Амелин, к.т.н., доц. Математическая модель драйвера светодиодной лампы с единичным коэффициентом мощности // Сборник: XVIII международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» – Смоленск: Издательство «Универсум», филиал НИУ МЭИ в г. Смоленске.

Материал принят к публикации 30.09.21.

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f04e9671.97840360

## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХТАКТНОГО ПОЛУМОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

**Константин Павлович Клямеров**<sup>1</sup>, студент, k.klyamerov@gmail.com

**Андрей Александрович Лысенков**<sup>1</sup>, студент, lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>АО «НПК «Тристан», Россия, Смоленск

<sup>2</sup>Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация. В статье рассматривается разработка двухтактного полумостового преобразователя и моделирование его работы в различных режимах.*

*Ключевые слова: преобразователь, полумостовой, двухтактный, моделирование.*

### DEVELOPMENT AND SIMULATION OF OPERATION OF TWO-STROKE HALF-BRIDGE CONVERTER IN DIFFERENT MODES

Konstantin P. Klyamerov<sup>1</sup>, student, k.klyamerov@gmail.com

Andrei Al. Lysenkov<sup>1</sup>, student, lysenkovandrew02@gmail.com

<sup>1</sup>NPK Tristan JSC, Russia, Smolensk

Sergey Al. Amelin<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The article considers the development of a two-stroke half-bridge converter and modeling its operation in various modes.*

*Keywords: converter, half bridge, two-stroke, simulation.*

В процессе разработки любого электронного устройства остро встает вопрос подачи энергии для осуществления его работы. Наиболее универсальным решением являются двухтактные преобразователи напряжения. В данной статье рассмотрена разработка двухтактного преобразователя с силовым контуром, выполненном по полумостовой схеме.

Полумостовой преобразователь напряжения с гальванической развязкой относится к классу двухтактных преобразователей, технические характеристики (размеры трансформатора, сглаживающего фильтра, а также КПД) значительно лучше, чем у однотактных преобразователей с гальванической развязкой [1].

Силовой контур преобразователя представлен на рисунке 1.

Энергия передаётся в нагрузку в течение двух полупериодов цикла. Схема позволяет получать большие выходные мощности. Когда замкнут верхний ключ  $T1$ , на первичную обмотку  $L1$  подаётся положительное напряжение, равное  $U_{вх}/2$  (напряжение на конденсаторах делится ровно пополам). На вторичной полуобмотке появляется положительное напряжение, кратное коэффициенту трансформации, диод  $VD1$  открывается и ток через  $LC$ -фильтр



протекает в нагрузку. Далее выдерживается пауза до полного закрытия верхнего транзистора и открывается нижний транзистор [2].

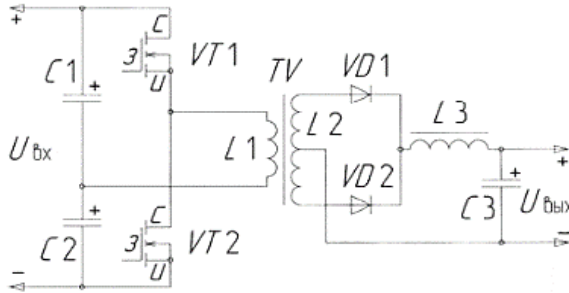


Рисунок 1 – Силовой контур двухтактного полумостового преобразователя

На первичную обмотку поступает напряжение противоположной полярности, на вторичной полуобмотке так же возникает напряжение противоположной полярности, открывается диод  $VD2$  и ток через  $LC$ -фильтр протекает в нагрузку.

Когда оба ключа разомкнуты, индуктивность отдаёт в нагрузку накопленную энергию. Достоинство полумостового преобразователя заключается в низком обратном напряжении, приложенном к каждому ключевому транзистору в состоянии отсечки, примерно равном постоянному напряжению питания преобразователя. У данного типа преобразователей трансформаторы работают в условиях с симметричным перемагничиванием [1]. В разрабатываемом преобразователе будет использована отрицательная обратная связь с системой управления по напряжению (рис. 2). В схеме с ОС по напряжению значение выходного напряжения поступает на усилитель согласования, т.е. напряжение резистора  $R$  поступает на звено коррекции, далее на неинвертирующий вход компаратора, на инвертирующий вход поступает пилообразный сигнал, задающий частоту коммутации. Таким образом компаратор вырабатывает сигнал ШИМ для управления ключами. Коэффициент заполнения ШИМ зависит от сигнала на выходе звена коррекции.

Система управления по выходному напряжению быстро реагирует на изменение выходного напряжения, поэтому преобразователь с такой системой управления хорошо обрабатывает изменение нагрузки. А вот отработка изменений входного напряжения происходит не очень хорошо. Это связано с тем, что изменение входного напряжения сначала должно проявиться на выходе преобразователя после чего система управления скомпенсирует провал или выброс выходного напряжения.

Для реализации двухтактного полумостового преобразователя выбирается ШИМ-контроллер  $TL494$ .



Рисунок 2 – Функциональная схема преобразователя с системой управления по выходному напряжению

Параметры преобразователя представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры разрабатываемого преобразователя

Тип преобразователя	Вид системы управления	Входное и выходное напряжение, В	Диапазон мощности на выходе, Вт	Частота коммутации, кГц
Двухтактный полумостовой	по вых. напряжению	20-30 30	20-30	50

Также были произведены расчеты элементов обвязки ШИМ-контроллера TL494 и цепи гальванической развязки.

В представленной на рисунке 3 модели [3] входное изменение напряжения от 20 до 30 В обеспечивается источником постоянного напряжения  $V_{in}$ . Параметры модели трансформатора: индуктивность первичной обмотки 84.9 мкГн; индуктивность вторичной обмотки 1040.7 мкГн; коэффициент связи 0,99.

Изменение выходной мощности от 20 до 30 Вт достигается за счет изменения сопротивления нагрузки  $R_{load}$  от 45 до 30 Ом соответственно.

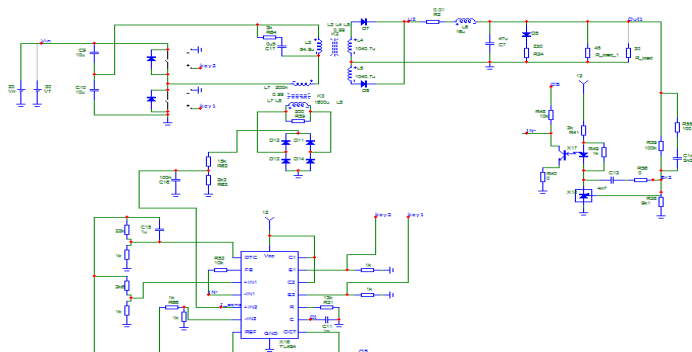


Рисунок 3 – Схема моделирования преобразователя с замкнутой цепью ОС

На рисунках 4–6 показаны результаты моделирования работы преобразователя в среде *Microcap 9* при различных нагрузках.

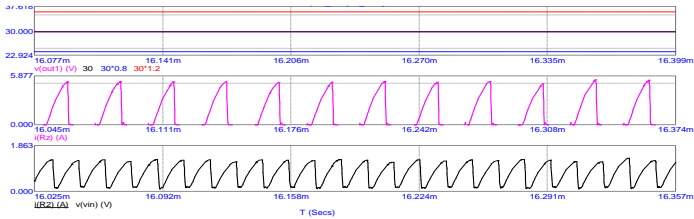


Рисунок 4 – Результат моделирования преобразователя с замкнутой цепью СВ (1 – график напряжения на выходе, 2,3 – токи первичной и вторичной обмоток трансформатора)

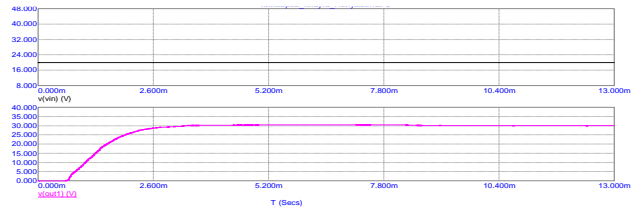


Рисунок 5 – Графики входного и выходного напряжения при  $R_{нагр} = 45 \text{ Ом}$

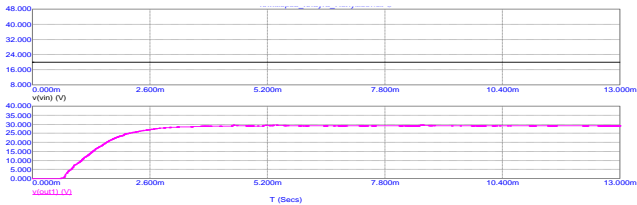


Рисунок 6 – Графики входного и выходного напряжения при  $R_{нагр} = 30 \text{ Ом}$

Разработанный двухтактный преобразователь обладает защитой по току, отрицательной обратной связью по напряжению, низким обратным напряжением, его возможно включать без нагрузки, трансформатор работает с симметричным перемагничиванием. К недостаткам относят наличие двух конденсаторов в делителе напряжения, разрушение компонентов ИИП при перегрузке по току в нагрузке при отсутствии системы защиты, меньший КПД, чем достижимый в мостовом преобразователе.

### Список литературы

1. Макашов Дмитрий. Обратноходовой преобразователь, 2006. – 46 с.;
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 528 с.

Материал принят к публикации 30.09.21.

УДК 621.391.82

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f059dd03.15500573

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ ЧАСТОТ С ПОМОЩЬЮ САПР ISE DESIGN SUITE

**Константин Павлович Клямеров<sup>1</sup>**, студент, k.klyamerov@gmail.com

**Андрей Александрович Лысенков<sup>1</sup>**, студент, lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент

<sup>1</sup>АО «НПК «Тристан», Россия, Смоленск

<sup>2</sup>Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация. Рассмотрены основные особенности среды проектирования «ISE DESIGN SUITE», на примере разработки цифрового фильтра верхних частот, с использованием дополнительного программного обеспечения.*

*Ключевые слова: ISE DESIGN SUITE, цифровая фильтрация, фильтр верхних частот.*

### DESIGNING A DIGITAL HIGH-PASS FILTER USING THE CAD ISE DESIGN SUITE

Konstantin P. Klyamerov<sup>1</sup>, student, k.klyamerov@gmail.com

Andrei Al. Lysenkov<sup>1</sup>, student, lysenkovandrew02@gmail.com

<sup>1</sup>NPK Tristan JSC, Russia, Smolensk

Sergey Al. Amelin<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The main features of the "ISE DESIGN SUITE" design environment are considered, using the example of developing a digital high-pass filter using additional software.*

*Keywords: ISE DESIGN SUITE, digital filtering, high-pass filter.*

В такой сфере, как радиоэлектроника очень часто перед инженером стоит задача спроектировать фильтр верхних частот, который обрезает все частоты, меньше порогового значения, что позволяет пользователю получать сигнал в определенном диапазоне частот. Есть два варианта реализации фильтра верхних частот первый вариант, это реализовать на аналоговых компонентах, а второй смоделировать цифровой фильтр. Для большинства устройств подойдет второй вариант, так как он обладает возможностью быстро менять свои характеристики, легко перестраивается, помимо этого цифровой фильтр обладает линейной фаза-частотной характеристикой, что позволяет пользователю добиться постоянной групповой задержки.

В среде программирования ПЛИС «ISE Design Suite» можно подключить ядро, в котором выбираются все необходимые настройки фильтра. В первом окне параметров ядра записываются рассчитанные коэффициенты фильтра в виде .coe файла полученного средствами MATLAB (рис. 1).

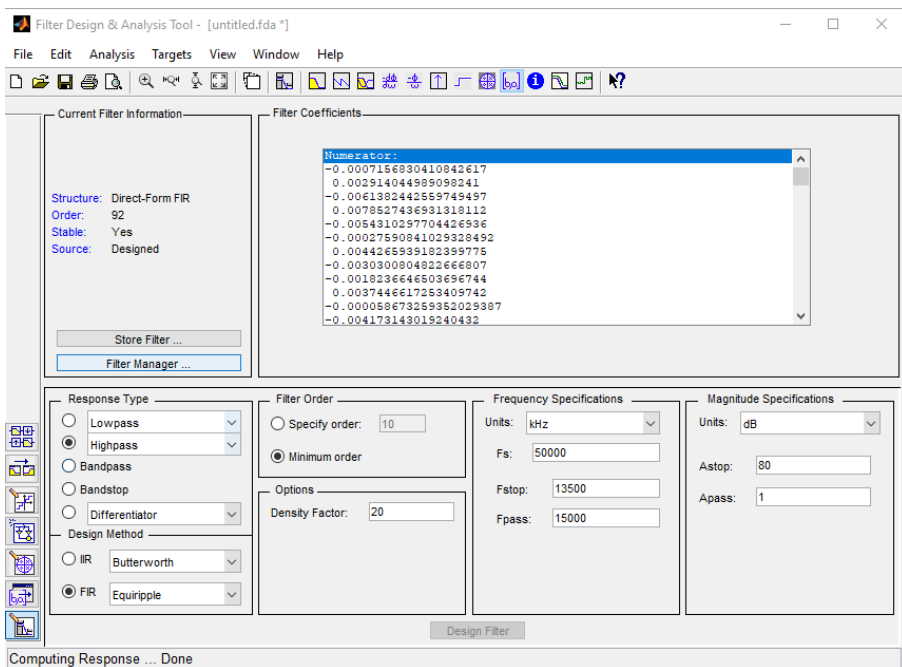


Рисунок 1– Окно настройки параметров фильтра в MATLAB

Выбирается тип фильтра (простой, интерполирующий, полифазный или децимирующий), количество коэффициентов, обрабатываемых одновременно, с помощью DSP блоков. После чего выбираются частотные соотношения фильтра, входная частота дискретизации сигнала и частота обработки фильтра, которая по теореме Котельникова должна быть как минимум в 2 раза больше входной частоты дискретизации (рис. 2).

В следующем окне необходимо задать реализуемую архитектуру фильтра, выбрать требуемые параметры для коэффициентов, а также выбрать параметры входных и выходных данных (рис. 3).

На третьей странице настроек (рис. 4) фильтра можно выбрать необходимые операционные возможности фильтра, например, синхронных сброс или включить канал ND – «New data», который будет определять поступление данных на вход фильтра.

Канал CE – «Clock Enable», сигнал разрешения тактирования фильтра, когда на нем низкий уровень приостанавливается любая обработка внутри фильтра, в независимости от того, поступают новые данные или нет.

Канал «DATA\_VALID» – обозначает сигнал валидности выходных данных. Данная опция может использоваться только если фильтр включен в многоканальный режим.

**logiCORE** **FIR Compiler** xilinx.com:ip:fir\_compiler:5.0

Component Name:

**Filter Coefficients**

Select Source:

Coefficient Vector:

Coefficients File:

Number of Coefficient Sets:  Range: 1..256

Number of Coefficients (per set): 85

**Filter Specification**

Filter Type:

Rate Change Type:

Interpolation Rate Value:  Range: 1..1

Decimation Rate Value:  Range: 1..1

Zero Pack Factor:  Range: 1..1

Number of Channels:  Range: 1..64

**Hardware Oversampling Specification**

Select format:

Input Sampling Frequency:  Range: 0.00001..300.0 MHz

Clock Frequency:  Range: 50.0..300.0 MHz

Input Sample Period:  Range: 1..10000000 Clock cycles

Page 1 of 4

*Рисунок 2 – Окно настройки параметров фильтра стр.1*

**logiCORE** **FIR Compiler** xilinx.com:ip:fir\_compiler:5.0

Filter Architecture:

**Coefficient Options**

Use Reloadable Coefficients

Coefficient Structure:

Coefficient Type:

Quantization:

Coefficient Width:  Range: 2..35

Best Precision Fraction Length

Coefficient Fractional Bits:  Range: 0..0

**Datapath Options**

Number of Paths:  Range: 1..16

Input Data Type:

Input Data Width:  Range: 2..34

Input Data Fractional Bits:  Range: 0..8

Output Rounding Mode:

Output Width:  Range: 1..25

Output Fractional Bits:

Allow Rounding Approximation

Registered Output

Page 2 of 4

*Рисунок 3 – Окно настройки параметров фильтра стр.2*

Так же в этом окне выбираются настройки типа памяти для хранения входных данных, коэффициентов фильтра и промежуточных выходных данных.

logiCORE  
**FIR Compiler**  
xilinx.com:ip-fir\_compiler:5.0

Optimization Goal: Speed

Control Options

SCLR  Use deterministic SCLR behaviour

ND  DATA\_VALID

CE

CHAN\_IN Options

Generate CHAN\_IN value in advance

Number of samples: 0 Range: 0..0

Memory Options

Data Buffer Type: Distributed

Coefficient Buffer Type: Automatic

Input Buffer Type: Distributed

Output Buffer Type: Distributed

Preference for other storage: Distributed

DSP Slice Column Options

Multi-Column Support: Disabled

Device Column Lengths: 16

Column Configuration: 16

Inter-Column Pipe Length: 4 Range: 1..16

Datasheet < Back Page 3 of 4 Next > Generate Cancel Help

Рисунок 4 – Окно настройки параметров фильтра стр.3

После настройки всех параметров фильтра нам предлагается проверить их на следующей странице. После чего настройка фильтра закончена и он готов к работе.

### Список литературы

1. Агаков В.Г., Носов А.А., Мягчилов М.Ю., Абрамов С.В. Моделирование цифровых фильтров на программируемых логических интегральных схемах // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 3. – с. 185-192.
2. Галанина Н.А., Охоткин Г.П., Иванова Н.Н., Алексеев А.Г. Системы обработки сигналов на базе ПЛИС и цифровых сигнальных процессоров // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 180–194.
3. Зотов В. Моделирование цифровых устройств, проектируемых на основе ПЛИС фирмы Xilinx, средствами ISIM в САПР ISE Design Suite. // КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ. – 2013. – №2. – с. 64-74.

Материал принят к публикации 30.09.21.

## РОЛЬ ПАКЕТА MATLAB/SIMULINK В ДИПЛОМНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

**Валерий Иосифович Курир**

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), ст. преп., к.т.н., РФ, Казань  
kurir\_valerian@mail.ru

*Аннотация. Приведен обзор работ, посвященных задачам проектирования и численного моделирования системы электроснабжения летательных аппаратов – СЭС ЛА в пакете Matlab/Simulink, проведенных российскими и зарубежными исследователями.*

*Ключевые слова: системы электроснабжения летательных аппаратов, моделирование работы систем электроснабжения летательных аппаратов в пакете Matlab/Simulink.*

В работе представлен обзор работ, посвященных численному моделированию СЭС ЛА, представляющий интерес для специалистов, занимающихся данной тематикой. В качестве отправных пособий по проведению численных расчетов систем силовой электроники, а также электропривода электромеханических систем в пакете Matlab/Simulink примем монографии [1 – 3].

В настоящее время в авиации находит применение система переменного трехфазного тока 115/200 В постоянной частоты 400 Гц с полупроводниковым преобразователем (ПП или ПЧ). Перспективной является система постоянного тока высокого напряжения  $\pm 270$  В [4].

Авторами работы [4] в качестве перспективной рассматривается система генерирования постоянного тока низкого напряжения, где функции ПП (полупроводникового преобразователя) выполняет выпрямитель напряжения, выполненный по модульному принципу на транзисторах MOSFET (рис. 1).

Перспективной системой переменного тока для СЭС ЛА авторами [4] принята система генерирования тока стабильной частоты 400 Гц и напряжением 115 В (рис. 2).

Самолет с повышенной электрофикацией оборудования (СПЭО) – это ЛА, в котором тяга создается традиционными двигателями, а большая масса оборудования получает энергию от централизованной СЭС ЛА. Схема СЭС ЛА, в которой реализована данная концепция, представлена авторами [5] на (рис. 3). ЛА, тяга в котором создается с помощью электрической силовой установки, назван полностью электрическим самолетом (ПЭС) [6]. Гибридным ЛА назван самолет со смешанной тягой [7].



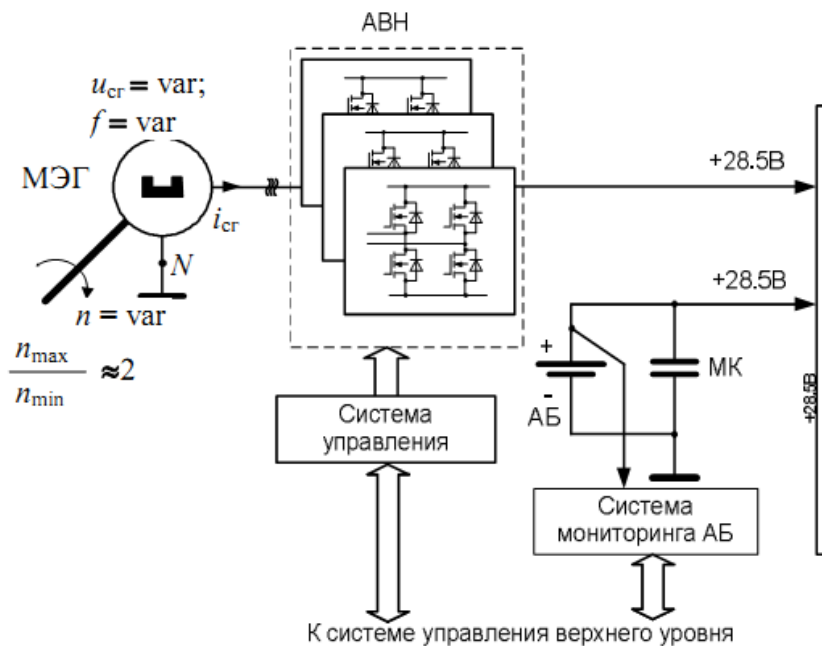


Рисунок 1 – Система генерирования постоянного тока с АВН

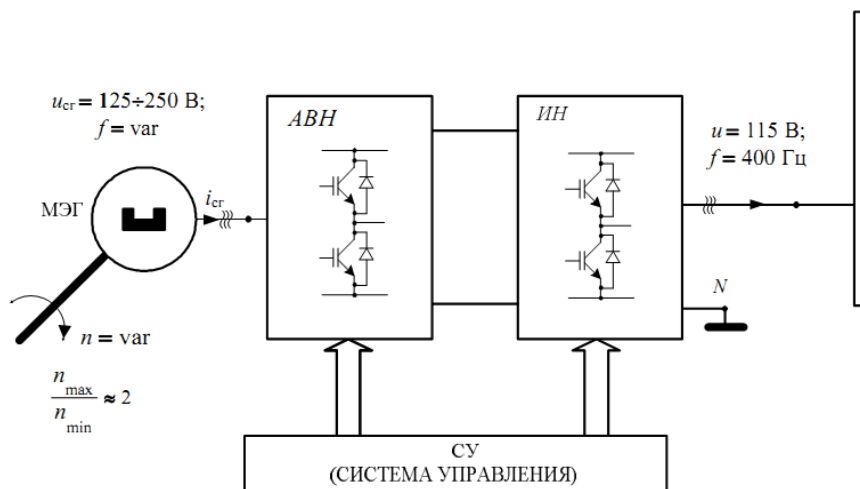


Рисунок 2 – Система генерирования переменного тока стабильной частоты 400 Гц напряжения 115 В

Обратимся к работам, проведенными российскими и зарубежными исследователями в направлении к самолету с повышенной электрификацией, использовавших в своей работе пакет имитационного моделирования Matlab.

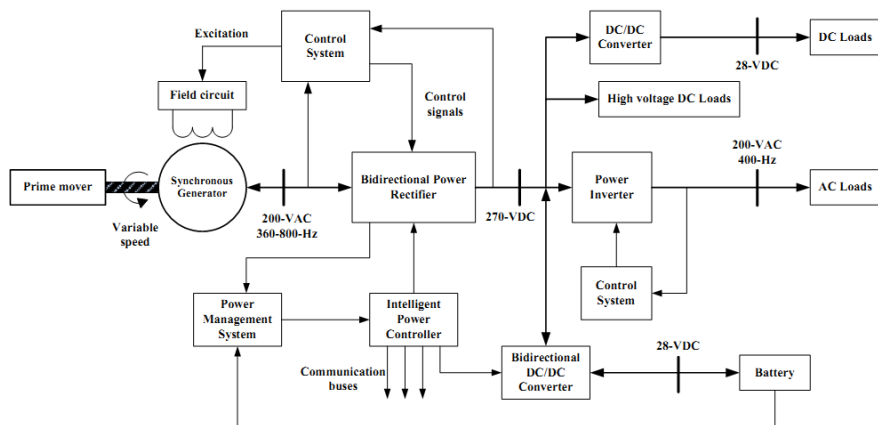


Рисунок 3 – Система распределения электроэнергии ЛА с повышенной электрификацией

В работе [8] проведена закономерная замена электроприводом ЭППЗ–334 аналогового гидропривода системы перемещения механизации крыла – СПМК–9 самолета. Автором [9] разработан магнитоэлектрический синхронный генератор МЭГ мощностью не менее 200 кВ·А и более переменного тока, выполняющий функцию стартер-генератора СГ. В работе [10] разработан электрогенератор постоянного тока повышенного напряжения мощностью до нескольких сотен киловатт с непосредственным приводом от авиадвигателя, работающего в системе с электронным преобразователем. Автором [11] разработана и численно смоделирована резервная система генерирования электрической энергии на базе магнитоэлектрического генератора и инвертора напряжения, построенных с использованием модульного принципа.

Основы имитационного моделирования СЭС ЛА в пакете Matlab представлены в монографии [12]. В работе [13] представлена модель синхронной машины – СМ с демпферной обмоткой, далее рассчитанная в пакете Matlab. Исследована модель синхронного включения генераторов в единую сеть. Авторами [14] разработана уточненная модель синхронного генератора – СГ, представленная в виде трех машин: подвозбудителя, возбудителя и самого генератора. Приведены результаты моделирования в пакете Matlab. В работе [15] модель СГ представлена системой матричных уравнений. Приведены структурные схемы регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения. Модель СЭС ЛА реализована в пакете Matlab/Simulink.

Авторами [16] приведены результаты имитационного моделирования энергоузла СЭС ЛА ПЭС в пакете Matlab/Simulink. Авторами [17] проведено моделирование СЭС самолета Ил – 76 в пакете Simulink. Приведены модели СЭС переменного и постоянного токов, их элементов, результаты моделирования. В работе [18] проведено имитационное моделирование в пакете Matlab/Simulink СЭС постоянного тока самолета Су–30СМ в нормальных и аварийных режимах работы. Авторами [19] разработана имитационная модель СЭС самолета Су–27 в пакете Matlab/Simulink. Она позволяет исследовать СЭС ЛА как в нормальном, так и аварийном режимах работы. Автором [20] проведено имитационное моделирование работы систем переменного и постоянного токов СЭС ЛА Ил–76 в пакете Matlab/Simulink. В работе [21] рассмотрена модель системы электроснабжения перспективного дальнемагистрального самолета в программном комплексе SimInTech. Приведены результаты моделирования четырехканальной системы генерирования и распределения электроэнергии переменного тока при нормальном режиме работы.

В статье [22] проведено моделирование работы двигательного режима стартер-генераторной установки для авиационного газотурбинного двигателя в пакете Matlab/Simulink. В качестве электрической машины используется синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Автором [23] представлена система регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора, разработанного на основе нечеткой логики с помощью генетического алгоритма, позволяющего оптимизировать характеристики регулятора частоты.

В работе [24] представлена методика проектирования СЭС воздушного судна. Перечислены задачи, необходимые для реализации автоматизации процесса проектирования СЭС ЛА. Авторами [25] представлено моделирование СЭС ЛА воздушных судов Bombardier Global Express в пакете Simulink (автономная модель реализации) и решателе OPAL-RT (для моделирования в реальном времени). Авторами [26] представлена кроссплатформенная методология проектирования СЭС ЛА. Пакеты, используемые для моделирования рабочих режимов СЭС ЛА – Matlab/Simulink и Modelica.

### Список литературы

1. Герман–Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебн. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
2. Герман–Галкин С.Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА–Век, 2008. – 368 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SymPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 288 с.
4. Гаргансеев А.С., Харитонов С.А. Перспективные системы электроснабжения с полностью электрофицированным оборудованием // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (20). – С. 185 – 192.
5. Бочаров В.В., Постников В.А., Резников С.Б., Харченко А.И. Энергоэкономичная комбинированная система с высоким качеством электроэнергии

для концепции «полностью электрофицированного самолета» // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 58. – 19 с.

6. Халютин С.П. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее // Авиапанорама. – 2016. – № 6. – С. 42–51.

7. Халютин С.П., Давидов О.А., Жмуров Б.В. Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 4–16.

8. Волокитина Е.В. Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Чуваш. гос. ун-т. - Чебоксары, 2006. – 197 с.

9. Власов А.И. Магнитоэлектрический стартер–генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: дисс. канд. техн. наук: 05.09.01 / Чуваш. гос. ун-т. – Чебоксары, 2010. – 260 с.

10. Кузьмичев Р.В. Генератор в системе электроснабжения перспективного самолета с повышенным уровнем электрофикации: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / МАИ – Москва, 2012. – 193 с.

11. Машинский В.В. Резервная система генерирования электрической энергии для летательных аппаратов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2014. – 134 с.

12. Халютин С.П., Тюляев М.Л., Жмуров Б.В., Старостин И.Е. Моделирование сложных электроэнергетических систем летательных аппаратов / М.: ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. – 188 с.

13. Демченко А.Г., Артёменко Ю.П. Моделирование параллельной работы бортовой системы электроснабжения переменного тока в пакете Matlab // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 55–60.

14. Артеменко Ю.П., Шарапов С.С. Применение Matlab в моделировании бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 77–84.

15. Артеменко Ю.П., Демченко С.С. Совершенствование модели бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 213. – С. 34–42.

16. Жмуров Б.В., Матюшина А.В., Соколов П.А. Моделирование режимов работы центров силового питания электроприводов полностью электрофицированного самолета МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 99–103.

17. Бочаров А.С., Губанов К.А., Евдокимов Я.А. Имитационная модель электроэнергетического комплекса самолета Ил–76 в среде моделирования Simulink / Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования: сб. науч. ст. по матер. IV Всероссийской науч. – практич. конф. «Академические Жуковские чтения» (23–24 ноября 2016 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 32–39.

18. Аббясов И.В., Бочаров А.С., Шаров И.В. Имитационная модель системы электроснабжения постоянного тока самолета с возможностью исследования в нормальных и аварийных режимах функционирования в среде моделирования Simulink / Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. науч. ст. по материалам докл. V Международной НПК «АВИАТОР» (15–16 февраля 2018 г.): – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 3–7.

19. Бочаров А.С., Губанов К.А., Шипилов А.А. Автоматизированное рабочее место для изучения и исследования системы электроснабжения истребителя Су-27 / Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки:

сб. науч. ст. по материалам докл. V Международной НПК «АВИАТОР» (15-16 февраля 2018 г.): – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 13 – 18.

20. Альчин Ю.Ю. Разработка имитационной модели системы электропитания тяжелого самолёта: дисс. магистра технич. наук: 13.04.02 / НТПУ, Томск, 2018. – 103 с.

21. Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С., Сатин А.А., Притулкин Т.Д., Маковская Т.Д. Методика создания динамической математической модели системы электроснабжения (СЭС) переменного тока перспективного дальнемагистрального пассажирского самолета в программном комплексе SimInTech // *Comp. nanotechnol.* – 2019. – Вып. 2. – С. 57 – 62.

22. Королев Е.В., Лисковская Е.В., Павлов Д.А. Расчет и моделирование стартер-генератора авиационного газотурбинного двигателя // *Международ. конференция по мягким вычислениям.* – 2020. – Т. 1. – С. 296 – 298.

23. Каримов В.Г. Комбинированные системы регулирования частоты выходного напряжения с элементами искусственного интеллекта для бесконтактных синхронных генераторов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Уфимский гос. авиац. техн. университет. – Уфа, 2012. – 146 с.

24. Жмуров Б.В. Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект оптимизации // *Научный вестник МГТУ ГА.* – 2018. – № 01. – С. 88–103.

25. Montealegre Lobo L., Dufour Ch., Mahseredjian J. Real-time Simulation of More-Electric Aircraft Power Systems // *Paper presented at the EPE'13 ECCE Europe conference, September 3 – 5, 2013, Lille, France.* – 11 P.

26. Nuzzo P., Finn J., Mozumdar M., Sangiovanni-Vincentelli. A. Platform-Based Design Methodology and Modeling for Aircraft Electric Power Systems// *Paper presented at the Green Energy and System Conference, 25 Nov. 2013 Long-Beach, Ca., USA – 7 p.*

UDC 629.7.064.5

## THE ROLE OF THE MATLAB/SIMULINK PACKAGE IN DIPLOMA DESIGN

**Valery I. Kurir**

KNITU-KAI, senior lecturer, cand. of tech. sciences  
RF, Kazan, kurir\_valerian@mail.ru

*Abstract. An overview of works devoted to the problems of design and numerical modeling of the power supply system of aircraft – aircraft PSS in the Matlab / Simulink package, carried out by Russian and foreign researchers, is given.*

*Keywords: aircraft power supply systems, modeling the operation of aircraft power supply systems in the Matlab / Simulink package.*

The paper presents an overview of the works devoted to the numerical modeling of the aircraft PSS, which is of interest to specialists dealing with this topic. Monographs [1 – 3] will be used as starting guides for carrying out numerical calculations of power electronics systems, as well as the electric drive of electromechanical systems in the Matlab / Simulink package.

Currently, in aviation, a three-phase AC 115/200 V system with a constant frequency of 400 Hz with a semiconductor converter (PP or FC) is used. A promising high voltage constant current system is  $\pm 270$  V [4].

The authors of [4] consider a system for generating low voltage direct current as promising, where the functions of a PCB (semiconductor converter) are performed by a voltage rectifier made on a modular basis on MOSFET transistors (Fig. 1).

The authors of [4] adopted a system for generating a current of a stable frequency of 400 Hz and a voltage of 115 V as a promising alternating current system for PSS aircraft (Fig. 2).

An aircraft with enhanced equipment electrification (EEC) is an aircraft in which thrust is created by traditional engines, and a large mass of equipment receives energy from a centralized PSS of the aircraft. The scheme of the PSS of the aircraft, in which this concept is implemented, is presented by the authors of [5] in (Fig. 3). The aircraft, the thrust in which is created using an electric power plant, is called a fully electric aircraft (FEA) [6]. An aircraft with a mixed thrust is called a hybrid aircraft [7].

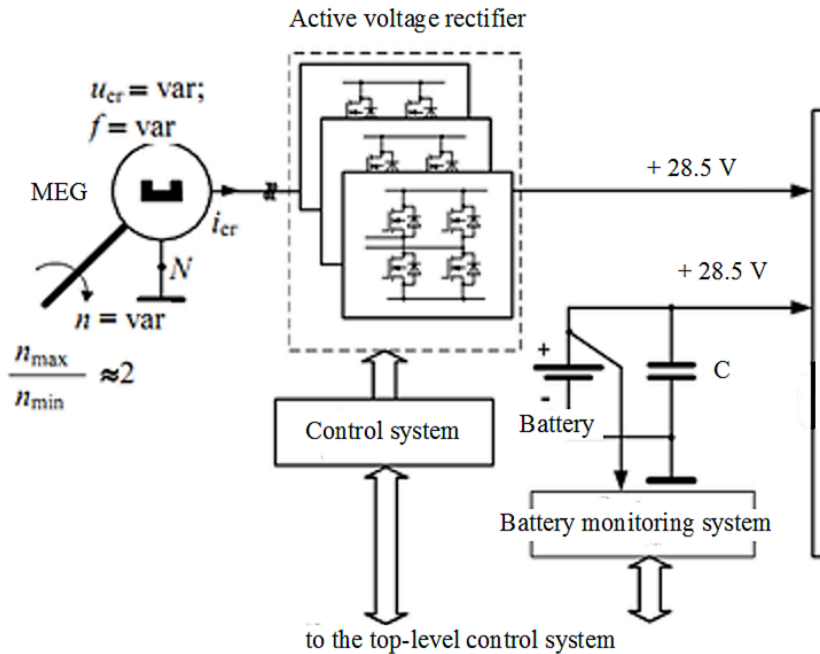


Figure 1 – DC generation system with AVR

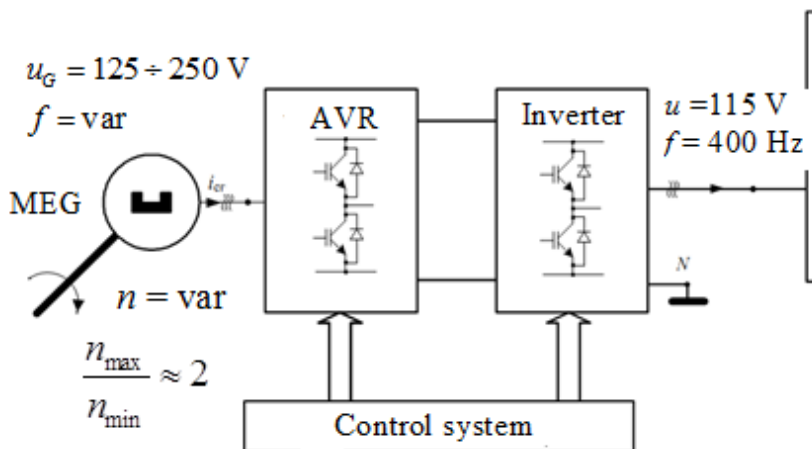


Figure 2 – The system for generating alternating current of a stable frequency of 400 Hz and a voltage of 115 V

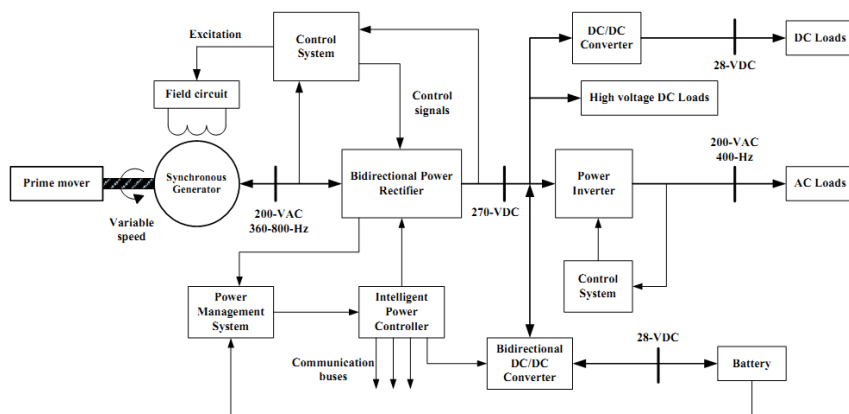


Figure 3 – Electricity distribution system of aircraft with increased electrification

Let us turn to the work carried out by Russian and foreign researchers towards an aircraft with increased electrification, who used the Matlab simulation package in their work.

In work [8], a regular replacement of an electric drive EPPZ–334 of a similar hydraulic drive of the wing mechanization movement system – SPMK–9 of an aircraft was carried out. The author of [9] has developed a magneto-electric synchronous MEG generator with a capacity of at least 200 kVA and more alternating current, which serves as an SG starter-generator. In [10], a high-voltage

direct current electric generator with a capacity of up to several hundred kilowatts was developed with a direct drive from an aircraft engine operating in a system with an electronic converter. The author [11] has developed and numerically modeled a backup system for generating electrical energy based on a magnetoelectric generator and a voltage inverter, built using a modular principle.

The basics of simulation modeling of PSS aircraft in the Matlab package are presented in the monograph [12]. The work [13] presents a model of a synchronous machine – SM with a damper winding, further calculated in the Matlab package. A model of synchronous connection of generators to a single network has been investigated. The authors of [14] developed a refined model of a synchronous generator – SG, presented in the form of three machines: the exciter, the exciter and the generator itself. The results of modeling in the Matlab package are presented. In [15], the SG model is presented by a system of matrix equations. The block diagrams of the voltage regulator and constant speed drive are given. The PSS aircraft model is implemented in the Matlab / Simulink package.

The authors of [16] presented the results of simulation modeling of the power unit of the PSS of fully electric aircraft in the Matlab / Simulink package. The authors of [17] simulated the PSS of the Il – 76 aircraft in the Simulink package. Models of PSS of alternating and direct currents, their elements, simulation results are presented. In [18], simulation modeling was carried out in the Matlab / Simulink package for DC PSS of the Su-30SM aircraft in normal and emergency operating modes. The authors of [19] developed a simulation model of the PSS of the Su-27 aircraft in the Matlab / Simulink package. It allows you to explore the PSS of the aircraft both in normal and emergency operating modes. The author of [20] carried out a simulation of the operation of AC and DC systems of the PSS of IL-76 aircraft in the Matlab / Simulink package. In [21], a model of a power supply system for a promising long-range aircraft in the SimInTech software package is considered. The results of modeling a four-channel system for generating and distributing AC power during normal operation are presented.

In the article [22], the simulation of the propulsion mode of a starter-generator set for an aircraft gas turbine engine in the Matlab / Simulink package was carried out. A permanent magnet synchronous motor is used as an electrical machine.

The author of [23] presents a system for regulating the frequency of the output voltage of a synchronous generator, developed on the basis of fuzzy logic using a genetic algorithm that allows optimizing the characteristics of the frequency regulator.

The work [24] presents a methodology for designing of an aircraft PSS. The tasks required for the implementation of automation of the design process of the aircraft PSS are listed. The authors of [25] presented the modeling of the PSS for aircraft of Bombardier Global Express aircraft in the Simulink package (an autonomous implementation model) and the OPAL-RT solver (for real-time modeling). The authors of [26] presented a cross-platform methodology for designing an aircraft solar power plant. The packages used to simulate the operating modes of the PSS aircraft – Matlab / Simulink and Modelica.



## References

1. Herman-Galkin S. G. Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0: Textbook. – SPb: KORONA print, 2001. – 320 p (in Russian).
2. German – Galkin S.G. *MATLAB & Simulink*. MATLAB & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. – SPb.: KORONA–Vek, – 2008. – 368 p (in Russian).
3. Chernykh I.V. Simulation of electrical devices in MATLAB SymPowerSystems and Simulink. – Moscow: DMK Press, 2012. – 288 p (in Russian).
4. Garganeyev A.S., Kharitonov S.A. Promising power supply systems with fully electrified equipment // Reports of TUSUR. - 2009. – No. 2 (20). – p. 185 – 192 (in Russian).
5. Bocharov V.V., Postnikov V.A., Reznikov S.B., Kharchenko A.I. Energyeconomical combined system with high power quality for the concept of "fully electrified aircraft" // Electronic the journal «Proceedings of the MAI». – 2012. – No 58. – 19 p (in Russian).
6. Khalyutin S.P. Electric plane: past, present, future // Aviapanorama. – 2016. – No 6. – pp. 42 – 51 (in Russian).
7. Khalyutin S.P., Davidov O.A., Zhmurov B.V. Electric and Hybrid Aircraft: Prospects for Creation // Electricity. – 2017. – No 9. – pp. 4 –16 (in Russian).
8. Volokitina Ye.V. Research and development of a high-speed valve electric drive for controls of new aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Chuvash. state un-t. – Cheboksary, 2006. – 197 p (in Russian).
9. Vlasov A.I. Magnetolectric starter – generator in the power supply system of new generation aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Chuvash. state un-t. – Cheboksary, 2010. – 260 p (in Russian).
10. Kuz'michev R.V. Generator in the power supply system of a promising aircraft with an increased level of electrification. Diss. Cand. tech. Sciences / Moscow Aviation Institute – Moscow, 2012.– 193 p (in Russian).
11. Mashinskiy V.V. Backup system for generating electrical energy for aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Novosib. state tech. university. – Novosibirsk, 2014. – 134 p (in Russian).
12. Khalyutin S.P., Tyulyayev M.L., Zhmurov B.V., Starostin I.Ye. Simulation of complex electric power systems of aircraft / Military Air Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin. Moscow – 2010. – 188 p (in Russian).
13. Demchenko A.G., Artomenko YU.P. Simulation of parallel operation of the on-board AC power supply system in the Matlab package // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 55 –60 (in Russian).
14. Artemenko YU.P., Sharapov S.S. Application of Matlab in modeling an on-board AC power supply system // Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 77 – 84 (in Russian).
15. Artemenko YU.P., Demchenko S.S. Improving the model of the on-board AC power supply system // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2015 – No 213. – pp. 34 – 42 (in Russian).
16. Zhmurov B.V., Matyushina A.V., Sokolov P.A. Modeling the operating modes of power supply centers for electric drives of a fully electrified aircraft // Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 99 – 103 (in Russian).
17. Bocharov A.S., Gubanov K.A., Yevdokimov YA.A. Simulation model of the electric power complex of the Il–76 aircraft in the Simulink simulation environment / Coll. scientific. Art. based on the materials of the IV All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (November 23-24, 2016), Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2017. – pp. 32 – 39 (in Russian).

18. Abbyasov I.V., Bocharov A.S., Sharov I.V. A simulation model of an aircraft DC power supply system with the ability to study in normal and emergency modes of operation in the Simulink simulation environment / Actual problems and perspective directions of development of aviation equipment complexes / Coll. scientific. Art. based on the materials of the V All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (February 15–16, 2018): – Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2018. – pp. 3 – 7 (in Russian).

19. Bocharov A.S., Gubanov K.A., Shipilov A.A. Automated workstation for studying and researching the power supply system of the Su–27 fighter / Actual problems and perspective directions of development of aviation equipment complexes / Coll. scientific. Art. based on the materials of the V All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (February 15–16, 2018): – Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2017. – P. 13 – 18 (in Russian).

20. Al'chin YU.YU. Development of a simulation model of a power supply system for a heavy aircraft. Master Thesis, NTPU, Tomsk, 2018. – 103 p (in Russian).

21. Smagin D.I., Starostin K.I., Savel'yev R.S., Satin A.A., Pritulkin T.D., Methods of creating a dynamic mathematical model of an AC power supply system (PSS) of a promising long-haul passenger aircraft in the SimInTech software package // Comp. nanotechnol. – 2019. – No. 2. – pp. 57 – 62 (in Russian).

22. Korolev Ye.V., Liskovskaya Ye.V., Pavlov D.A. Calculation and modeling of a starter generator aircraft gas turbine engine // International Conference on Soft Computing, – 2020. – V.1. – pp. 296 –298 (in Russian).

23. Karimov V.G. Combined systems for regulating the frequency of the output voltage with elements of artificial intelligence for contactless synchronous generators. diss. Cand. tech. Science / Ufa State Aviation Technical University. – Ufa, 2012.– 146 p (in Russian).

24. *Zhmurov B.V.* The process of designing power supply systems for aircraft as an object of optimization // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2018. – No. 01. – pp. 88 – 103 (in Russian).

25. Montealegre Lobo L., Dufour Ch., Mahseredjian J. Real-time Simulation of More-Electric Aircraft Power Systems // Paper presented at the EPE'13 ECCE Europe conference, September 3 – 5, 2013, Lille, France. – 11 p.

26. Nuzzo P., Finn J., Mozumdar M., Sangiovanni-Vincentelli A. Platform-Based Design Methodology and Modeling for Aircraft Electric Power Systems // Paper presented at the Green Energy and System Conference, 25 Nov. 2013 Long–Beach, Ca., USA. – 7 p.

*Материал принят к публикации 06.10.21.*

УДК 621.391

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0739507.66289369

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ С ПОМОЩЬЮ САПР MATLAB

**Андрей Александрович Лысенков**

АО «НПК «Тристан», студент, Россия, Смоленск

lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин**

Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, к.т.н., доцент, Россия, Смоленск

*Аннотация. Рассмотрены основные особенности среды проектирования «MATLAB», на примере разработки повышающего регулятора, приведены примеры встроенной симуляции собранных схем в САПР.*

*Ключевые слова: MATLAB, повышающий регулятор, модель преобразователя.*

### DESIGNING A STEP-UP REGULATOR WITH DIRECT COMMUNICATION USING MATLAB CAD

Andrei Al. Lysenkov

NPK Tristan JSC, student, Russia, Smolensk, lysenkovandrew02@gmail.com

Sergey Al. Amelin

Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The main features of the MATLAB design environment are considered, using the example of the development of a step-up regulator, an example of the simulation of assembled circuits built into CAD is given.*

*Keywords: MATLAB, step-up regulator, converter model.*

Достаточно часто инженерам приходится решать задачи, связанные со сферой силовой электроники. Рассчитывать все параметры того или иного преобразователя вручную очень долгая и кропотливая работа. Поэтому большинство разработчиков пользуются специальными программами для облегчения и ускорения процесса проектирования.

Одной из наиболее популярных САПР является «MATLAB». Данная среда позволяет решать массу задач в сфере силовой электроники, например, её можно использовать для проектирования повышающего регулятора. С помощью встроенных библиотек соберём схему повышающего регулятора (рис. 1). Основные параметры компонентов рассчитываются по всем известным формулам.

Проведём симуляцию и снимем осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения в установившемся граничном режиме (рис. 2).

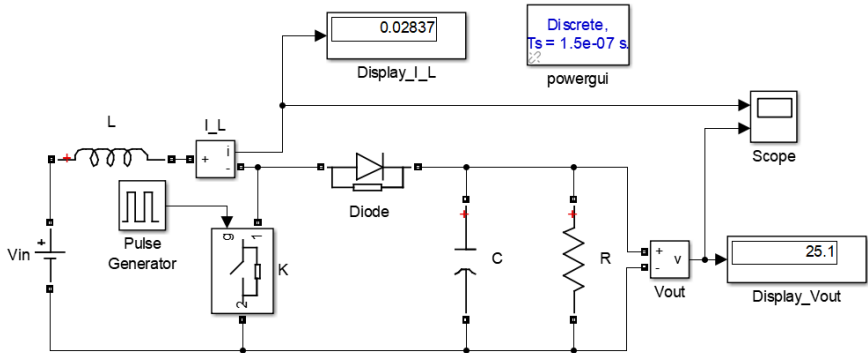


Рисунок 1 – Схема повышающего регулятора

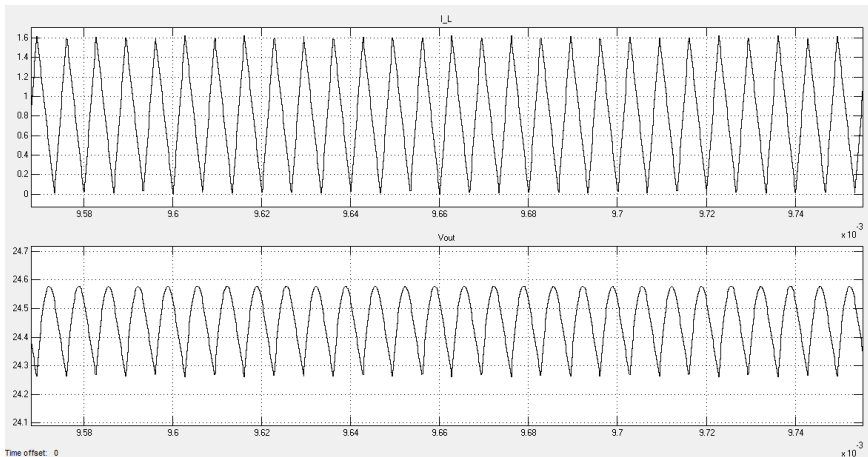


Рисунок 2 – Осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения

Рассчитаем коэффициент заполнения для граничного режима тока дросселя и зададим его в блоке Pulse Generator. После проверки правильности расчета граничного значения дросселя и конденсатора выберем дроссель и конденсатор с необходимыми запасами из стандартного ряда номиналов. Примем запас равным 30%: 20% на разброс параметров и 10% на гарантированную работу в РНТ. После чего построим непрерывную нелинейную модель преобразователя в MATLAB (рис. 3).

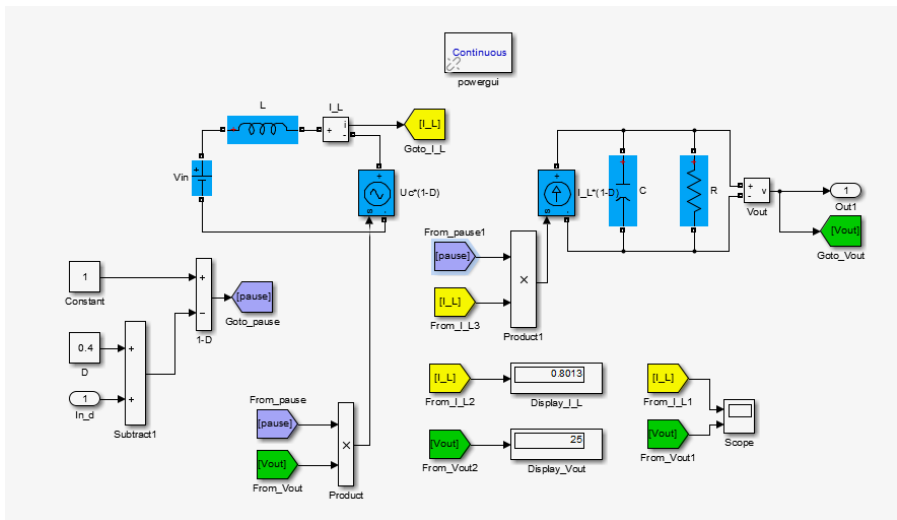


Рисунок 3 – Непрерывная нелинейная модель преобразователя

Построим ЛЧХ «коэффициент заполнения – ток дросселя» (рис. 4).

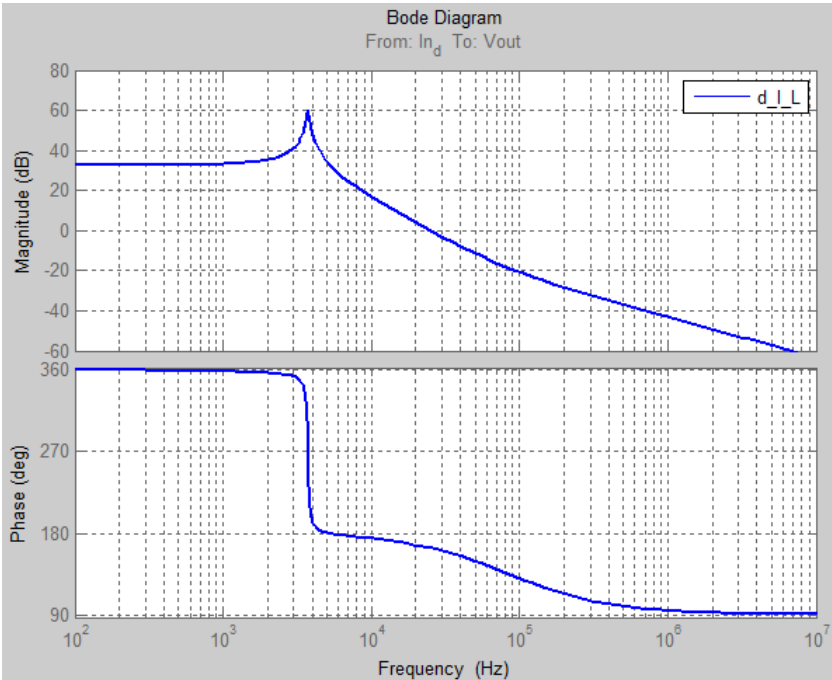


Рисунок 4 – ЛЧХ «коэффициент заполнения – ток дросселя»

Синтезируем звено коррекции контура напряжения и проверим работоспособность ключевой модели преобразователя. Проведём симуляцию и получим осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения (рис. 5).

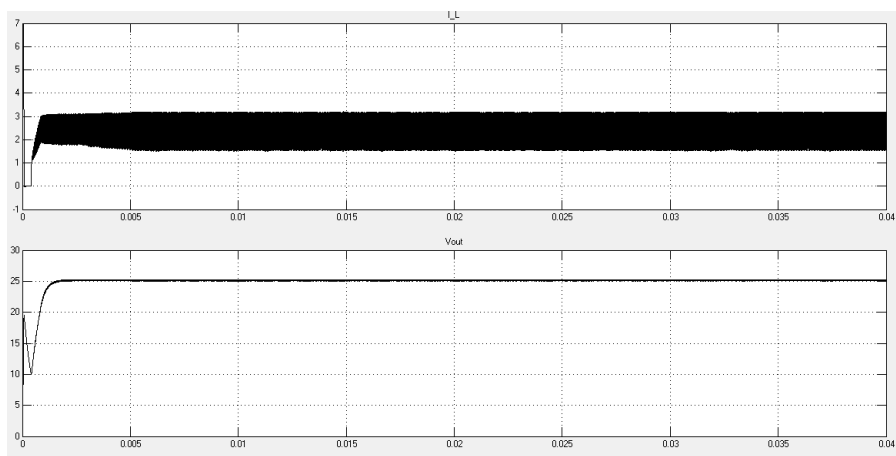


Рисунок 5 – Осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения

Из графиков можно сделать вывод, что система является устойчивой, перерегулирование достигает не более 20 %, а средний ток дросселя и выходное напряжение соответствуют заданным значениям.

#### Список литературы

1. Проектирование прямоходового импульсного преобразователя постоянного тока. Библиофонд. URL: [https://www.bibliofond.ru/download\\_list.aspx?id=869122](https://www.bibliofond.ru/download_list.aspx?id=869122) (дата обращения 20.05.2021).
2. Однотактный прямоходовой преобразователь. Алфавит силовой электроники. URL: <https://fresh-web-studio.github.io/artemdobnikov/math/forward.html> (дата обращения 20.05.2021).
3. Пример прямоходового преобразователя без гальванической развязки. Oz.lib. URL: [https://ozlib.com/812140/tehnika/primer\\_pryamohodovogo\\_preobrazovatelya\\_galvanicheskoy\\_razvyazki](https://ozlib.com/812140/tehnika/primer_pryamohodovogo_preobrazovatelya_galvanicheskoy_razvyazki) (дата обращения 20.05.2021).
4. Прямоходовой преобразователь. ТЕРРА электроника. URL: <https://www.terraelectronica.ru/news/6024> (дата обращения 20.05.2021).
5. IR2181 High and low side driver. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/300/DOC000300144.pdf> (дата обращения 20.05.2021).
6. TL494 Pulse-width-modulation control circuits. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/204/DOC000204401.pdf> (дата обращения 20.05.2021).

*Материал принят к публикации 30.09.21.*

УДК 621.391

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f080eec5.51067376

## СИНТЕЗ И СИМУЛЯЦИЯ РАБОТЫ ПОНИЖАЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА В САПР MATLAB

**Андрей Александрович Лысенков**

АО «НПК «Тристан», студент, Россия, Смоленск

lysenkovandrew02@gmail.com

**Сергей Александрович Амелин**

Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, к.т.н., доцент, Россия, Смоленск

*Аннотация. Рассмотрены основные особенности среды проектирования «MATLAB», на примере разработки понижающего регулятора, приведены примеры встроенной симуляции собранных схем в САПР.*

*Ключевые слова: MATLAB, понижающий регулятор, модель преобразователя.*

### DESIGNING A STEP-UP REGULATOR WITH DIRECT COMMUNICATION USING MATLAB CAD

Andrei Al. Lysenkov

NPK Tristan JSC, student, Russia, Smolensk, lysenkovandrew02@gmail.com

Sergey Al. Amelin

Smolensk branch of MPEI, candidate of technical sciences, docent, Russia, Smolensk

*Abstract. The main features of the MATLAB design environment are considered, using the example of the development of a step-down regulator, examples of built-in simulation of assembled circuits in CAD are given.*

*Keywords: MATLAB, step-down regulator, converter model.*

Разработка и синтез регуляторов различного рода, это одна из повседневных задач инженеров силовой электроники. Существует множество средств, упрощающих расчеты и проектирование регуляторов. Однако не все САПР обладают возможностью симуляции собранной схемы, а также последующей отладки данной схемы прямо в проекте.

Одной из наиболее популярных САПР является «MATLAB». Данная среда позволяет решать массу задач в сфере силовой электроники, например, её можно использовать для синтеза понижающего регулятора. С помощью встроенных библиотек соберём схему понижающего регулятора (рис. 1). Основные параметры компонентов рассчитываются по всем известным формулам. Программа позволяет выбирать между идеальными компонентами (без каких-либо погрешностей) и реальными компонентами (обладающими паразитными параметрами). Для проверки рассчитанных значений подойдут первые компоненты, а для синтеза итогового генератора – вторые.

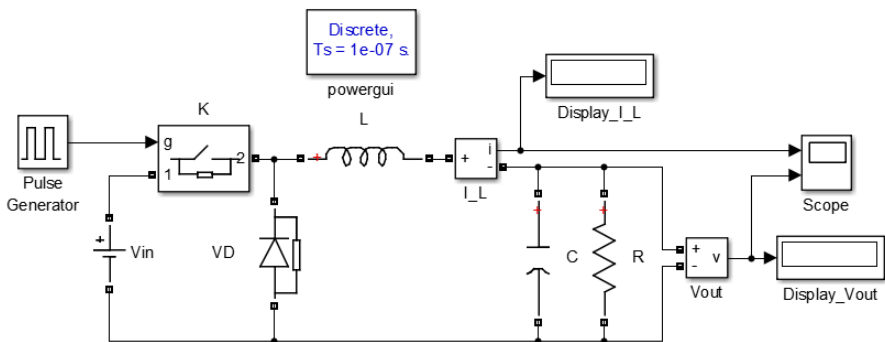


Рисунок 1 – Схема понижающего регулятора

Проведём симуляцию и снимем осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения в установившемся граничном режиме (рис. 2).

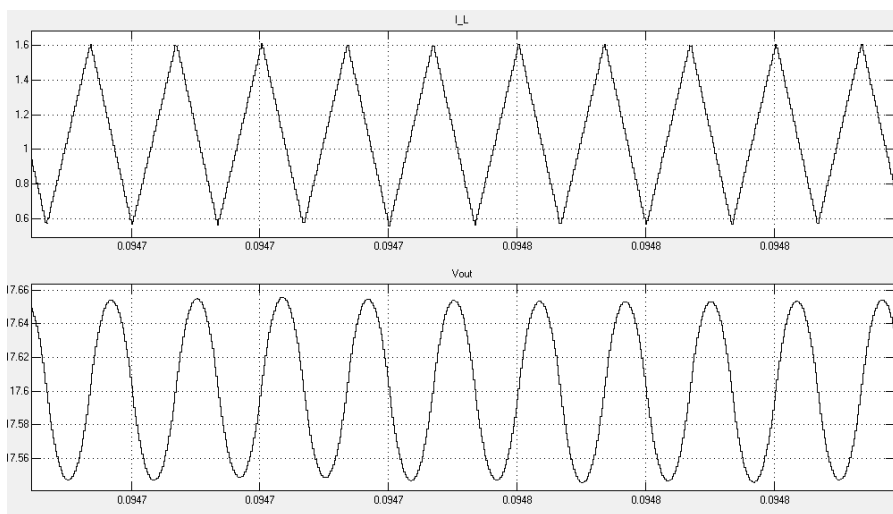


Рисунок 2 – Осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения

Рассчитаем коэффициент заполнения для граничного режима тока дросселя и зададим его в блоке Pulse Generator. После проверки правильности расчета граничного значения дросселя и конденсатора выберем дроссель и конденсатор с необходимыми запасами из стандартного ряда номиналов. Примем запас равным 30%: 20% на разброс параметров и 10% на гарантированную работу в РНТ. После чего построим непрерывную нелинейную модель преобразователя в MATLAB (рис. 3).



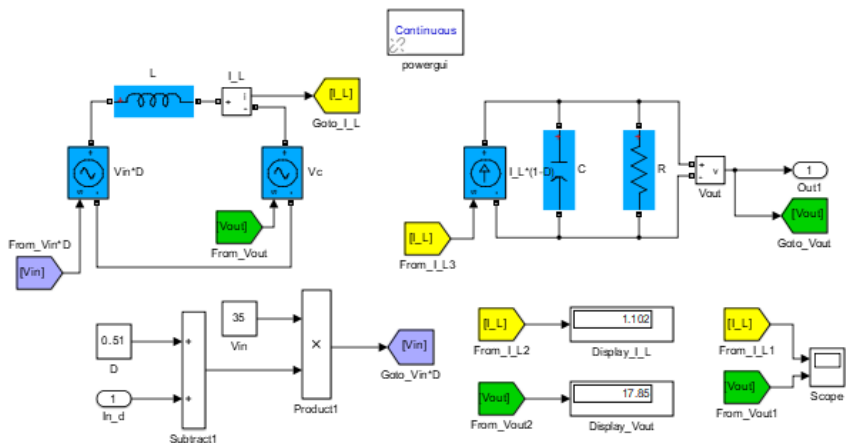


Рисунок 3 – Непрерывная нелинейная модель преобразователя

Построим ЛЧХ «коэффициент заполнения – ток дросселя» (рис. 4).

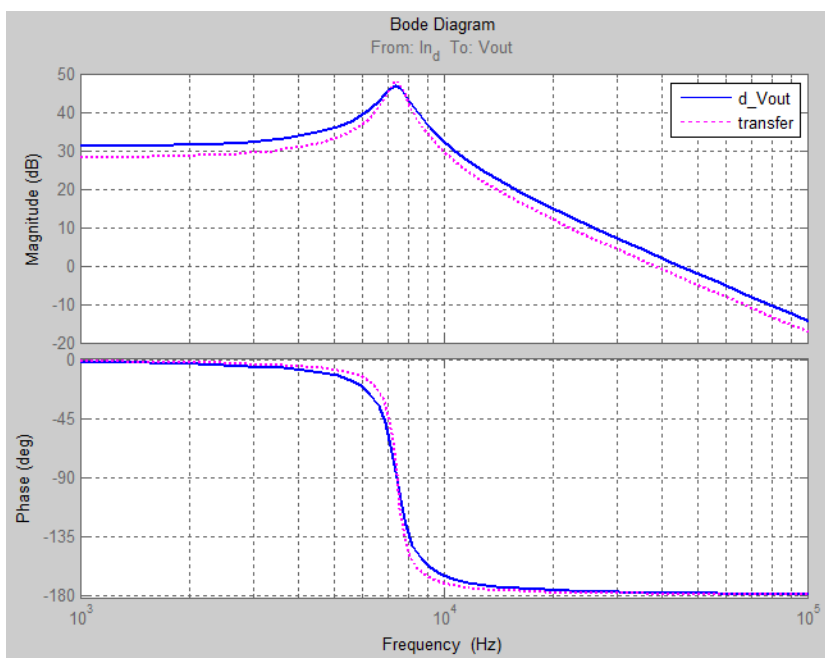


Рисунок 4 – ЛЧХ «коэффициент заполнения – ток дросселя»

Синтезируем звено коррекции контура (рис. 5) напряжения и проверим работоспособность ключевой модели преобразователя. Проведём симуляцию и получим осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения (рис. 6).

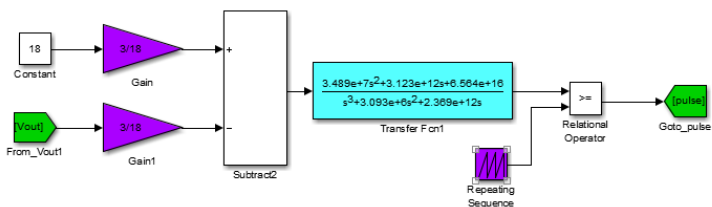


Рисунок 5 – Звено коррекции контура напряжения

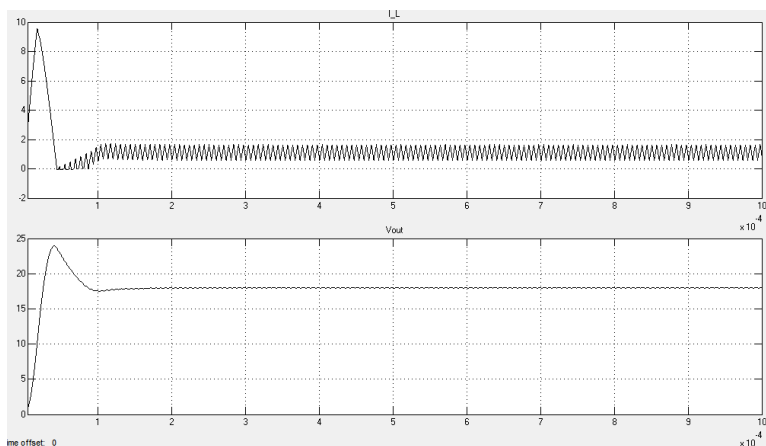


Рисунок 6 – Осциллограммы тока дросселя и выходного напряжения

Из графиков можно сделать вывод, что система является устойчивой, перерегулирование достигает не более 20 %, а средний ток дросселя и выходное напряжение соответствуют заданным значениям.

### Список литературы

1. Проектирование прямоходового импульсного преобразователя постоянного тока. Библиофонд. URL: [https://www.bibliofond.ru/download\\_list.aspx?id=869122](https://www.bibliofond.ru/download_list.aspx?id=869122) (дата обращения 20.05.2021).
2. Однотактный прямоходовой преобразователь. Алфавит силовой электроники. URL: <https://fresh-web-studio.github.io/artemsdobnikov/math/forward.html> (дата обращения 20.05.2021).
3. Пример прямоходового преобразователя без гальванической развязки. Oz.lib. URL: [https://ozlib.com/812140/tehnika/primer\\_pryamohodovogo\\_preobrazovatelya\\_galvanicheskoy\\_razvyazki](https://ozlib.com/812140/tehnika/primer_pryamohodovogo_preobrazovatelya_galvanicheskoy_razvyazki) (дата обращения 20.05.2021).
4. Прямоходовой преобразователь. ТЕРРА электроника. URL: <https://www.terraelectronica.ru/news/6024> (дата обращения 20.05.2021).
5. IR2181 High and low side driver. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/300/DOC000300144.pdf> (дата обращения 20.05.2021).
6. TL494 Pulse-width-modulation control circuits. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/204/DOC000204401.pdf> (дата обращения 20.05.2021).

Материал принят к публикации 30.09.21.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА СИГНАЛА В MULTISIM

**Игорь Иванович Медведев**

Брянский государственный технический университет, доцент кафедры  
«Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы»  
доцент, к.т.н., Россия, Брянск, medigor@mail.ru

*Аннотация. Рассмотрены особенности результатов спектрального анализа сигналов в различных версиях интерактивного эмулятора радиосхем Multisim.*

*Ключевые слова: интерактивный эмулятор радиосхем Multisim, спектральный анализ сигнала, спектральная составляющая, постоянная составляющая.*

### INVESTIGATION OF THE SIGNAL SPECTRUM IN MULTISIM

Igor I. Medvedev

Bryansk state technical University, Associate Professor of the Department «Electronic, Radio-electronic and Electrical Systems», Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Russia, Bryansk medigor@mail.ru

*Abstract. The features of the results of spectral analysis of signals in various versions of the interactive Multisim radio circuit emulator are considered.*

*Keywords: interactive Multisim radio emulator, spectral analysis of the signal, spectral component, constant component.*

Интерактивный эмулятор радиосхем Multisim обладает весьма широкими возможностями по анализу различных радиоэлектронных принципиальных электрических схем. В данной статье речь пойдёт об использовании Multisim для исследования спектра сигналов. Спектральный анализ можно проводить при изучении соответствующих разделов различных учебных дисциплин, например, при изучении амплитудной модуляции на дисциплинах «Устройства приёма и преобразования сигналов» и «Устройства формирования и генерирования сигналов».

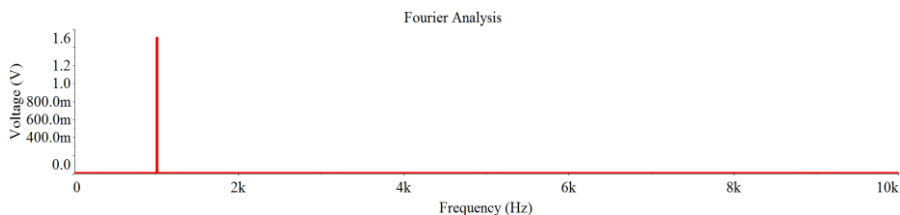
Multisim позволяет проводить спектральный анализ сигнала в любой точке или любой ветви принципиальной электрической схемы. Так, например, при изучении амплитудного детектора на дисциплине «Устройства приёма и преобразования сигналов» с помощью Multisim можно исследовать спектры поступающего на амплитудный детектор амплитудно-моделированного сигнала и сигнала на выходе амплитудного детектора. Такое исследование, проводимое на лабораторном занятии, помогает студентам лучше усвоить принцип работы амплитудного детектора.

Отметим, что при проведении исследования сигналов в Multisim следует обращать внимание на полученный результат анализа и его соответствие теоретическим положениям. Если обнаружится несоответствие, то это значит, что, либо неправильно выполнены измерения при исследовании, либо

интерактивный эмулятор радиосхем Multisim работает неправильно из-за имеющихся в программном обеспечении ошибок.

Автор в своих публикациях неоднократно указывал на ошибки в Multisim, приводящие к получению неправильных результатов моделирования работы принципиальных электрических схем [1 – 4]. Автор также указывал, что в версии Multisim 14 (последней на данный момент времени версии) появились ошибки, которых в более ранних версиях не было [5].

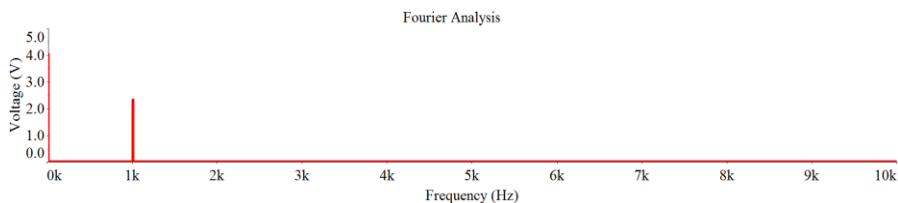
Однако в Multisim 14 произошли и положительные изменения. Эти изменения касаются результатов спектрального анализа сигналов. В более ранних версиях, например, в Multisim 11, результат спектрального анализа сигнала, имеющего постоянную составляющую (что свойственно сигналу на выходе амплитудного детектора), не соответствовал теоретическим положениям спектрального анализа: в спектрограмме, отображаемой в Multisim 11 не было спектральной составляющей, отражающей наличие постоянной составляющей в исследуемом сигнале (рис. 1). Причём эта спектральная составляющая отсутствовала не только на рисунке спектрограммы, но и в таблице, содержащей данные расчёта, находящейся над спектрограммой.



*Рисунок 1 – Спектрограмма выходного сигнала амплитудного детектора в Multisim 11*

Обсуждая со студентами спектрограмму, полученную в Multisim 11, приходилось обращать их внимание на отсутствие спектральной составляющей, отражающей наличие постоянной составляющей в исследуемом сигнале (например, в выходном сигнале амплитудного детектора) и отсылать к теоретическим материалам, описывающим спектры сигналов на входе и выходе амплитудного детектора, чтобы увидеть правильную спектрограмму.

Несколько лет назад автор, обнаружив этот недостаток в спектре сигналов, имеющих постоянную составляющую, указал на него разработчикам Multisim 11. После некоторых дебатов по этому вопросу, представитель разработчика Multisim согласился, что результаты спектрального анализа сигналов с постоянной составляющей надо поправить. И в Multisim 14 на спектрограммах сигналов, наконец, появилась спектральная составляющая, отражающая постоянную составляющую анализируемых сигналов (рис. 2).



*Рисунок 2 – Спектрограмма выходного сигнала амплитудного детектора в Multisim 14*

Таким образом, недостаток интерактивного эмулятора радиосхем Multisim, касающийся исследования спектра сигналов, имеющих постоянную составляющую, был исправлен разработчиком этого программного продукта. Теперь студенты могут самостоятельно проводить исследования спектров сигналов, не опасаясь получить неверный результат.

### **Список литературы**

1. *Медведев, И.И.* Компьютерное моделирование схем электронных устройств в учебном процессе // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.2. – С. 143 – 146.

2. *Медведев, И.И.* О целесообразности применения новых информационных технологий в учебном процессе. Математические методы и информационно-технические средства: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции, 22-23 июня 2012 г. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2012. – С. 130 – 131.

3. *Медведев, И.И.* О «подводных камнях» при применении программ схемотехнического моделирования в учебном процессе // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии: сборник материалов международной научно-практической конференции (Воронеж, 10 июня 2015 г.). – Часть 3. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. – С. 103 – 106.

4. *Медведев, И.И.* Применение компьютерных технологий при подготовке специалистов по радиотехническим специальностям // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии: сборник материалов международной научно-практической конференции (Воронеж, 16 июня 2016 г.). – Часть 1-2. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2016. – С. 321 – 323.

5. *Медведев, И.И.* Ещё одна новая ошибка в Multisim 14 // "САПР и моделирование в современной электронике", международная научно-практическая конференция (3; 2019; Брянск). Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», 24-25 октября 2019 г. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С. 41 - 43.

*Материал принят к публикации 09.10.21.*

УДК 621.382.2

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f09d8527.44162014

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КРЕМНИЕВОГО ДИОДА ШОТТКИ

**Дмитрий Михайлович Медведев**

доцент каф. ЭРЭиЭС, доцент, канд. техн. наук, dml17rj@yandex.ru

**Алексей Алексеевич Малаханов**

зав. каф. ЭРЭиЭС, доцент, канд. техн. наук, malakhan@yandex.ru

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

*Аннотация. Представлены результаты моделирования высоковольтного кремниевого диода Шоттки в приборно-технологической САПР Synopsys Sentaurus TCAD.*

*Ключевые слова: диод Шоттки, кремний, моделирование.*

### MODELING OF THE HIGH-VOLTAGE SILICON SCHOTTKY DIODE

Dmitry M. Medvedev

Docent of the Electronics Department, Docent, Cand. tech. sciences, dml17rj@yandex.ru

Alexey A. Malakhanov

Head of the Electronics Department, Docent, Cand. tech. sciences, malakhan@yandex.ru

Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk

*Abstract. The results of modeling of the high-voltage silicon Schottky diode in the device-technological design system Synopsys Sentaurus TCAD was presented.*

*Keywords: Schottky diode, silicon, modeling.*

Диод пропускает электрический ток только в одном направлении, а в другом направлении блокирует прохождение тока до критического значения, называемого обратным напряжением. Основные преимущества силовых кремниевых диодов Шоттки – сниженное (по сравнению с «обычными» кремниевыми диодами) прямое падение напряжения и отсутствие накопления заряда, задерживающего выключение диода (т.е. потенциально лучшие частотные свойства). Для серийно выпускаемых силовых кремниевых диодов Шоттки максимально допустимое обратное напряжение не превышает 200 В.

Структура высоковольтного кремниевого диода Шоттки предложена в [1]: эпитаксиальный слой p– толщиной 96 мкм с удельным сопротивлением 25 Ом\*см; подложка n+ толщиной 508 мкм с удельным сопротивлением 0,02 Ом\*см; алюминиевый контакт Шоттки с высотой барьера 0,8 эВ. Эта структура обеспечивает пробивное напряжение 920 В.

Однако, высоковольтные диоды, используемые в современных силовых преобразователях электрической энергии должны иметь максимально допустимое обратное напряжение не менее 1200 В. Чтобы обеспечить данное требование, была разработана структурно-геометрическая модель

высоковольтного кремниевого диода Шоттки в приборно-технологической САПР Synopsys Sentaurus TCAD (рис. 1).

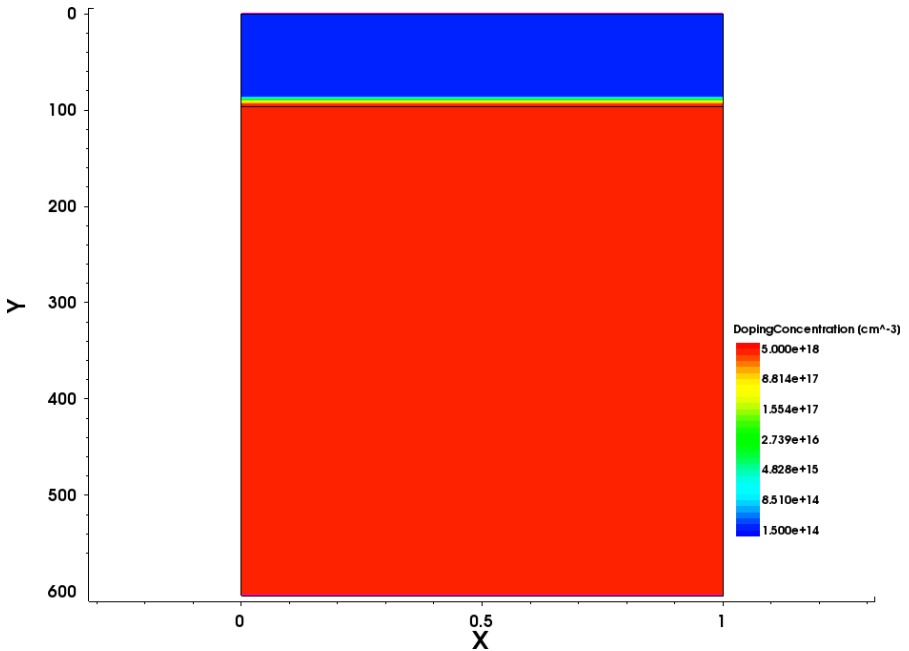


Рисунок 1 – Структурно-геометрическая модель высоковольтного кремниевого диода Шоттки

На этой модели вычислялись обратные ВАХ при температурах  $-50$ ,  $27$  и  $100$  °С. При вычислении плотности токов в узлах сетки конечных элементов применялась диффузионно-дрейфовая модель, основанная на решении уравнений непрерывности для электронов и дырок, при вычислении потенциалов – решалось уравнение Пуассона. Использовалась модель подвижности носителей заряда PhiMob. Выполнялось изотермическое моделирование – задавалась постоянная температура кристаллической решетки. Задавались следующие команды для модуля SDevice:

```

Electrode {
  { Name="Anode" Voltage=0 Schottky Barrier=@F1b@ }
  { Name="Cathode" Voltage=0 }
}

Physics {
  AreaFactor=1e8 #Площадь анода 1e4 um * 1e4 um = 1 cm^2
  Fermi

```

```

Temperature=@T@

EffectiveIntrinsicDensity(
  BandGapNarrowing (Slotboom)
)
IncompleteIonization
Mobility(
  DopingDependence (PhuMob)
  HighFieldSaturation
  IncompleteIonization
)
Recombination(
  Auger
  Avalanche (Okuto)
  ConstantCarrierGeneration (Value=1)
  SRH (DopingDependence ExpTempDependence)
)
}

Math {
  AvalDensGradQF
  ComputeGradQuasiFermiAtContacts=UseQuasiFermi
  ComputeIonizationIntegrals
  ElementVolumeAvalanche
  eMobilityAveraging=ElementEdge
  hMobilityAveraging=ElementEdge

  !(if { @T@ < 300 } { puts "Digits=15
ExtendedPrecision(128) RHSMIn=1e-15" })!
  Iterations=20
  Method=ParDiSo
  NotDamped=50
  NumberOfThreads=4
  Wallclock
}

Solve {
  Coupled(Iterations=1000 LineSearchDamping=1e-3) {
  Poisson }
  Coupled(Iterations=1000 LineSearchDamping=1e-3) {
  Poisson Electron }
  Coupled(Iterations=1000 LineSearchDamping=1e-3) {
  Poisson Electron Hole }

  Quasistationary(
    InitialStep=5e-3 MinStep=1e-7 MaxStep=1e-2
    Increment=1.5 Decrement=2
    BreakCriteria { Current (Contact="Cathode"
AbsVal=@Icmax@) }
    Goal { Name="Cathode" Voltage=@Vcmax@ }

```



```

) { Coupled { Poisson Electron Hole } }
}

```

Путем пробных вычислений была определена концентрация примеси в эпитаксиальном слое n-, равная  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , обеспечивающая пробивное напряжение 1400 В при 27 °С (рис. 2). При этом, удельное сопротивление эпитаксиального слоя составило 28 Ом\*см.

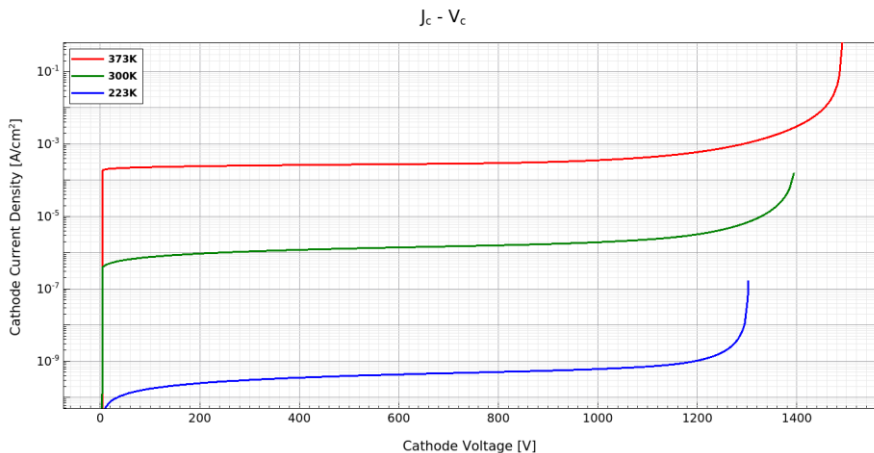


Рисунок 2 – Обратные ВАХ модели высоковольтного кремниевого диода Шоттки при различных температурах

Результаты моделирования дают возможность сделать следующие выводы. При наличии оптимальной системы периферийных охранных колец  $p^+$ , величина пробивного напряжения диода Шоттки ограничивается следующими параметрами: высотой барьера контакта Шоттки, толщиной эпитаксиального слоя n- и концентрацией примеси в нем. Существует прямая зависимость величины пробивного напряжения и обратного тока утечки высоковольтного кремниевого диода Шоттки от температуры.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований из [1], что позволяет считать разработанную модель достаточно адекватной.

#### Список литературы

1. Singh R., Baliga B.J. Cryogenic Operation of Silicon Power Devices. US: Springer, 1998. 166 pp.

Материал принят к публикации 12.10.21.

УДК 628.953

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0abe178.87427078

## ЭКСТРАКЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ SPICE-МОДЕЛИ СВЕТОДИОДОВ ПО ТРЕМ ТОЧКАМ ПРЯМОЙ ВАХ

**Виктор Петрович Падеров**, доцент, к.ф.-м.н., paderov@mail.ru

**Дмитрий Андреевич Аверкин**, студент, dima.avierkin@mail.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, РФ, Саранск

*Аннотация.* Предложен простой метод экстракции статических параметров SPICE-модели светодиодов по трем точкам ВАХ. Приведены формулы для расчета статических параметров и условия измерения точек ВАХ.

*Ключевые слова:* светодиод, SPICE-параметры, метод экстракции статических параметров.

### EXTRACTION STATIC PARAMETERS SPICE-MODEL OF LED ON THREE POINTS THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC

Viktor P. Paderov, docent, candidate of Physico-Mathematical Sciences, paderov@mail.ru

Dmitriy A. Averkin, student, dima.avierkin@mail.ru

Ogarev Mordovia State University, Russia, Saransk

*Abstract.* A simple method for extracting the static parameters of the SPICE-model of LEDs from three points of current-voltage characteristic proposes. Formulas for calculating the static parameters of the SPICE-model and measurement conditions are given.

*Keywords:* LEDs, SPICE-parameters, method extraction static parameters.

Схемотехническое моделирование источников питания светодиодов обычно проводится в системах моделирования, основанных на SPICE-моделях полупроводниковых приборов, и модель светодиодов достаточно точно описывается SPICE-моделью диодов. Статическая прямая ВАХ диодов, полагая, что ток колена на вольт-амперной характеристике (ВАХ)  $IKF$  равен бесконечности, описывается следующим уравнением [1]:

$$I_{fwd} = IS \exp \left[ \frac{V_{fwd} - I_{fwd} RS}{N V_T} \right], \quad (1)$$

где  $I_{fwd}$ ,  $V_{fwd}$  – прямой ток и прямое падение напряжения на светодиоде, соответственно;

$V_T = kT/q$  – тепловой потенциал,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $q$  – заряд электрона;

$RS$  – последовательное сопротивление;

$N$  – коэффициент эмиссии;

$IS$  – ток насыщения.

Три последних параметра являются статическими параметрами SPICE-модели диодов. В отличие от диодов на кремнии коэффициент эмиссии  $N$  светодиодов может иметь значения в несколько единиц, а последовательное сопротивление  $RS$  обычно существенно выше, чем у диодов на кремнии.

Экстракция статических параметров SPICE-модели диодов обычно производится по вольт-амперным характеристикам, измеренным в режиме постоянного тока, методом подгонки к экспериментальным данным [1]. Вследствие большой плотности тока и относительно высокого падения напряжения на светодиодах наблюдается существенный саморазогрев кристалла при токах, близких к номинальному [2]. Поэтому измерения ВАХ на постоянном токе в широком диапазоне токов не гарантируют изотермические условия кристалла, а, следовательно, могут иметь место большие погрешности в параметрах SPICE-модели светодиодов.

Предлагается простой метод экстракции статических параметров SPICE-модели ( $RS$ ,  $N$ ,  $IS$ ) по трем точкам ВАХ, измеренным вблизи номинального тока  $I_{nom}$ . Причем первая точка измеряется при номинальном токе, вторая точка при токе в  $\alpha$ -раз меньшем номинального, а третья при токе в  $\alpha$ -раз большем номинального. Следовательно, в соответствии с уравнением прямые напряжения на светодиодах для трех токов будут иметь вид:

$$V_1 = N V_T \ln(I_{nom}/IS) + I_{nom} RS, \quad (2)$$

$$V_2 = N V_T \ln(I_{nom}/(\alpha IS)) + I_{nom} RS/\alpha, \quad (3)$$

$$V_3 = N V_T \ln(\alpha I_{nom}/IS) + \alpha I_{nom} RS. \quad (4)$$

Если к уравнению (4) прибавить уравнение (3) и вычесть удвоенное уравнение (2), получим выражение, зависящее только от параметра  $RS$ , остальные члены и параметры сокращаются:

$$V_3 + V_2 - 2V_1 = \frac{(\alpha - 1)^2}{\alpha} I_{nom} RS, \quad (5)$$

откуда просто определяется параметр последовательного сопротивления

$$RS = \frac{\alpha}{(\alpha - 1)^2} \frac{V_3 + V_2 - 2V_1}{I_{nom}}. \quad (6)$$

Зная  $RS$  и вычитая из уравнения (2) уравнение (3), можно найти коэффициент эмиссии:

$$N = \frac{V_1 - V_2 - (1 - 1/\alpha) I_{nom} RS}{V_T \ln \alpha}, \quad (7)$$

и из уравнения (2) рассчитать ток насыщения

$$IS = I_{nom} \exp\left(-\frac{V_1 - I_{nom} RS}{N V_T}\right). \quad (8)$$

Изотермические условия кристалла светодиода сохраняются, если отклонения соседних точек от номинального тока малые, то есть коэффициент  $\alpha$  близок к единице. Но чем ближе  $\alpha$  к 1, тем больше первая дробь в уравнении (6). При уменьшении  $\alpha$  от 2 до 1,1 множитель увеличивается от 2 до 110. Таким образом, небольшие отклонения двух соседних точек от номинального тока будут требовать очень малых погрешностей измерения токов и напряжений, иначе резко увеличивается погрешность в параметре  $RS$ . Например, при номинальном токе через светодиоды 350 мА, коэффициенте  $\alpha=1,1$  (отклонения соседних точек по току составляют +10% и -9,1%) и случайных погрешностях в прямом напряжении 1 мВ, абсолютная погрешность в параметре  $RS$  для наихудшего случая отклонений напряжений  $V_3+\Delta V$ ,  $V_2+\Delta V$  и  $V_1-\Delta V$  составит

$$\Delta RS = \frac{\alpha}{(\alpha - 1)^2} \frac{4 \Delta V}{I_{nom}} \approx 1,57 \text{ Ом.}$$

Эта величина может быть больше, чем номинальное значение  $RS$ . При коэффициенте  $\alpha=1,5$  (отклонения соседних точек по току составляют +50% и -33%) погрешность  $\Delta RS$  уменьшается до 0,069 Ом, что составляет несколько процентов от номинальной величины  $RS$ . Следовательно, для уменьшения погрешности в параметре  $RS$  измерения трех точек ВАХ рекомендуется проводить при коэффициенте  $\alpha \geq 1,5$ . При таком выборе  $\alpha$  для поддержания изотермических условий кристалла светодиода рекомендуется проводить измерения трех точек ВАХ в импульсном режиме с возрастающей скважностью. То есть измерение прямого напряжения при токе  $I_{nom}/\alpha$  необходимо проводить при скважности импульсов  $\beta$ , не приводящей к существенному саморазогреву кристалла СД. Измерение при токе  $I_{nom}$  необходимо проводить при скважности импульсов, равной  $(\alpha \beta \gamma)$ , где  $\gamma=V_1/V_2$  – коэффициент, показывающий во сколько раз возрастает прямое падение напряжения на светодиоде при увеличении тока в  $\alpha$  раз по сравнению с током  $I_{nom}/\alpha$ . Измерение при токе  $\alpha I_{nom}$  необходимо проводить при скважности импульсов, равной  $(\alpha^2 \beta \delta)$ , где  $\delta=V_3/V_2$  – коэффициент, показывающий во сколько раз возрастает прямое падение напряжения на светодиоде при увеличении тока в  $\alpha^2$  раз по сравнению с током  $I_{nom}/\alpha$ . При такой скважности измерительных импульсов тока, средняя мощность, выделяемая в кристалле

светодиода, остается одинаковой, как при токе  $I_{nom}/\alpha$ . Температуру кристалла светодиода при токе  $I_{nom}/\alpha$  можно оценить по температурному коэффициенту прямого падения напряжения, измерив прямое падение напряжения при высокой скважности импульсов, когда саморазогрев кристалла практически отсутствует. Температура кристалла светодиода в градусах Кельвина оценивается как

$$T = \frac{V_2 - V_2(T = 300 K)}{(dV_F/dT)} + 273 [K],$$

где  $V_2$  – прямое падение напряжения, измеренное при токе  $I_{nom}/\alpha$  и скважности импульсов  $\beta$ ,

$V_2(T=300 K)$  – прямое падение напряжения, измеренное при токе  $I_{nom}/\alpha$  с большой скважностью импульсов (больше 10), когда саморазогрев кристалла практически отсутствует и его температура равна комнатной,

$dV_F/dT$  – температурный коэффициент прямого падения напряжения на светодиоде.

Таким образом, в статье описан простой метод экстракции статических параметров SPICE-модели светодиодов по трем точкам ВАХ, измеренным в районе номинального тока. Этот метод может быть пригоден для экстракции статических параметров SPICE-модели и других диодов, у которых последовательное сопротивление  $RS$  является значимым параметром. Использование такого метода экстракции предполагает наличие соответствующего импульсного измерительного оборудования.

#### Список литературы

1. *Massobrio G., Antognetti P.* Semiconductor Device Modeling with SPICE. Second Edition. McGraw-Hill, Inc. 1988. 479 p.
2. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Пер с англ. Под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

*Материал принят к публикации 08.10.21.*

УДК 621.3

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0bf5088.46246738

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМАТРОНА

**Владимир Владимирович Пикалов**, ассистент кафедры «Электропривода»  
wreditels@mail.ru

**Андрей Игоревич Бойков**, доцент кафедры «Электропривода», к.т.н.  
aboikov2013@gmail.com

**Павел Сергеевич Пономарев**, преподаватель СПО кафедры  
«Электропривода», pavel.sergeevi4.ponomarev@gmail.com

**Сергей Евгеньевич Кондратьев**, лаборант кафедры «Электропривода»  
sergeykondratyev@ieee.org

Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк

*Аннотация.* В данной статье рассмотрены недостатки существующих электродуговых плазматронов, для решения которых предложена собственная конструкция. Приведено описание разработанной установки и трехмерная модель.

*Ключевые слова:* электрическая дуга, плазматрон, блок зажигания дуги, плазменный генератор.

### IMPROVEMENT OF THE ELECTRIC ARC PLASMATRON STRUCTURE

Vladimir V. Pikalov, assistant of the Department of Electric Drive, wreditels@mail.ru

Andrei I. Boikov, lecturer of the Department of Electric Drive, candidate of technical sciences  
aboikov2013@gmail.com

Pavel S. Ponomarev, lecturer of the Department of Electric Drive  
pavel.sergeevi4.ponomarev@gmail.com

Sergey E. Kondratyev, laboratory assistant at the Department of Electric Drive  
sergeykondratyev@ieee.org

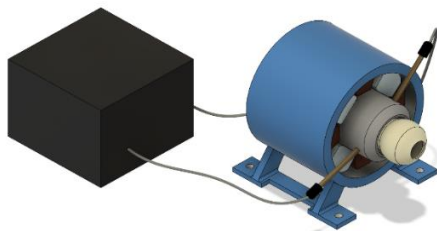
Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk

*Abstract.* This article discusses the disadvantages of existing electric arc plasmatrons, for the solution of which a proprietary design is proposed. A description of the developed installation and a three-dimensional model are given.

*Keywords:* electric arc, plasma torch, arc ignition unit, plasma generator.

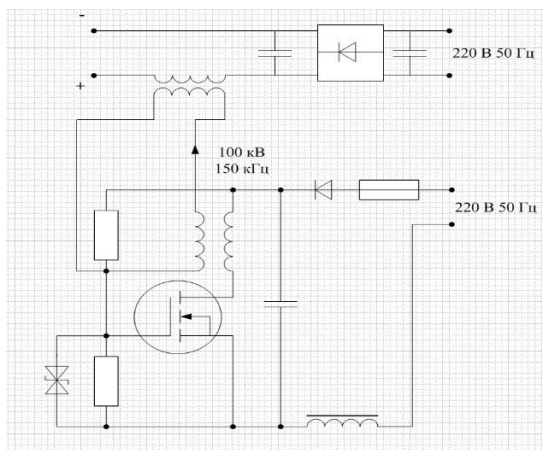
Проанализировав современные промышленные конструкции, применяемые в электродуговых плазменных установках, можно сделать вывод о том, что все конструкции имеют достаточно высокий уровень сложности изготовления плазматронов, нестабильное горение дуги, низкую плотность плазменного факела и т.д. Задачей данной работы является упрощение конструкции электродугового плазматрона, расширение диапазона регулирования количества и выходной мощности вырабатываемой плазмы, повышение концентрации плазмы на выходе и регулирование уровня отклонения вынесенной дуги от оси расположения электродов[1]. Решение поставленной задачи достигается тем, что в предлагаемой конструкции электродуговой установки графитовые электроды располагаются друг против

друга, что упрощает поджиг дуги, стабилизацию ее положения, поддержание стабильного горения и возможность вытягивания внешним электромагнитным полем [2]. 3D модель разработанной установки приведена на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Трехмерная модель предлагаемой установки в программном продукте Fusion 360*

При работе электродугового плазмотрона, технологическим процессом предусмотрен поджиг электрической дуги [3,4]. Для упрощения и ускорения процесса поджига электрической дуги в электродуговом плазмотроне постоянного тока, предложено схемное решение (рисунок 2), на основе системы высоковольтного высокочастотного электронного поджига с независимым источником питания [5, 6].



*Рисунок 2 – Схема высокочастотного пробоя дугового промежутка и стабилизации горения дуги.*

Экспериментальные исследования по электромагнитному вытягиванию дуги показаны на рисунке 3. Ток в дуговой части разработанной установки регулируется от 25 до 50А, напряжение постоянного тока, подаваемое на электроды при горящей дуге, не превышает 400в. В качестве источника питания плазмотрона выступает собственный управляемый тиристорный выпрямитель [9, 10]. Питание установки осуществляется от трехфазной промышленной сети переменного тока.



*Рисунок 3 – Экспериментальные исследования электромагнитного вытягивания электрической дуги*

Результаты экспериментов показали, что магнитная система стабилизирует положение вытянутой дуги в заданном положении [7,8]. Это обеспечивает устойчивое горение дуги при прохождении через нее плазмообразующего газа, что позволяет повысить температуру пламени, на выходе горелки.

*Статья написана при поддержке гранта ЛГТУ №9 "Создание электродугового плазмотрона с системами автоматизации".*

#### **Список литературы**

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я. Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). М.: Наука. 1973. - 232 с.
2. М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский, и др. // Электродуговые генераторы термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1999.
3. Чердниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
4. Михайлов Б.И. Электродуговые плазмохимические реакторы раздельного, совмещенного и раздельно-совмещенного типов / Б.И. Михайлов // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – т.17. - №3 – с.425-440.
5. Даутов Г.Ю. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы / Г.Ю. Даутов, А.Н. Тимошевский, Б.И. Михайлов и др. // Новосибирск. СП РАН, 2004. – 464 с.
6. Патент на изобретение RU 2715054. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Конев В.А., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Конев М.В., 25.02.2020.
7. Патент на изобретение № 2713746. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11.
8. Патент на полезную модель № 188618. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Чупров В.Б., Конев В.А. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11.
9. А. А. Муравьев и А. И. Бойков, Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора. Материалы XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления». Липецк. 2017. С. 159-163.
10. Патент на изобретение RU 2713736. Электродуговой плазмотрон для сжигания твердых отходов. Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Опубл. 07.02.2020.

*Материал принят к публикации 09.10.21.*



УДК 621.314

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0cf3926.88929118

## ПОСТРОЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ОДНОТАКТНОГО ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Николай Александрович Полищук**, магистр, colya.polischuk@yandex.ru

**Андрей Дмитриевич Юрченков**, магистр

**Сергей Владимирович Дроздецкий**, ст. преподаватель

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация.* В данной статье получены формулы для построения непрерывной модели однотактного прямоходового преобразователя, построена непрерывная модель и приведен пример ее использования.

*Ключевые слова:* импульсный преобразователь, непрерывная модель, коррекция частотных характеристик, синтез корректирующих звеньев.

### BUILDING A CONTINUOUS MODEL OF A FORWARD CONVERTER

Nikolay A. Polischuk, master, colya.polischuk@yandex.ru

Andrey D. Yurchenkov, master

Sergey V. Drozdetsky, senior lecturer

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Russia, Smolensk

*Abstract.* In this article, formulas for constructing a continuous model of a forward converter are obtained, a continuous model is built and an example of its use is given.

*Keywords:* pulse converter, continuous model, correction of frequency characteristics, synthesis of correcting links.

С помощью моделирования при разработке импульсных преобразователей можно оценить правильность расчета силового контура без построения макета на реальных компонентах. Для устойчивой работы преобразователя необходимо построить непрерывную модель и синтезировать корректирующие звенья. Для построения непрерывной модели преобразователя необходимо составить системы уравнений работы преобразователя на интервале импульса и интервале паузы [1].

Затем необходимо вывести среднее за период коммутации напряжение на дросселе и ток конденсатора. Таким образом, получаем для однотактного прямоходового преобразователя (ОПП) следующую систему уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{U_{вх} \cdot D}{K_{тр}} = U_{L\phi} + U_C \\ I_{L\phi} = I_C + I_H, \end{cases}$$

где  $U_{вх}$  – напряжение на входе преобразователя;  $D$  – коэффициент заполнения;  $K_{тр}$  – коэффициент трансформации;  $U_{L\phi}$  – напряжение на дросселе;  $U_C$  – напряжение на конденсаторе.

По полученной системе уравнений можно построить непрерывную модель, однако для этого также необходимо рассчитать параметры силового контура преобразователя. По первому уравнению системы составим схему, состоящую из входного и выходного источников напряжения и выходного дросселя. По второму уравнению системы составим схему из источника тока дросселя, выходного конденсатора и нагрузочного резистора. На рисунке 1 представлена непрерывная модель преобразователя в программе *MatLab*.

Источник входного напряжения реализован с учетом коэффициента заполнения и коэффициента трансформации. Выходные дроссель и конденсатор реализованы с учетом паразитных сопротивлений. Данная непрерывная модель является универсальной для всех ОПП. Пользователю необходимо задать входное напряжение, число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора, желаемое выходное напряжение и номиналы элементов силового контура (выходные дроссель, конденсатор и нагрузочный резистор). Также в данной непрерывной модели учтен коэффициент передачи ШИМ.

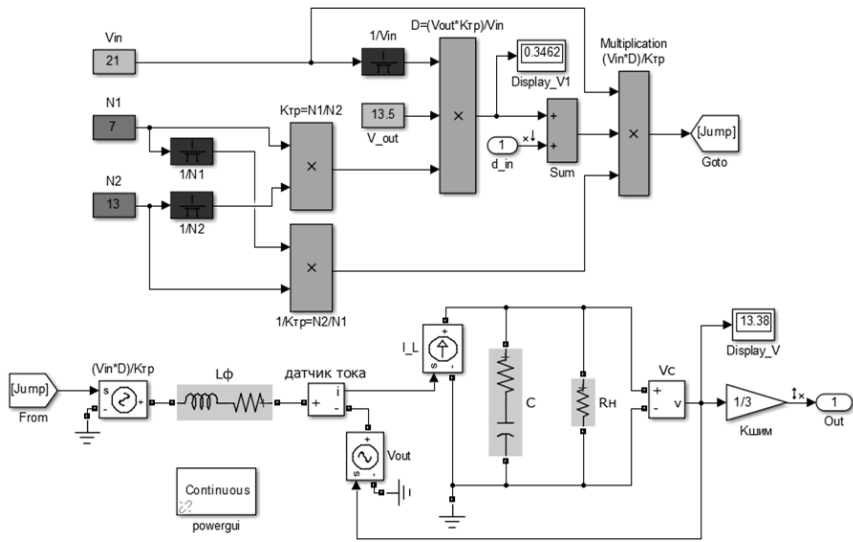


Рисунок 1 – Непрерывная модель преобразователя

В качестве примера подставим в непрерывную модель следующие параметры: входное напряжение 21 В, число витков первичной обмотки трансформатора 7, число витков вторичной обмотки трансформатора 13, желаемое выходное напряжение 13,5 В, выходной дроссель 76 мкГн, конденсатор 47 мкФ и нагрузочный резистор 9 Ом.

Далее, необходимо получить частотные характеристики, оценить устойчивость системы и осуществить коррекцию [3]. Для того, чтобы система

была устойчивой и обладала хорошими динамическими свойствами, наклон в точке пересечения с нулем должен быть  $-20$  дБ/дек, а протяженность этого участка – не менее половины декады в каждую сторону от точки пересечения. Также, запас по амплитуде более  $7$  дБ и запас по фазе от  $45$  до  $60$  градусов свидетельствуют о хороших динамических свойствах системы.

Как правило, коррекцию стараются реализовать наименьшим числом корректирующих звеньев. Однако в данном случае в результате коррекций одним нулем и одним полюсом, двумя нулями и двумя полюсами не удалось добиться необходимых запасов по амплитуде и фазе. Таким образом, был выбран способ коррекции с помощью интегратора, двух нулей и двух полюсов. На рисунке 2 представлены АЧХ и ФЧХ преобразователя после коррекции.

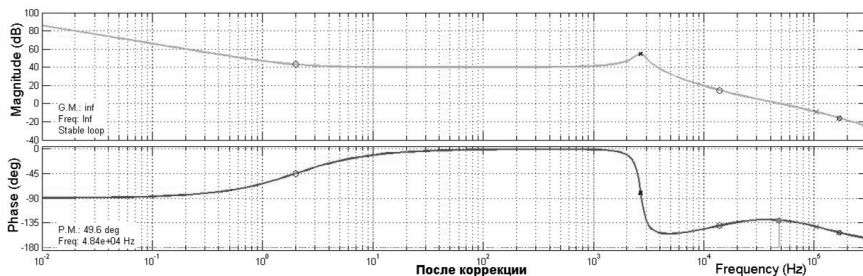


Рисунок 2 – АЧХ и ФЧХ преобразователя после коррекции

Исходя из полученных характеристик, можно сделать вывод, что система устойчива. Запас по фазе составляет  $49,6$  градусов, запас по амплитуде более  $7$  дБ. АЧХ пересекает ось  $0$  дБ с наклоном  $-20$  дБ/дек. Это также свидетельствует о хороших динамических свойствах системы. Таким образом, рассмотренная система удовлетворяет частотным критериям качества. На рисунках 3 и 4 представлены АЧХ и ФЧХ корректирующего звена соответственно.

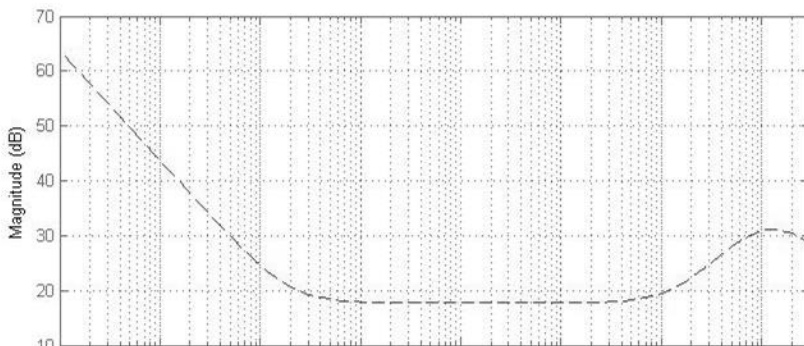


Рисунок 3 – АЧХ корректирующего звена

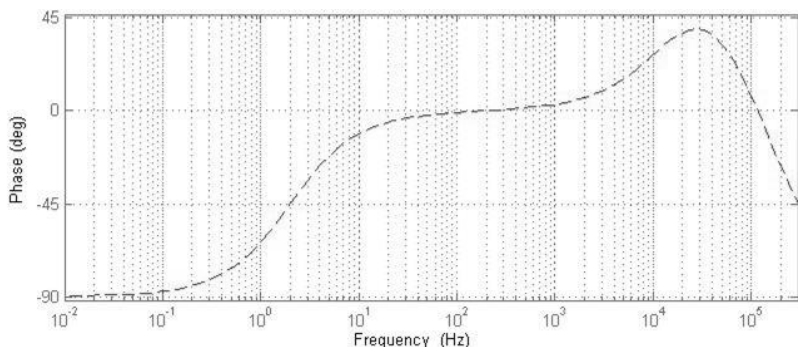


Рисунок 4 – ФЧХ корректирующего звена

Корректирующее звено можно реализовать с помощью операционного усилителя с обвязкой. На рисунке 5 представлена схема корректирующего звена в среде моделирования *MicroCap*.

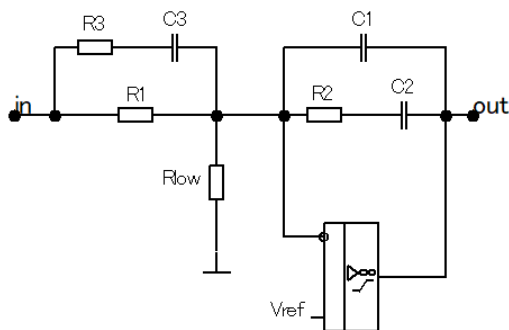


Рисунок 5 – Схема корректирующего звена в *MicroCap*

Таким образом непрерывная модель позволяет провести проверку правильности расчета номиналов компонентов силового контура преобразователя, провести синтез корректирующих звеньев, а также облегчить последующую реализацию преобразователя на макетной плате и в виде печатной платы.

### Список литературы

1. Мелешин В.И. Получение непрерывной линейной модели силовой части импульсного преобразователя как начальный этап проектирования его динамических свойств/ В. Мелешин // *Электричество*. – 2002. – № 10.
2. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 416 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

*Материал принят к публикации 09.10.21.*

УДК 621.372.8

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0dd6481.95951766

## КВАЗИАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕНКАХ ЛУНАРНОГО ВОЛНОВОДА

**Алексей Анатольевич Скворцов**

Саратовский государственный технический университет

им. Гагарина Ю. А., доцент, к.т.н., доцент

РФ, Саратов, [sotrudniki.1@yandex.ru](mailto:sotrudniki.1@yandex.ru)

*Аннотация. Получено выражение для квазианалитического расчета коэффициента затухания, обусловленного потерями в металлических стенках лунарного волновода с однородным диэлектрическим заполнением. Приводятся результаты квазианалитического расчета коэффициента затухания в металлических стенках полого лунарного волновода при различных значениях его геометрических размеров и рабочей длины волны, которые могут быть полезны при синтезе СВЧ-устройств различного назначения, выполненных на основе рассматриваемой направляющей системы.*

*Ключевые слова: квазианалитический расчет, коэффициент затухания, металлические стенки, лунарный волновод, прямоугольный волновод, критическая длина, основная волна.*

### QUASI-ANALYTICAL CALCULATION OF THE ATTENUATION COEFFICIENT IN METAL WALLS OF LUNAR WAVEGUIDE

Alexey A. Skvortsov

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,

Associate Professor, c.t.s., docent, RU, Saratov, [sotrudniki.1@yandex.ru](mailto:sotrudniki.1@yandex.ru)

*Abstract. An expression for quasi-analytical calculation of the attenuation coefficient, due to losses in metal walls of a lunar waveguide with homogeneous dielectric filling is obtained. The results of quasi-analytical calculation of the attenuation coefficient in metal walls of hollow lunar waveguide at different values of its geometrical sizes and operating wavelength, which can be useful in synthesis of microwave devices for various applications, based on the considered guide system, are represented.*

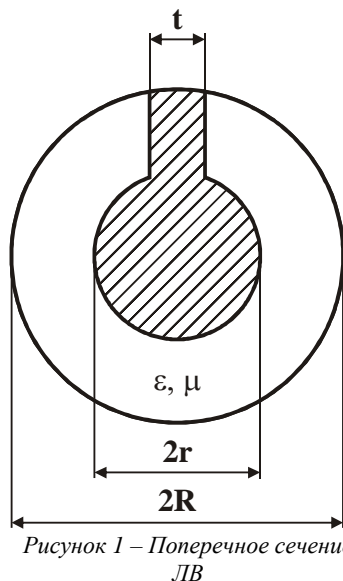
*Keywords: quasi-analytical calculation, attenuation coefficient, metal walls, lunar waveguide, rectangular waveguide, cutoff wavelength, dominant mode.*

В настоящее время лунарный волновод (ЛВ), превосходящий по ряду электродинамических параметров и характеристик линии передачи (ЛП) простых поперечных сечений, находит все большее применение в элементной базе отвечающих современным требованиям микроволновых систем различного назначения, включая СВЧ-устройства для термообработки диэлектрических материалов [1]. Поскольку базовые элементы, выполненные на основе ЛВ, функционируют, в большинстве случаев, в одноволновом режиме, важной инженерной задачей, возникающей при оценке практической пригодности применения анализируемой ЛП для синтеза тех или иных микроволновых систем, является определение коэффициента затухания основной волны в рассматриваемой направляющей системе (НС).

© Скворцов А.А., 2021

САИР и моделирование в современной электронике. С. 300 – 304.

Определение коэффициента затухания основной волны в анализируемой НС на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики затруднено в силу сложной конфигурации поперечного сечения ЛВ, поэтому для решения волнового уравнения необходимо применять численные или приближенно-аналитические (квазианалитические) методы. Применение численных подходов [1–5], к которым относятся, например, метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений, метод частичных областей, вариационный метод и некоторые другие, к расчету коэффициента затухания основной волны в ЛВ, несмотря на их универсальность, сопряжено с использованием громоздкого математического аппарата, затрудняющего



применение полученных результатов для синтеза СВЧ-устройств на основе рассматриваемой ЛП. В отличие от численных подходов методики квазианалитического расчета (КР) электродинамических параметров ЛВ обладают наглядностью, возможностью выявить общие закономерности распространения электромагнитных волн в рассматриваемой НС и относительной простотой вычислений [1, 5–10].

Проведенный анализ структуры поля основной волны, распространяющейся в ЛВ, показал, что данную ЛП можно рассматривать как прямоугольный волновод (ПрВ), свернутый в поперечной плоскости по дуге окружности [5–10]. Поэтому КР коэффициента затухания основной волны в ЛВ можно провести, исходя из его замены на эквивалентный ПрВ, у которого размер широкой стенки равен  $\pi(R+r)-t$ , а узкой –  $R-r$ , с использованием соотношений, приведенных в работе [2].

В случае, когда ЛВ заполнен диэлектрическим материалом с пренебрежимо малыми потерями, рассеивание электромагнитной энергии при распространении основной волны в рассматриваемой ЛП обусловлено в основном коэффициентом затухания в ее металлических стенках, который можно определить по формуле

$$\alpha_m = \frac{R_s}{Z_c(R-r)\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{cl})^2}} \left[ 1 + \frac{2(R-r)}{\pi(R+r)-t} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cl}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

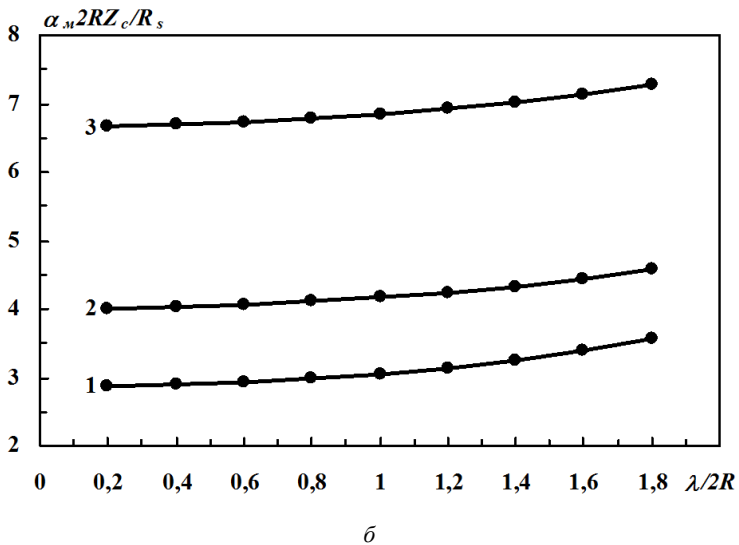
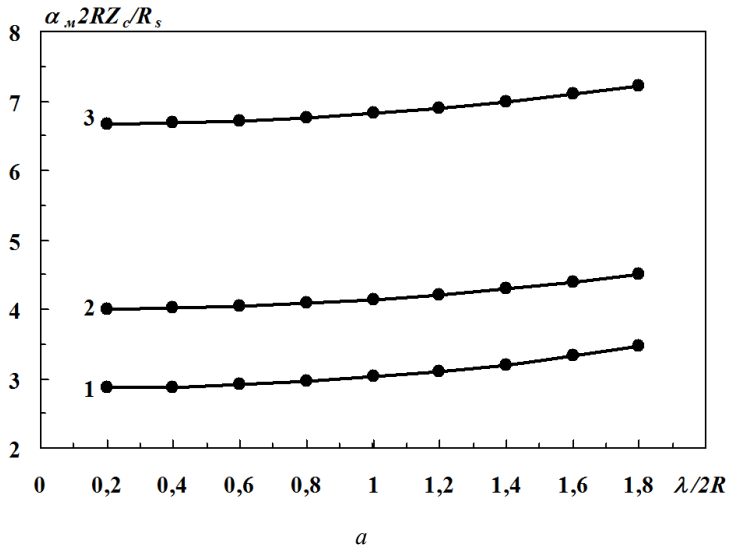


Рисунок 2 – Зависимость нормированного коэффициента затухания в металлических стенках ЛВ от  $\lambda/2R$  при  $t/2R=0,1$  (а) и  $t/2R=0,2$  (б) и различных  $r/R$ : 1 –  $r/R=0,3$ ; 2 –  $r/R=0,5$ ;  $r/R=0,7$

в которой

$$\lambda_{c1} = 2[\pi(R+r) - t] \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2)$$

– критическая длина основной волны, анализируемой НС с однородным диэлектрическим заполнением [5, 7];

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi j \mu_m \mu_0}{\sigma_m}}, \quad (3)$$

$\mu_m$  и  $\sigma_m$  – поверхностное активное сопротивление, относительная магнитная проницаемость и проводимость металлических стенок ЛВ;

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (4)$$

$\varepsilon$  и  $\mu$  – характеристическое сопротивление, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего рассматриваемую волноведущую структуру;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (5)$$

– характеристическое сопротивление воздушного заполнения;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные.

Из выражений (1)–(5) следует, что коэффициент затухания в металлических стенках ЛВ зависят не только от размеров поперечного сечения и электрофизических свойств диэлектрического заполнения и проводящих поверхностей рассматриваемой НС, но и от рабочей длины волны.

На основе рассмотренных выше соотношений проведен КР коэффициента затухания в металлических стенках ЛВ при различных значениях его геометрических размеров, электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны. В качестве примера, дающего наглядное представление о характере рассеивания электромагнитной энергии основной волны в проводящих поверхностях ЛВ ( $\varepsilon = \mu = 1$ ), на рис. 2 представлены результаты КР нормированного коэффициента затухания в металлических стенках рассматриваемой НС, полученные по формулам (1)–(5) при различных значениях  $t/2R$ ,  $r/R$  и  $\lambda/2R$ . Из рис. 2 следует, что с увеличением отношений  $r/R$  и  $\lambda/2R$  при  $t/2R = \text{const}$  возрастает затухание основной волны в металлических стенках ЛВ.



Проведенные на основе полученных в настоящей работе квазианалитических выражений исследования, позволили установить в явном виде зависимость коэффициента затухания в металлических стенках ЛВ от его геометрических размеров, электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны и могут быть использованы при синтезе СВЧ-устройств различного назначения на основе анализируемой НС. Необходимо также заметить, что рассмотренная в настоящей работе квазианалитическая методика может быть в дальнейшем с успехом адаптирована для расчета коэффициента затухания в металлических стенках ЛВ с неоднородным диэлектрическим заполнением.

#### Список литературы

1. *Коломейцев В. А., Комаров В. В.* Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч.1. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. 160 с.
2. *Григорьев А. Д.* Электродинамика и микроволновая техника. СПб: Лань, 2007. 704 с.
3. Расчет характеристик линий передачи / *В. Б. Каток, В. И. Лозяной, А. Б. Олексенко и др.* Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1985. 100 с.
4. Волноводы сложных сечений / *Г. Ф. Заргано, В. П. Ляпин, В. С. Михалевский и др.* М.: Радио и связь. 1986. 124 с.
5. *Вольман В. И., Каток В. Б.* Волноводы, обладающие широкой полосой одноволнового режима // Радиотехника и электроника. 1978. № 2. С. 285–290.
6. *Скворцов А. А.* О методике квазианалитического расчета критической длины первой высшей волны лунарного волновода // Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения: материалы IV Всероссийского семинара памяти профессора Ю. П. Волкова. Саратов: Саратовский источник, 2018. С. 80–83.
7. *Скворцов А. А.* К определению критических длин основной и первой высшей волн лунарного волновода // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы VI Междунар. научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2019. С. 155–156.
8. *Скворцов А. А.* Квазианалитическая оценка коэффициента широкополосности лунарного волновода // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы VII Междунар. научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2021. С. 89–91.
9. *Скворцов А. А.* Квазианалитические выражения для определения волнового сопротивления лунарного волновода с однородным диэлектрическим заполнением // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3. С. 86–89.
10. *Скворцов А. А.* Квазианалитическая оценка предельной мощности, передаваемой по лунарному волноводу // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. IV Международной научно-практической конференции. Брянск: БГТУ, 2020. С. 416–419.

*Материал принят к публикации 11.10.21.*

УДК 621.3.072

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f0ed61e6.37817334

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДОВ С ДВУМЯ ТОКОВЫМИ КЛЮЧАМИ

**Александр Иванович Сурайкин**, доцент, к.т.н., suraykin@mail.ru

**Максим Сергеевич Лабутин**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника», labutin99-m@mail.ru

**Андрей Дмитриевич Кудряшов**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника», and\_kud@mail.ru

**Алексей Александрович Сурайкин**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника»  
mister.suraykin@mail.ru

НИ МГУ им. Н. П. Огарёва, кафедра электроники и наноэлектроники  
Россия, Саранск

*Аннотация. Приводятся результаты разработки импульсного источника питания светодиодов с применением токовых ключей. Предлагается схемотехническое решение на основе ШИМ-контроллера с двумя внешними транзисторными ключами. Представлены результаты компьютерного имитационного моделирования источника питания в САПР TINA-TI на основе разработанной макромодели микросхемы ШИМ-контроллера.*

*Ключевые слова: импульсный источник питания, токовый ключ, широтно-импульсная модуляция, имитационное моделирование, макромодель.*

### COMPUTER SIMULATION OF POWER SUPPLY FOR LIGHT EMITTING DIODES WITH TWO CURRENT'S SOURCES

Alexander Iv. Suraykin, assistant professor, candidate of technical sciences, suraykin@mail.ru

Maxim S. Labutin, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, labutin99-m@mail.ru

Andrey Dm. Kudryashov, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, and\_kud@mail.ru

Alexey Al. Suraykin, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, mister.suraykin@mail.ru

National Research Mordovia State University, Department of Electronics and Nanoelectronics  
Russia, Saransk City

*Abstract. The article provides results of engineering design of switching power supply for light-emitting diodes with application current's sources. Propose a schematic design on base PWM-controller with two transistor keys. Represented results of computer imitation design of power supply at CAD TINA-TI on base of engineering design spice macros IC of PWM-controller.*

*Keywords: switching power supply, current key, pulse width modulation, imitation simulation, spice macros.*

При разработке источников (ИП) для светодиодного освещения, необходимо учитывать определённую специфику. Кроме, собственно импульсного режима работы ИП, необходимо учитывать особенности сферы их применения. [1].

Имеется ряд критериев, необходимых почти во всех применениях:

- невысокая стоимость источника питания при серийном производстве;
- высокая электрическая эффективность (потери в драйвере приведут к увеличению размеров устройства и снизят экономичность светильника);
- надёжность (в большинстве случаев светодиодная техника позиционируется как необслуживаемая);
- корректор коэффициента мощности (ККМ) (в соответствии с действующими стандартами).

Классические или традиционные импульсные ИП работающие по push-pull алгоритму имеют ряд недостатков: большие динамические потери на высоких частотах работы, и как следствие, необходимость наличия больших радиаторов для охлаждения силовых транзисторов, большие габариты, сравнительно малый КПД [2].

Силовые транзисторы в подобных ИП работают в режиме жесткого переключения, при этом из-за наличия паразитных емкостей, вызывающих инерционность в работе, происходит накопление заряда, и фаза тока начинает сдвигаться относительно фазы напряжения. Транзисторы начинают разогреваться с появлением ряда существенных недостатков.

Одним из способов избежать этого, является применение не нового, но перспективного решения – резонансного алгоритма работы, и построенные на его основе резонансные и квазирезонансные импульсные преобразователи. Главное их преимущество – это «мягкое» переключение силовых транзисторов [3]. При всех достоинствах вышеприведённой схемы, следует отметить её некоторые недостатки:

- применение двух трансформаторов;
- сложность и трудоёмкость настройки.

В процессе исследования различных вариантов схем импульсных ИП на основе микросхемы TPS92020, было установлено, что микросхема TPS92020 позволяет реализовывать более простые схемы импульсных ИП [4]. Без применения трансформаторов с двумя источниками тока.

Поскольку такое схемотехническое решение и, соответственно, информация по применению микросхемы TPS92020 не представлены в технической информации компании Texas Instruments, необходимо проведение специального расчёта с применением компьютерного имитационного моделирования ИП на основе макромоделей микросхемы TPS92020. Однако на сайте производителя (Texas Instruments) отсутствует какая-либо информация по SPICE-макромоделям микросхемы TPS92020.

В связи с вышесказанным была выполнена разработка SPICE-макромоделей микросхемы TPS92020 для применения в составе САПР TINA-TI [5]. Применение указанной САПР связано тем, что это свободно

распространяемая некоммерческая САПР с хорошо отлаженными вычислительными алгоритмами для импульсных устройств. Разработка SPICE-макромодели микросхемы TPS92020 выполнена на основе блочно-иерархического принципа. Структурная схема разработанной SPICE-макромодели (2-й уровень иерархии) микросхемы TPS92020 приведена на рисунке 1.

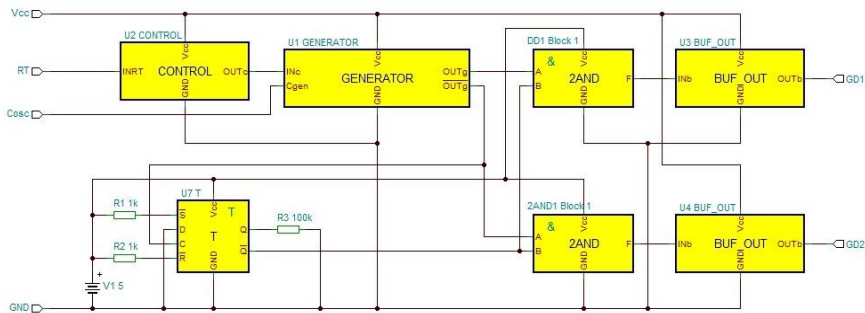


Рисунок 1 – Структурная схема SPICE-макромодели (2-й уровень иерархии) микросхемы TPS92020

Макромодель микросхемы TPS92020 представляет собой функциональную схему, содержащую три уровня иерархии:

- первый уровень – уровень элементов, на которых выполнены принципиальные электрические схемы функциональных узлов;
- второй уровень – функциональный уровень, представляющий собой фактически функциональную схему микросхемы TPS92020;
- третий уровень – уровень микросхемы как устройства («чёрного ящика») на котором можно выполнять схемы различных источников питания.

На рисунке 2 приведена имитационная модель импульсного ИП с источниками тока на основе SPICE-макромодели микросхемы TPS92020 для анализа в САПР TINA-TI. Эта модель позволяет проводить анализ и расчёт основных режимов работы импульсного ИП с применением навесных компонентов из состава встроенных библиотек САПР TINA-TI.

На рисунке 3 приведены временные диаграммы перехода источника питания на стационарный режим. Сигналы получены в разных точках, в соответствии со схемой, приведённой на рисунке 2.

Измерители тока AM1, AM2 показывают токи светодиодов с выходом на стационарный режим.

В точках VF1, VF2 (стоковые контакты транзисторов T1, T2) показаны импульсные противофазные рабочие сигналы источников тока (транзисторы T1, T2).

На основании SPICE-макромодели микросхемы TPS92020, приведённой на рисунках 1 и 2 можно проводить разработку (расчёт) различных вариантов схем ИП с источниками тока без гальванической развязки.

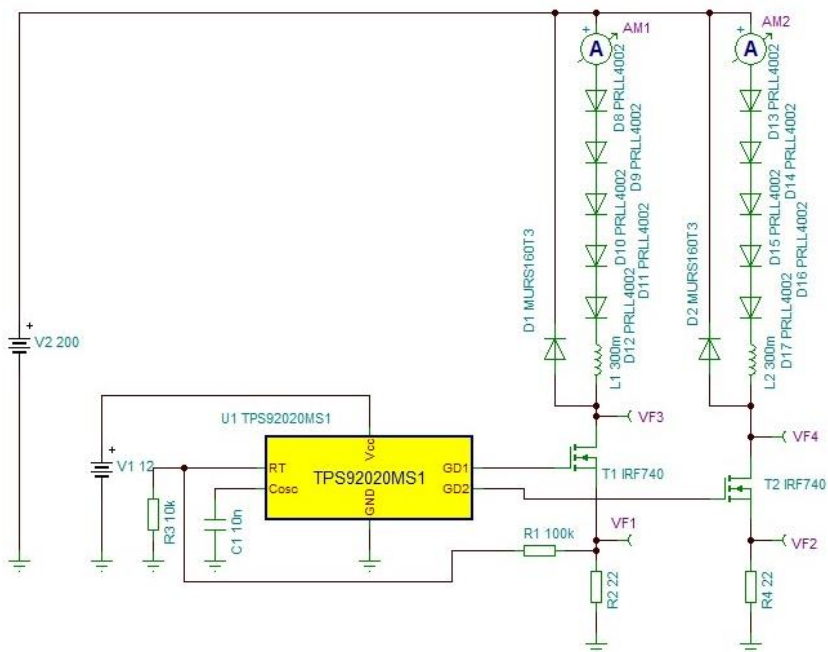


Рисунок 2 – Имитационная модель импульсного ИП с источниками тока на основе макромодели микросхемы TPS92020

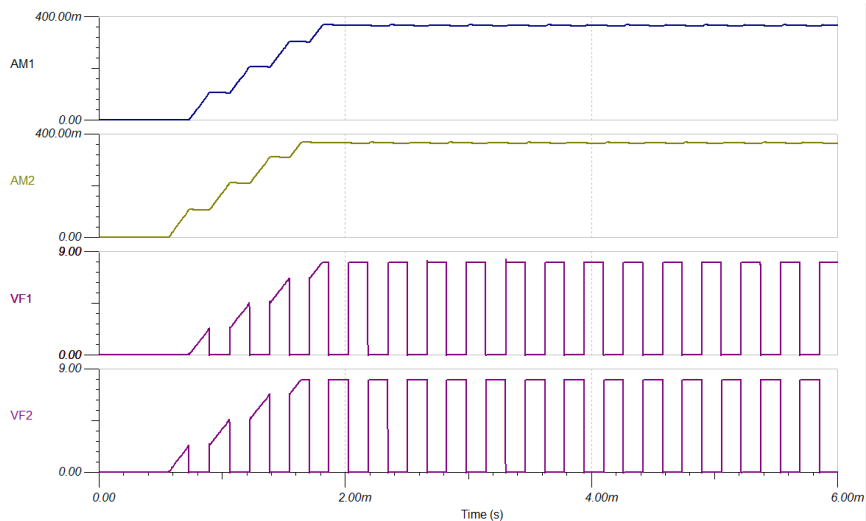


Рисунок 3 – Временные диаграммы работы импульсного ИП; AM1, AM2 – токи светодиода; VF1, VF2 – сигналы на стоковых контактах транзисторов T1, T2 (источников тока)

### Список литературы

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. Под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
2. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z: Пер. с англ. – К.: «МК-Пресс», СПб: «КОРОНА-ВЕК», 2008. – 256 с.
3. Техническая инф. по ИС TPS92020. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.ti.com/TPS92020](http://www.ti.com/TPS92020).
4. Сурайкин А. И., Курынов Б. В., Сеськин М. В., Сурайкин А. А. Высокоэффективные источники питания для светодиодного освещения // Электроника и электрооборудования транспорта, 2020. № 3. С.25-28.
5. Техническая инф. по САПР TINA-TI. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.ti.com/tool/TINA-TI](http://www.ti.com/tool/TINA-TI).

*Материал принят к публикации 06.10.21.*

УДК 621.3.072

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f1072a27.62012416

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДАМИ

**Александр Иванович Сурайкин**, доцент, к.т.н., [suraykin@mail.ru](mailto:suraykin@mail.ru)

**Андрей Дмитриевич Кудряшов**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника», [and\\_kud@mail.ru](mailto:and_kud@mail.ru)

**Максим Сергеевич Лабутин**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника», [labutin99-m@mail.ru](mailto:labutin99-m@mail.ru)

**Алексей Александрович Сурайкин**, магистрант первого года обучения направления подготовки «Электроника и наноэлектроника»  
[mister.suraykin@mail.ru](mailto:mister.suraykin@mail.ru)

НИ МГУ им. Н. П. Огарёва, кафедра электроники и наноэлектроники  
Россия, Саранск

*Аннотация. Приведены результаты компьютерного моделирования импульсного источника питания повышенной мощности на основе разработанной имитационной модели микросхемы ШИМ-контроллера в составе светодиодных светильников. Представлены результаты компьютерного моделирования в САПР TINA-TI.*

*Ключевые слова: имитационная модель, импульсный источник питания, ШИМ-контроллер, временные диаграммы.*

### SIMULATION OF SWITCHING SUPPLY POWER OF INCREASED POWER FOR LIGHT EMITTING DIODES CONTROL

Alexander Iv. Suraykin, assistant professor, candidate of technical sciences, [suraykin@mail.ru](mailto:suraykin@mail.ru)

Andrey Dm. Kudryashov, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, [and\\_kud@mail.ru](mailto:and_kud@mail.ru)

Maxim S. Labutin, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, labutin99-m@mail.ru

Alexey Al. Suraykin, undergraduate of first year studies «Electronic and nanoelectronic» direction of training, mister.suraykin@mail.ru

National Research Mordovia State University, Department of Electronics and Nanoelectronics, Russia, Saransk City

*Abstract. The article provides results of computer simulation of switching power supply of increased power on base designed of imitation block-diagram of IC PWM-controller for light emitting diodes. Represented results of computer design at CAD TINA-TI.*

*Keywords: imitation block-diagram, switching power supply, PWM-controller, time-diagram.*

В настоящее время большой номенклатурный диапазон начинают занимать мощные светодиодные светильники, предназначенные как для бытового применения, так и уличного освещения - например, подъезды домов, пешеходные дорожки, парковые зоны и т. п. Это требует создания всё более разнообразных источников питания с различными функциями для практически всех сфер применения: коммерческое, частный сектор, уличное и инфраструктурное.

В этой связи, одним из главных этапов разработки источника питания является его компьютерное моделирование в SPICE-симуляторе. Проведение имитационного моделирования позволяет сократить сроки разработки и заметно снизить вероятность возникновения ошибки.

Для решения задачи разработки светильника повышенной мощности, необходимо устройство питания или просто – источник питания (ИП с возможностью установки удвоенного значения тока светодиодов – 700 мА [1].

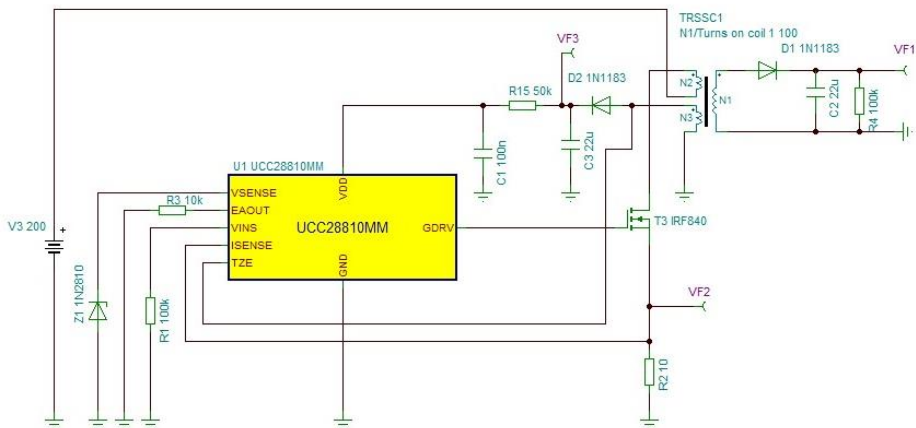
Предлагаемый источник питания представляет собой обратноходовой преобразователь с обратной связью по току. Для построения данного источника питания была выбрана микросхема ШИМ-контроллера UCC28810D от фирмы-производителя Texas Instruments (США). Её основные характеристики можно найти на сайте производителя [2].

Основной трудностью при расчёте основных параметров ИП являлось то, что невозможно было провести компьютерное имитационное моделирование ИП в САПР, так как производитель микросхемы UCC28810D не представил её SPICE-макромодель. Поэтому первой и, наверно, главной задачей настоящей работы - было создание её макромодели – SPICE-модели с применением блочно-иерархического принципа. Разработка макромодели микросхемы UCC28810D была проведена в САПР TINA-TI, являющейся продуктом компании Texas Instruments [3]. Применение данной САПР обусловлено тем, что это свободно распространяемая некоммерческая САПР, а также тем, что многие вычислительные алгоритмы для импульсных устройств в этой среде хорошо отлажены

Макромодель микросхемы UCC28810D представляет собой функциональную схему, содержащую три уровня иерархии:

- первый уровень – уровень элементов, на которых выполнены принципиальные электрические схемы функциональных узлов;

- второй уровень – функциональный уровень, представляющий собой фактически функциональную схему микросхемы UCC28810D;
- третий уровень – уровень микросхемы как устройства («чёрного ящика») на котором можно строить схемы различных источников питания.



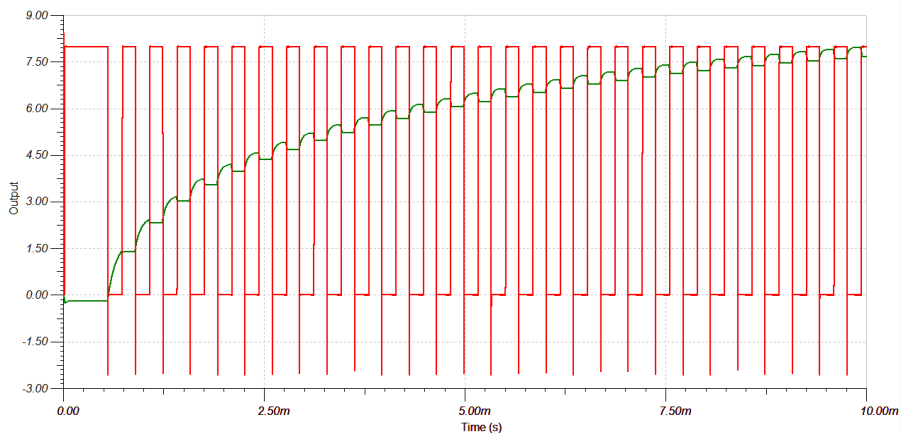
*Рисунок 1 – Имитационная модель импульсного источника питания на основе макромодели микросхемы UCC28810D*

На рисунке 1 приведена имитационная модель импульсного источника питания на основе SPICE-макромодели микросхемы UCC28810D для анализа в САПР TINA-TI.

Имитационное моделирование разрабатываемого импульсного источника питания позволяет строить временные диаграммы в различных временных интервалах обеспечивая, тем самым, как анализ начального режима работы (инициализация), так и установившейся (стационарный) режим работы в заданных временных интервалах, то есть проводить оценку режима стабилизации рабочего тока светодиодов [5].

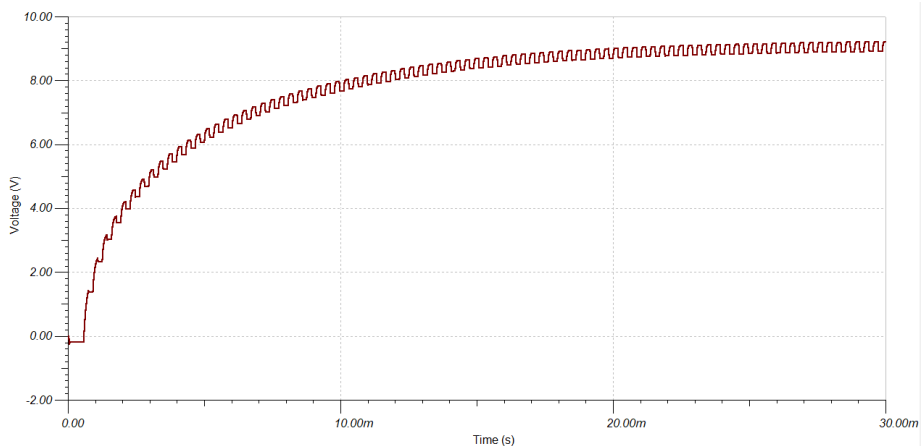
На рисунке 2 приведены временные диаграммы перехода источника питания на стационарный режим.





*Рисунок 2 – Временные диаграммы напряжения на датчике тока (непрерывный импульсный сигнал на резисторе R2) и напряжения на вторичной обмотке трансформатора (экспоненциально нарастающий сигнал на резисторе R4)*

На рисунке 3 приведена временная диаграмма установки напряжения на дополнительной обмотке (обмотке обратной связи) трансформатора, которое служит питающим напряжением микросхемы UCC28810D.



*Рисунок 3 – Временная диаграмма напряжения на обмотке обратной связи трансформатора*

Проведённый анализ полученных результатов моделирования позволил в первом приближении провести расчёт алгоритма работы источника питания и

определить основные требования к навесным компонентам микросхемы, включая трансформатор.

В качестве основных технических данных для ИП можно привести следующие:

- 1 Диапазон напряжения питания: 90 – 250 В (переменное);
- 2 Число последовательно включенных светодиодов: 24;
- 3 Число параллельных светодиодных цепей: 3;
- 4 Прямое падение напряжения на одном светодиоде: 3,5 В;
- 5 Полное падение напряжения на светодиодах:

$$U_{LED}=24 \times 3,5=54 \text{ В.}$$

Применяя SPICE-макромодель микросхемы UCC28810D, приведённой на рисунке 1 можно проводить разработку (расчёт) различных вариантов схем ИП повышенной мощности с перспективой сборки макетных образцов печатных плат импульсных ИП. Форму и размеры печатных плат целесообразно выбирать исходя из размеров корпуса предполагаемого светодиодного светильника. Для светодиодов необходимо изготовить отдельные печатные платы с учётом их габаритов и размеров теплоотвода.

#### Список литературы

1. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Пер. с англ. Под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
2. Техническая инф. по ИС UCC28810D. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.ti.com/UCC28810D](http://www.ti.com/UCC28810D).
3. Техническая инф. по САПР TINA-TI. Электронный ресурс. Режим доступа: [www.ti.com/tool/TINA-TI](http://www.ti.com/tool/TINA-TI).
4. *Сурайкин А. И., Курынов Б. В., Сеськин М. В., Сурайкин А. А.* Высокоэффективные источники питания для светодиодного освещения // *Электроника и электрооборудования транспорта*, 2020. № 3. С.25-28.
5. *Маниктала С.* Импульсные источники питания от А до Z: Пер. с англ. – К.: «МК-Пресс», СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2008. – 256 с.

*Материал принят к публикации 06.10.21.*

УДК: 621.25

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f114de31.75977654

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН С ЗЕРНОМ

**Хулкар Асадуллаевна Усманова**, доцент кафедры “Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация”

[hulkar-usmanova@rambler.ru](mailto:hulkar-usmanova@rambler.ru)

**Асадулла Тургунбаев**, профессор кафедры “Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация”, [tstuasd@rambler.ru](mailto:tstuasd@rambler.ru)

Ташкентский Государственный Технический Университет  
Узбекистан, Ташкент

*Аннотация. В работе рассмотрены вопросы взаимодействия сверхвысококачественных волн с влажным зерном, в котором информация о влажности представляется как функция двух переменных: ослаблением и фазовым сдвигом электромагнитной волны. Влажный материал представлен состоящим из трех плоских слоев: воды, сухого вещества и воздуха. На основе несложных расчетов выведена функция преобразования, изучены влияние форм связи влаги, температуры и плотности на погрешность преобразования влажности.*

*Ключевые слова: влажность зерна, сверхвысококачественный метод, ослабление и фазовый сдвиг электромагнитной волны, влажный материал, форма связи влаги, погрешность преобразования, плотность материала.*

### STUDY OF INTERACTION OF SUPER HIGH FREQUENCY WAVES WITH GRAIN

Khulkar As. Usmanova, associate professor of the department "Metrology, technical regulation, standardization and certification", [hulkar-usmanova@rambler.ru](mailto:hulkar-usmanova@rambler.ru)

Turgunbaev Asadulla, professor of the department “Metrology, technical regulation, standardization and certification”, [tstuasd@rambler.ru](mailto:tstuasd@rambler.ru)

Tashkent State Technical University, Uzbekistan, Tashkent

*Abstract. The paper considers the interaction of ultrahigh-frequency waves with moist grains, in which the moisture information is represented as a function of two variables: the attenuation and phase shift of the electromagnetic wave. Wet material is represented as consisting of three flat layers: water, dry matter and air. Based on uncomplicated calculations, the conversion functions are derived and the influence of moisture, temperature and density coupling forms on the error of moisture conversion is studied.*

*Keywords: grain moisture, ultrahigh-frequency method, electromagnetic wave attenuation and phase shift, wet material, moisture coupling form, conversion error, material density.*

Влажность зерна при хранении и обработке постоянно изменяется, поэтому ее следует контролировать для принятия своевременных и надлежащих мер по предотвращению неблагоприятных явлений.

Известно, что одним из перспективных методов измерений влажности является сверхвысококачественный (СВЧ) метод [1-3]. Преимуществами СВЧ-

влагометрии являются: возможность бесконтактного измерения, относительная простота и дешевизна аппаратуры, а в ряде случаев и хорошие метрологические характеристики. Контроль влажности методом сверхвысокой частоты предусматривает воздействие на контролируемый материал переменной электромагнитной волны, в котором информация о влажности представляется как функция двух переменных (ослаблением  $N$  и фазовым сдвигом  $\varphi$  электромагнитной волны). Различие высокочастотных и СВЧ-методов вызвано как соизмеримостью длины волны с минимальными характеристическими размерами объекта, так и особенностью поведения связанной воды в гигагерцевом диапазоне.

*Вывод функции преобразования измерения влажности.* В соответствии с теорией диэлектриков [4] исследуемые материалы, находящиеся в электромагнитном поле, не обнаруживают в обезвоженном состоянии частотных и температурных аномалий. Поэтому все зависимости, которые наблюдаются во влажном состоянии при взаимодействии электромагнитного поля присущи воде, т.к. вода составляет основную часть влажного материала. При этом, электромагнитное поле, взаимодействуя с молекулами воды, содержащейся в материале, изменяет свои электрические характеристики. Это изменение, характеризующее влажность, лежит в основе всех разрабатываемых методов и приборов измерения на СВЧ.

При исследовании физических свойств материалов чаще всего приходится сталкиваться с гетерогенными средами зерна, состоящими из сухой фазы (эндоспермы и оболочки), воды и воздуха, а также из различных примесей. Влажный материал представляем состоящим из трех плоских слоев: воды, сухого вещества и воздуха. Обозначим объем воды через  $V_w$ , сухой фазы материала - через  $V_s$ . Тогда объем воздуха в порах материала будет  $V_n = 1 - V_w - V_s$ . Учитывая, что плотность воды равна единице, получаем  $V_w = Q$ , где  $Q$  - объемная влажность, после несложных расчетов для функции влажности нами получена следующая формула:

$$W = \frac{1}{1 - \frac{\rho'_{CH}}{\beta_c} \left[ \beta_w - (\beta - \beta_0 V_0) \frac{\alpha_w}{\alpha} \right]}$$

*Влияние форм связи влаги в материале на погрешность преобразования влажности.* Вода содержится в материалах как в свободном, так и в связанном состояниях. Формы связи влаги с материалом могут быть различными: физико-механическая (капиллярная), адсорбционная (мономолекулярная и полимолекулярная), химическая [5]. Каждой форме связи соответствует своя определенная энергия связи влаги с материалом. Наименьшую энергию связи имеет свободная вода, наибольшую - химически связанная.

Влага в материале с различным значением энергии связи по - разному влияет на информативный параметр при измерении влажности диэлькометрическими методами.

В настоящее время нет экспрессных методов определения количества влаги по формам связи и эффективных путей уменьшения влияния непостоянства соотношения связанной и свободной воды в материале на погрешность измерения его влажности. Для решения этой задачи нами предложено использовать соотношение между интегральной (объемной) и поверхностной влажностью материала и алгоритмический метод снижения указанной погрешности на основе использования дисперсии результатов многократных измерений.

*Влияние температуры влажных материалов на погрешность преобразования.* Температурная погрешность преобразования СВЧ - влагомера обусловлена изменением диэлектрических свойств воды с колебаниями температуры, что приводит к изменению дисперсии молекул воды в СВЧ диапазоне.

Изменение  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  воды в конденсированной фазе от температуры хорошо изучено [6] практически для всего СВЧ диапазона. С ростом температуры действительная часть диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  монотонно убывает в низкочастотной области СВЧ диапазона, затем проходит через широкий максимум и монотонно возрастает в высокочастотной области диапазона. Характер изменения мнимой части  $\epsilon''$  аналогичный.

Для наиболее распространенного трехсантиметрового диапазона зависимость ослабления в воде от температуры выражается формулой

$$N(t) = 3814,25e^{-0,0235(t-42,99)^2}$$

Изменение температуры приводит также к изменениям форм связи влаги в материале. В настоящее время учесть аналитически степень влияния температуры влажного материала на параметры СВЧ волны не представляется возможным. Поэтому учет этого влияния возможен на основе экспериментальных зависимостей:

$$N=f_1(T,W), \varphi=f_2(T,W) \text{ и } \omega=f_3(T,W).$$

*Влияние плотности влажных материалов на погрешность преобразования.* Различное уплотненное состояние влажных материалов вызывает дополнительные погрешности. Другая причина возникновения погрешностей - разное количество воды в единице объема контролируемого материала. Эта составляющая погрешности не может быть определена аналитически.

Величина измеряемого параметра СВЧ волны зависит от влажности, толщины и плотности материала:

$$J = K W \rho d ,$$

где  $J$  - измеряемый параметр;  $\rho$  - плотность материала;  $K$ -коэффициент пропорциональности;  $d$  - толщина материала. Для аналитического определения необходимо знать величину  $K$ . Однако она может быть определена только экспериментальным путем для конкретного вида материала.

Таким образом, для определения ограничений на изменение температуры, плотности, либо для выработки конструктивных рекомендации по снижению их влияния необходимы экспериментальные исследования в каждом конкретном случае.

### Список литературы

1. Исмагуллаев П.Р., Усманова Х.А., Тургунбаев А. Влагометрия хлопка и хлопковых материалов (Монография). «Fan va texnologiya». – Ташкент, 2017. – 288 с.
2. Ismatullaev P. R., Usmanova H.A., Kalandarov P.I. Microwave moisture metering and problems of metrological softwa. Sixrth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, b-Quadrat Verlag, 2010. PP. 191-195.
3. Тургунбаев А. Экспериментальное исследование электрофизических характеристик зерна. МНТ симпозиум «Образование через науку», г. Калуга. Россия. 2005.
4. Usmanova H.A., Turgunbayev A. Methods of Reducing the Influence of theForms of Communication Moisture to Error Converter. //International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 10, October 2015. India. P. 964-969.
5. Усманова Х.А., Тургунбаев А., Исмагуллаев П.Р. Исследование строения и состава хлопковых материалов, как объект измерения влажности. // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2014. №1. С. 124-128.
6. Ismatullaev P.R., Usmanova H.A., Turgunbayev A. Ultrahigh-frequency transducers moisture without weighing the sample. World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, b-Quadrat Verlag, 2012. PP.175-178.

*Материал принят к публикации 22.10.21.*

## ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MULTISIM

**Александр Александрович Штин**

Ижевский государственный технический университет

имени М.Т. Калашникова, доцент, к.т.н., Россия, Ижевск, shtin\_a\_a@mail.ru

*Аннотация. В докладе рассмотрены особенности программной среды Multisim, которые могут затруднять процесс обучения.*

*Ключевые слова: обучение, моделирование, Multisim.*

### FEATURES OF TEACHING STUDENTS IN THE MULTISIM MODELING ENVIRONMENT

Alex A. Shtin

ISTU, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Russia, Izhevsk, shtin\_a\_a@mail.ru

*Abstract. The report discusses the features of the Multisim software environment that can complicate the learning process.*

*Keywords: training, modeling, Multisim.*

Программная среда Multisim [1] может эффективно использоваться не только для решения технических задач, но и в учебном процессе. На кафедре «Электротехника» ИжГТУ Multisim применяется в лабораторном практикуме по ряду дисциплин [2]. Накопленный при этом опыт позволил сформулировать ряд особенностей, знание которых облегчает процесс обучения.

Особенности работы с Multisim по мнению автора можно сформулировать следующим образом.

1. Некорректная работа самой программы.
2. Объективные особенности программы.
3. Типовые ошибки, обычно совершаемые студентами.

### **Некорректная работа программы**

SPICE-модели для некоторых элементов отсутствуют. Особенно это относится к симисторам (в терминах Multisim TRIAC). Справедливости ради надо заметить, что такие элементы имеют зеленый цвет. Непонятно, зачем нужно было вставлять их в базу данных.

Схемы с некоторыми элементами не работают, несмотря на наличие SPICE-моделей (кварцевые резонаторы, тиристоры и симисторы). Особый интерес вызывает самая обычная кнопка с четырьмя контактами (элемент PB\_SPDT). Если не соединить неиспользуемые контакты с общей шиной, что на практике встречается достаточно часто, выдается сообщение об ошибке.

Наконец, некоторые схемы, составленные из абсолютно работоспособных элементов, при моделировании демонстрируют абсолютно нереальные результаты. В качестве примера приведем трехфазную цепь,

соответствующую соединению потребителя звездой, которая показана на рис. 1.

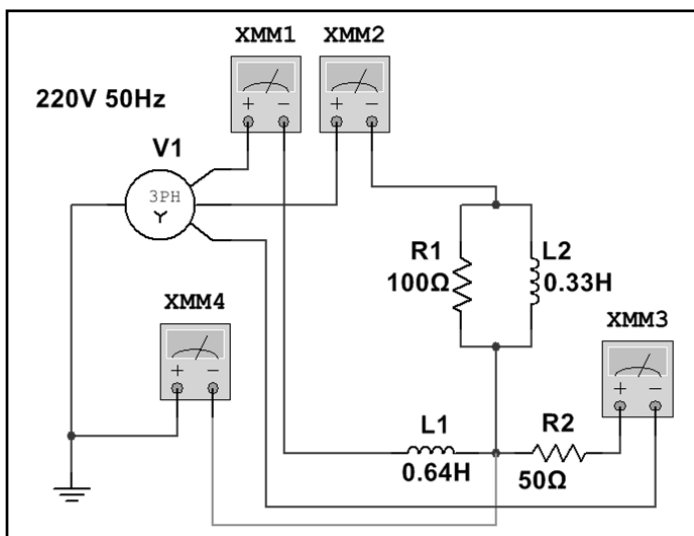


Рисунок 1 – Схема трехфазной цепи

На рис. 2 показаны показания приборов XMM1-XMM4, измеряющих ток в нулевом и линейных проводах.

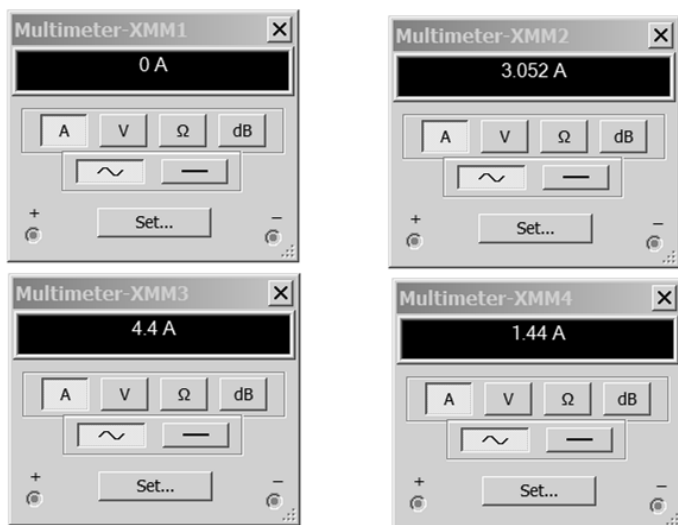


Рисунок 2 – Показания приборов в трехфазной цепи



Почему сила тока в индуктивности  $L1$  равна нулю для автора так и осталось загадкой. В то же время другие трехфазные цепи моделируются вполне корректно, даже имитируется перегорание ламп накаливания [2].

### **Объективные особенности программы**

Модели многих приборов не отражают параметры входного импеданса и вообще процесс передачи измеряемого сигнала. Так, например, осциллограф, анализатор спектра и другие приборы можно подключать к измерительной цепи одним проводником, что студентам, например, не очень понятно. Второй вывод у приборов присутствует, но, если его не подключать, программа предполагает, что он соединен с общей шиной.

Моделирование переходных процессов также может вызывать сообщение об ошибке. Связано это с тем, сила тока через емкостной элемент и напряжение на индуктивном элементе могут достигать бесконечно больших значений. Устранение этого явления сводится к введению дополнительных активных сопротивлений, практически не влияющих на общий характер переходного процесса.

Укажем также на некоторые особенности виртуальных приборов. Например в измерителе вольтамперных характеристик (IV analyzer) при выходе из режима моделирования сбрасываются ранее установленные параметры, что неудобно.

Анализатор спектра (Spectrum analyzer) практически всегда требует предварительной настройки. Во-первых, без правильного выбора режима работы процесс моделирования может очень сильно замедляться. Во-вторых, после выключения режима моделирования при неправильной работе анализатора требуемое значение параметра Resolution freq может быть недоступным. В этом случае нужно удалить прибор и снова его установить в схему.

Автор считает целесообразным привести последовательность настройки анализатора спектра:

- установить значение Start (обычно равно нулю);
- установить значение End (зависит от частоты сигнала);
- нажать виртуальную кнопку Enter на панели анализатора;
- установить значение Resolution freq (обычно 0,1 от частоты первой гармоники);
- щелкнуть мышью по пустому месту рабочего поля.

В большинстве случаев после этих процедур анализатор работает нормально.

В заключение отметим, что режим, который устанавливается после инсталляции Multisim, по мнению автора не является оптимальным. Площадь рабочего поля во многих случаях недостаточна. Нужно выбрать последовательно пункты меню Options – Sheet properties – Workspace – Sheet size – A3.

Сетка убирается выбором пунктов меню Options – Sheet properties. Далее нужно убрать пункт Show grid.

Кроме того, если выбрать стандарт IEC 60617, то изображения резисторов будут соответствовать отечественному стандарту (Options – Global options – Components).

### Типовые ошибки, обычно совершаемые студентами

Неправильное включение источников питания очень часто происходит при моделировании операционных усилителей, как на рис. 3.

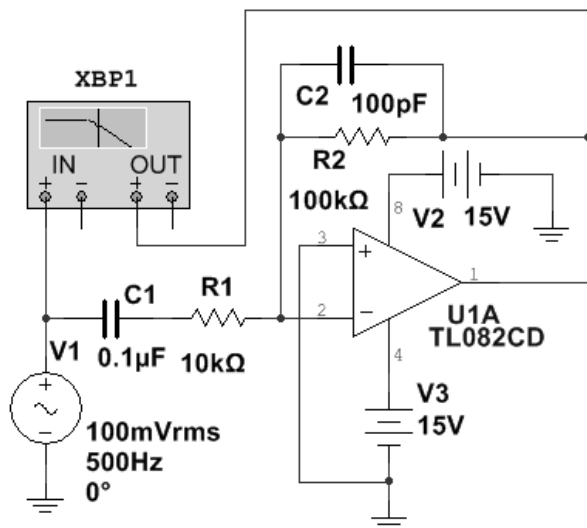


Рисунок 3 – Неправильное включение источников питания

На рис. 3 источники подключены к операционному усилителю однополярным способом, что не всегда сразу заметно преподавателю.

Также часто в месте пересечения проводников с электрическим соединением студенты не ставят точку (узел), вследствие чего схема не работает.

Наконец, вместо резисторов с ненормируемой мощностью рассеяния, ставятся маломощные резисторы, и Multisim достаточно эффектно отражает их выход из строя. Это может озадачить не только студента, но и преподавателя.

В заключение укажем, что рассмотренные выше особенности ни в коей мере не умаляют ценности Multisim, как обучающей программы.

### Список литературы

1. NI Multisim. User Manual. National Instruments, 2009.
2. Штин А.А. Электротехнические дисциплины в среде моделирования Multisim: лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов. – Ижевск: изд-во ИжГТУ им. М.Т.Калашникова, 2016. – 220 с.

Материал принят к публикации 08.10.21.

УДК: 621.314

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f1315ea7.83862087

## НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ ОДНОТАКТНОГО ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Андрей Дмитриевич Юрченков**, магистр, yurchenkovandrei@yandex.ru

**Николай Александрович Полищук**, магистр

**Сергей Владимирович Дроздецкий**, ст. преподаватель

Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация.* В данной статье представлено построение непрерывной модели однотактного обратного преобразователя.

*Ключевые слова:* преобразователь, частотная характеристика, непрерывная модель.

### CONTINUOUS MODEL OF A SINGLE-STROKE FLYBACK CONVERTER

A.D. Yurchenkov, master, yurchenkovandrei@yandex.ru

N.A. Polischuk, master

S.V. Drozdetsky, senior lecturer

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Russia, Smolensk

*Abstract.* This article presents the construction of a continuous model of a single-stroke flyback converter.

*Keywords:* converter, frequency response, continuous model.

Одним из этапов проектирования импульсных преобразователей является обеспечение устойчивой работы. Для устойчивой работы преобразователя необходимо синтезировать звенья коррекции, выбор и расчет которых происходит с использованием непрерывной модели. Корректировка проводится по амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристикам. Для построения непрерывной модели преобразователя в РНТ (режим непрерывного тока) необходимо составить системы уравнений работы преобразователя на интервале импульса и интервале паузы.

В обратногоходо преобразователе на интервале импульса ключ в первичной обмотке замкнут и происходит накопление энергии в индуктивности намагничивания, диод блокирует протекание тока во вторичной обмотке (рисунок 1).

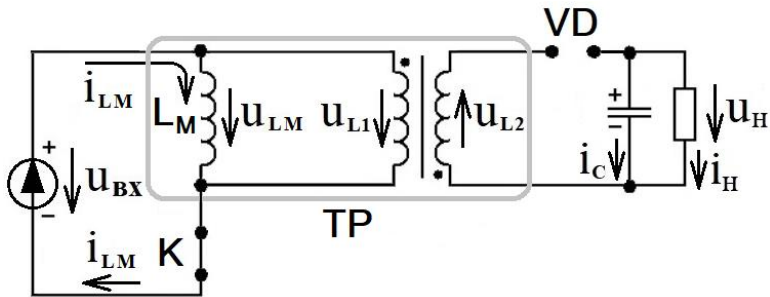


Рисунок 1 – Схема протекания токов в обратноходовом преобразователе

$$\begin{cases} u_{L\_M|D} = u_{L1|D} = u_{in} \\ i_{C|D} = -i_n \end{cases},$$

где  $u_{L\_M|D}$  – напряжение на индуктивности намагничивания на интервале импульса на интервале импульса,  $D$  – коэффициент заполнения,  $u_{in}$  – входное напряжение,  $i_{C|D}$  – ток на конденсаторе в момент импульса,  $i_n$  – ток на нагрузке. На интервале паузы ключ на первичной стороне размыкается и происходит передача энергии в нагрузку [1].

$$\begin{cases} u_{L2|1-D} = -u_C \\ i_{C|1-D} = i_{L2} - i_n \end{cases},$$

где  $u_{L2|1-D}$  – напряжение на вторичной обмотке на интервале паузы,  $u_C$  – напряжение на конденсаторе,  $i_{C|D}$  – ток на конденсаторе в момент паузы,  $i_{L2}$  – ток на вторичной обмотке,  $i_n$  – ток на нагрузке.

Выразив напряжение и ток вторичной обмотки используя первичную обмотку и коэффициент трансформации ( $K_{mp}$ ), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{u_{L\_M|1-D}}{K_{mp}} = -u_C \\ i_{C|1-D} = K_{mp} \cdot i_{L\_M} - i_n \end{cases}.$$

Среднее напряжение на первичной обмотке на периоде коммутации и средний за период коммутации ток конденсатора примет вид:

$$\begin{cases} u_{L\_M} \Big|_{CP} = u_{BX} \cdot d_1 - u_C \cdot K_{TP} \cdot (1 - d_1) \\ C \cdot \frac{du_C}{dt} \Big|_{CP} = K_{TP} \cdot i_{L\_M} \cdot (1 - d_1) - \frac{u_C}{R} \end{cases}$$

Система уравнений для построения непрерывной модели обратного преобразователя имеет вид:

$$\begin{cases} U_{in} \cdot D = U_{L\_M} + K_{mp} \cdot U_C \cdot (1 - D) \\ K_{mp} \cdot I_{L\_M} \cdot (1 - D) = I_C + I_n \end{cases}$$

Используя систему уравнений строится непрерывная модель обратного преобразователя (рисунок 2).

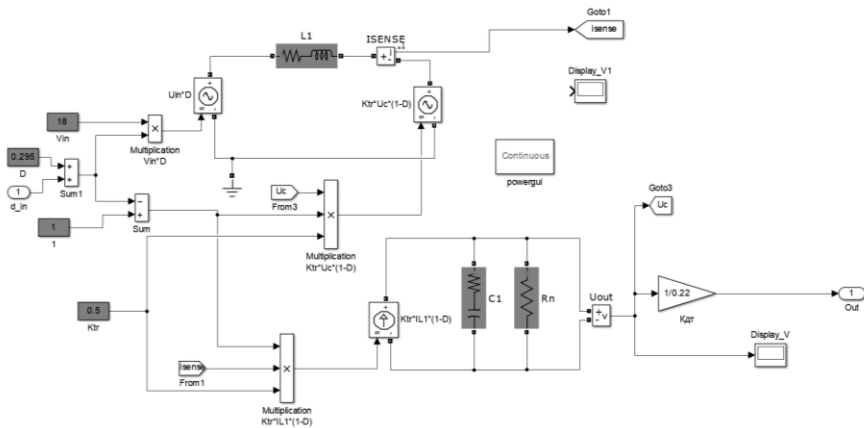


Рисунок 2 – Непрерывная модель преобразователя в среде MATLAB

Для получения АЧХ и ФЧХ необходимо задать входное напряжение, индуктивность первичной обмотки, коэффициент заполнения, коэффициент трансформации, выходной конденсатор и нагрузочный резистор. Первичная обмотка трансформатора и выходной конденсатор реализованы с учетом паразитных сопротивлений. В непрерывной модели учтен коэффициент передачи датчика тока ( $K_{дт}$ ).

Коррекция происходит с использованием нулей, полюсов и интегратора, обеспечивая наклон АЧХ в точке пересечения нуля – 20 дБ/дек, протяженностью не менее половины декады в каждую сторону от точки пересечения (рисунок 3). Запас по амплитуде более 7 дБ и запас по фазе более 45 градусов свидетельствуют о хороших динамических характеристиках системы [2].

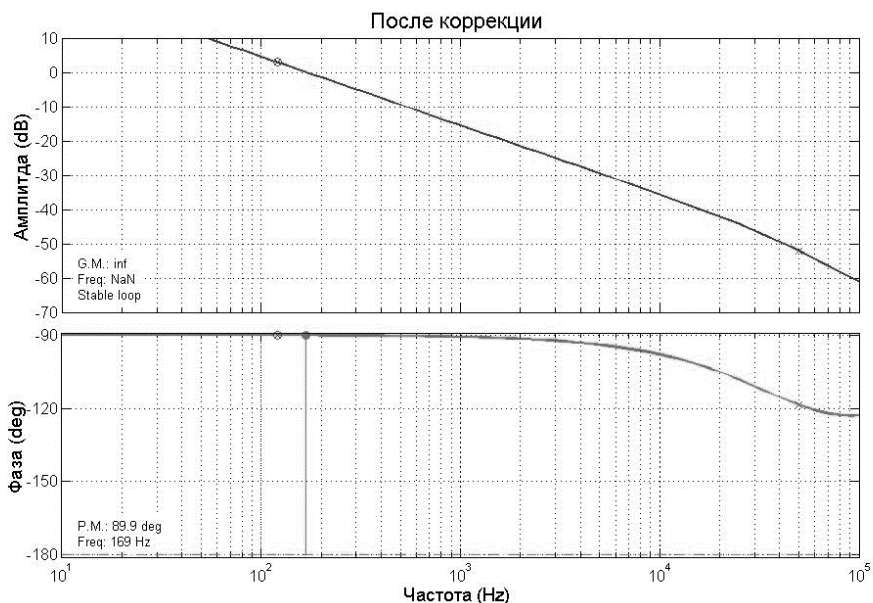


Рисунок 3 – АЧХ и ФЧХ скорректированной системы

Используя полученные характеристики, в дальнейшем формируется звено коррекции для ключевой модели преобразователя, по результатам моделирования которой возможно рассчитать номиналы компонентов, формирующие звено коррекции на уровне электрической принципиальной схемы.

### Список литературы

1. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю. Семенов – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 416 с.
2. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z. [Пер. с англ. Авраменко Ю.Ф.] К.: МК-Пресс, Спб.: КОРОНА-ВЕК, 2014. – 256 с.
3. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров. – М.: Юрайт, 2015. – 667 с.

Материал принят к публикации 09.10.21.

УДК: 621.314

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f13ead04.15162117

## **СИНТЕЗ ЗВЕНЬЕВ КОРРЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**Андрей Дмитриевич Юрченков**, магистр, yurchenkovandrei@yandex.ru

**Николай Александрович Полищук**, магистр

**Сергей Владимирович Дроздецкий**, ст. преподаватель

Фиалиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, Смоленск

*Аннотация.* В данной статье рассматривается синтез звеньев коррекции импульсных преобразователей с использованием непрерывной модели.

*Ключевые слова:* звено коррекции, преобразователь, частотная характеристика, непрерывная модель.

### **SYNTHESIS OF CORRECTION LINKS USING A CONTINUOUS MODEL OF A PULSE CONVERTER**

A.D. Yurchenkov, master, yurchenkovandrei@yandex.ru

N.A. Polischuk, master

S.V. Drozdetsky, senior lecturer

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk  
Russia, Smolensk

*Abstract.* This article discusses the synthesis of correction links for pulse converters using a continuous model.

*Keywords:* correction link, transducer, frequency response, continuous model.

При проектировании импульсных преобразователей необходимо обеспечить устойчивую работу. Для экономии времени и ресурсов на сборку макета удобно использовать моделирование. Моделирование позволяет оценить правильность расчета силового контура преобразователя, провести необходимую коррекцию, а также проверить влияние звеньев коррекции на работу преобразователя используя модели реальных компонентов. Для этого используется амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики непрерывной модели импульсного преобразователя [1].

На рисунке 1 представлена непрерывная модель однотактного обратного преобразователя.

Для построения частотных характеристик исследуемого преобразователя необходимы следующие параметры: входное напряжение, индуктивность первичной обмотки, коэффициент заполнения, коэффициент трансформации, емкость выходного конденсатор, сопротивление нагрузочного резистора.

Целью коррекции частотных характеристик является обеспечение наклона АЧХ в точке пересечения нуля  $20 \text{ дБ/дек}$ , протяженностью не менее половины декады в каждую сторону от точки пересечения (рисунок 2). Запас

по амплитуде более 7 дБ и запас по фазе более 45 градусов свидетельствуют о хороших динамических характеристиках системы [2].

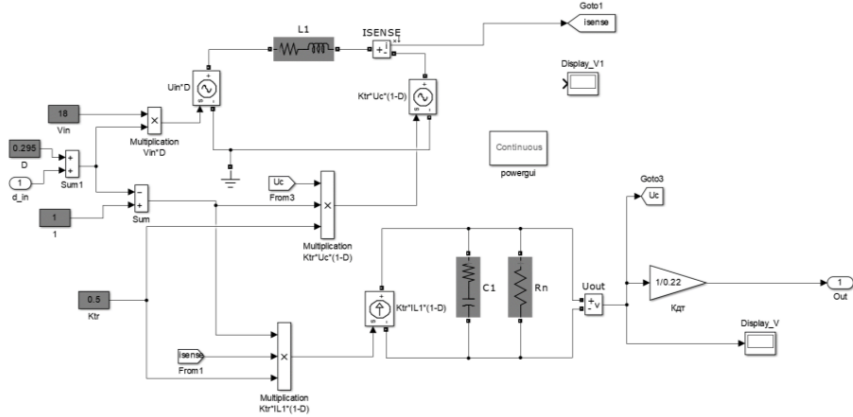


Рисунок 1 – Непрерывная модель преобразователя в среде MATLAB

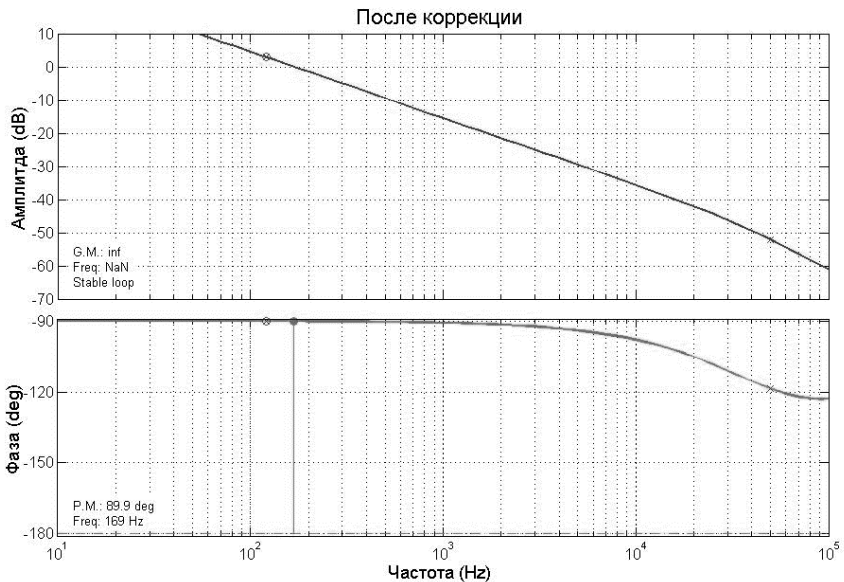


Рисунок 2 – АЧХ и ФЧХ скорректированной системы

Как правило, коррекцию стараются реализовать наименьшим числом корректирующих звеньев [3]. Для однотактного обратного преобразователя возможна коррекция при помощи интегратора; интегратора, одного полюса, одного нуля; интегратора, двух полюсов, двух нулей. В данном



случае наиболее стабильную работу обеспечивает коррекция, проведенная с использованием интегратора, одного нуля и одного полюса. АЧХ и ФЧХ корректирующего звена представлены на рисунке 3.

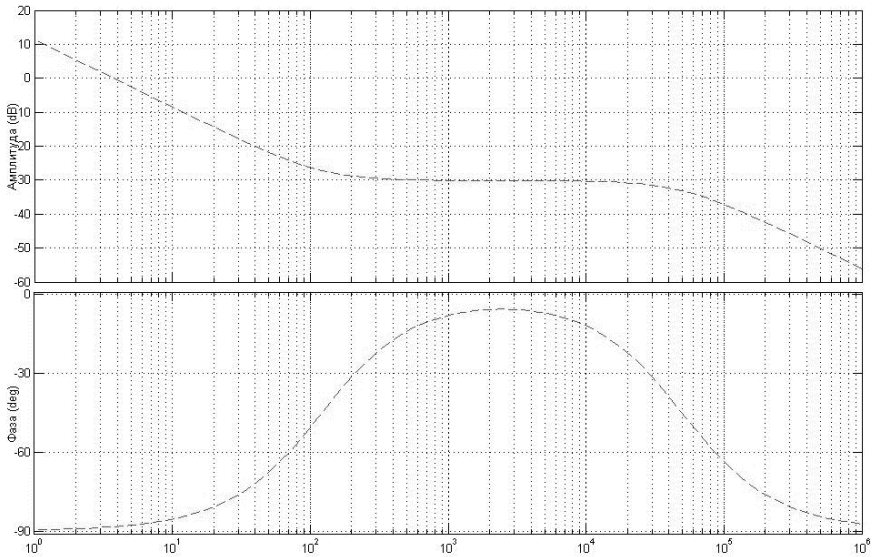


Рисунок 3 – АЧХ и ФЧХ корректирующего звена

Далее необходимо проверить, возможно ли построить корректирующее звено, с аналогичными частотными характеристиками, на реальных компонентах. Для этого построим модель корректирующего звена используя операционный усилитель с обвязкой в программе *MicroCap* (рисунок 4).

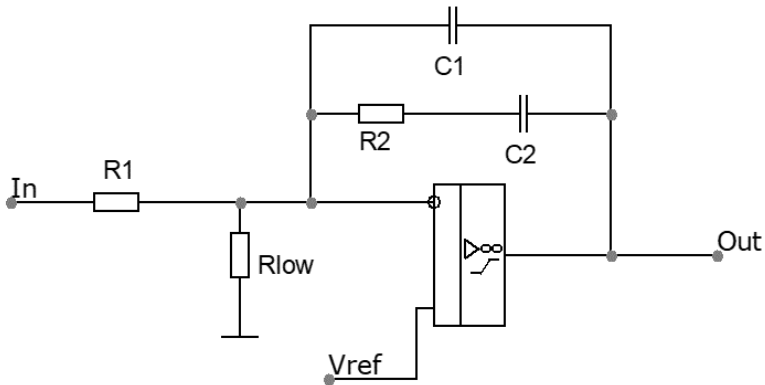


Рисунок 4 – Схема корректирующего звена в *MicroCap*

Используя частотный анализ построим АЧХ и ФЧХ полученной модели корректирующего звена (рисунок 5).

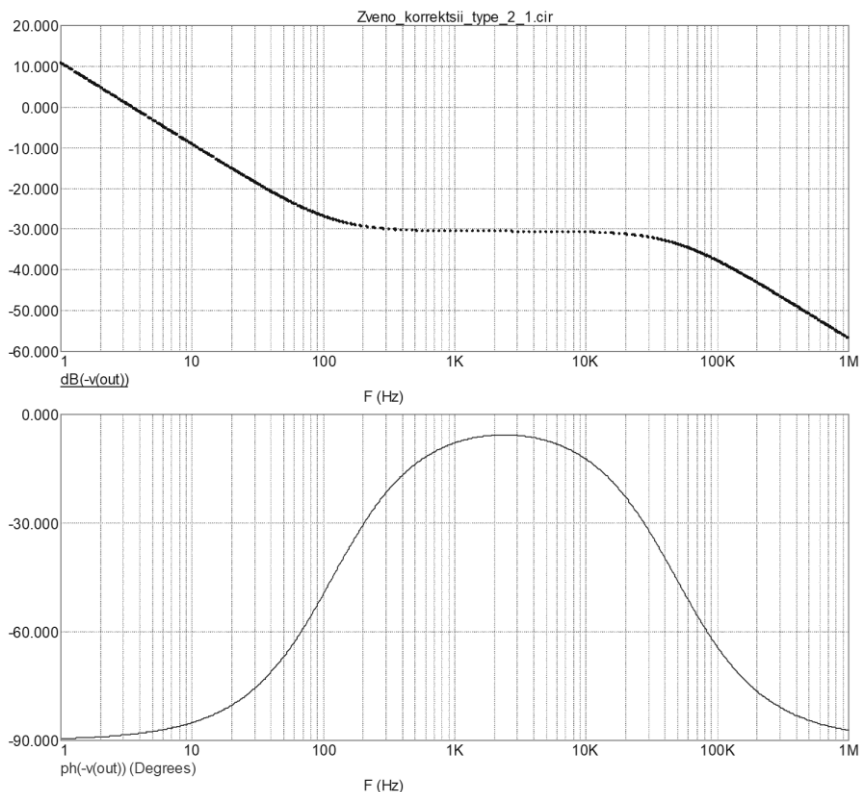


Рисунок 5 – АЧХ и ФЧХ модели корректирующего звена

Полученные характеристики совпадают с характеристиками корректирующего звена, полученные с помощью непрерывной модели. Таким образом непрерывная модель позволяет провести коррекцию работы преобразователя, на основе которой возможен синтез звеньев коррекции на реальных компонентах.

#### Список литературы

1. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю. Семенов – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 416 с.
2. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z. [Пер. с англ. Авраменко Ю.Ф.] К.: МК-Пресс, Спб.: КОРОНА-ВЕК, 2014. – 256 с.
3. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров. – М.: Юрайт, 2015. – 667 с.

Материал принят к публикации 09.10.21.

УДК 621.396

DOI: 10.30987/conferencearticle\_61c997f14d0884.72453584

## МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКАЯ РАДИООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ С РЕТРАСЛЯТОРАМИ

**Роман Петрович Краснов**

Воронежский государственный технический университет, доцент кафедры радиотехники, к.т.н., Россия, Воронеж, rpkrasnov@gmail.com

*Аннотация. Представлены результаты моделирования работы радиооптической системы передачи с применением канала, содержащего один или несколько ретрансляторов. Приведены зависимости вероятности ошибки для систем с различным числом ретрансляторов.*

*Ключевые слова: гибридная система, атмосферная оптическая линия связи, радиоканал, вероятность ошибки.*

### MULTI-USER RADIO-OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM WITH RELAYS

Roman P. Krasnov

Voronezh State Technical University, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Candidate of Technical Sciences, Russia, Voronezh, rpkrasnov@gmail.com

*Abstract. The results of modeling the operation of a radio-optical communication system using a channel containing one or more relays are presented. The dependences of the bit error rate for systems with different numbers of relays are given.*

*Keywords: hybrid system, free-space optics, radio channel, bit error rate.*

К современным системам передачи данных предъявляются постоянно растущие требования по скорости передачи данных. При этом чрезмерная загруженность радиодиапазона и необходимость дорогостоящего лицензирования в значительной степени препятствуют обеспечению современных стандартов качества беспроводной связи [1]. Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) представляют собой прекрасную альтернативу радиочастотным каналам для организации широкополосного доступа. При этом единственным серьезным препятствием на пути к всеобщему коммерческому применению таких систем является сильное влияние погодных условий на качество связи [2]. В последнее время имеется ряд работ, предлагающих в значительной мере снизить это влияние за счет организации дополнительного резервного радиоканала.

Серьезным ограничением для организации протяженных радиооптических линий связи является необходимость поддержания условия передачи в пределах прямой видимости. Такие ограничения могут преодолеваться за счет развертывания каналов с ретрансляторами оптических и радиосигналов.

Рассмотрим гибридную систему передачи, в которой имеется канал прямой видимости, используемый в сочетании с каналом, содержащим один или несколько ретрансляторов, работающих в режиме «усиление и передача».

В каналах данные передаются в виде цифровых потоков с квадратурной фазовой манипуляцией MPSK, влияние атмосферного канала передачи данных на оптические сигналы описывается экспоненциальным распределением Вейбулла [3], на радиосигналы  $m$  – распределением Накагами [4], выбора канала (прямой видимости или с ретрансляторами) производится по наибольшему отношению сигнал/шум (MRC) [5, 6].

Средняя битовая ошибка гибридной радиооптической системы  $P_{BER}$  определяется как функция средних битовых ошибок оптической и радиочастотной линий как:

$$P_{BER} = \frac{P_{\Sigma}^{AOЛC}(\gamma_T^{AOЛC}) + F_{\Sigma}^{AOЛC}(\gamma_T^{PЧ})P_{\Sigma}^{PЧ}(\gamma_T^{PЧ})}{1 - P_o},$$

где  $P_{\Sigma}^{AOЛC}(\gamma_T^{AOЛC})$  и  $P_{\Sigma}^{PЧ}(\gamma_T^{PЧ})$  - битовые ошибки каналов АОЛС и РЧ соответственно,  $P_o$  – вероятность отказа, определяемая как

$$P_o = F_{\Sigma}^{AOЛC}(\gamma_T^{AOЛC})F_{\Sigma}^{PЧ}(\gamma_T^{PЧ}),$$

При определении ошибки в системе зададимся также числом  $N$  ретрансляторов [7].

На рисунке 1 представлены зависимости вероятности битовой ошибки  $P_{BER}$  от среднего отношения сигнал/шум линии АОЛС  $\gamma^{AOЛC}$  при различных условиях построения системы.

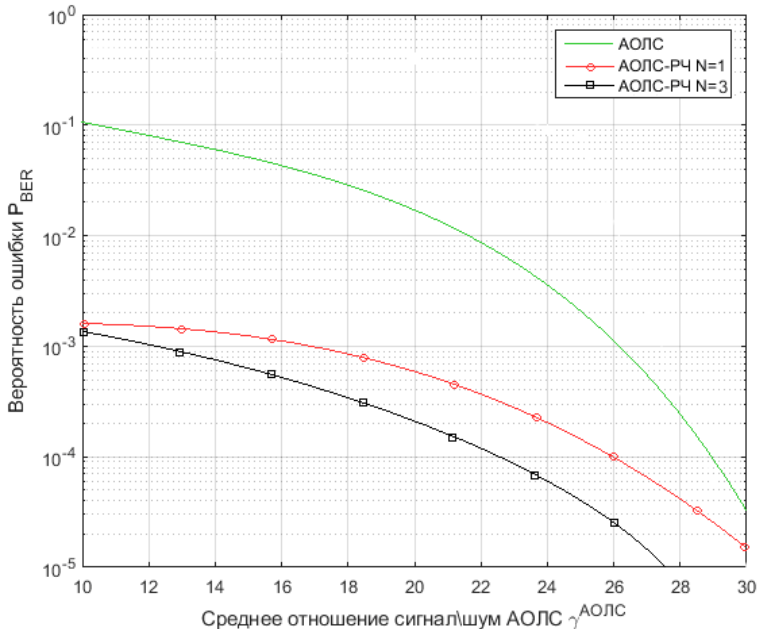


Рисунок 1 – Вероятность битовой ошибки в системе с различным числом  $N$  ретрансляторов

Для сравнения на графиках представлены вероятности ошибок системы АОЛС, не содержащей резервного радиоканала, а также гибридной системы, включающей канал с одним и тремя ретрансляторами соответственно.

Из приведенных зависимостей видно, что, во-первых, гибридная система связи обладает лучшей помехоустойчивостью по сравнению с АОЛС, а во-вторых, использование большего числа ретрансляторов положительно сказывается на качестве связи гибридной системы передачи.

#### Список литературы

1. *H. Willebrand B. Ghuman*, Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002.
2. *L. Andrews, R. Phillips, C. Hoppen*, Laser Beam Scintillation with Applications. New York: SPIE Press, 2001
3. *Yura, T. Rose* Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment, Opt. Express , 2012, 20, No. 18, PP. 20 680–20 683.
4. *M. Usman, H.-C. Yang, M.-S. Alouini* Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis, IEEE Photonics J., 2014, 6, No 5, PP. 1–13.
5. *A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell* User cooperation diversity—Part I: System description, IEEE Trans. Commun., 2003, 51, No. 11, PP. 1927–1938.
6. *A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell* User cooperation diversity—Part II: Implementation aspects and performance analysis, IEEE Trans. Commun., 2003, 51, No. 11, PP. 1939–1948.
7. *Gao, Z., Zhang, J., Zhu, P., Ji, Y.* The analysis of multiuser relaying mixed RF/FSO networks over exponentiated Weibull fading channel, China Communications, 2020, July, PP. 224-235.

*Материал принят к публикации 12.10.21.*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ «ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ЭЛЕКТРОНИКЕ, ФИЗИКЕ, РАДИОТЕХНИКЕ И СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» .....</b>	<b>3</b>
<b>Ашуркова С.Н.</b> Применение САПР для анализа прочностных характеристик конструкций кузовов пассажирских вагонов .....	3
<b>Богачев А.М., Шумарин С.В.</b> Исследование усилителя для активного пробника осциллографа .....	7
<b>Бондаренко Д.А., Бондаренко О.И.</b> Алгоритм обеспечения жизненного цикла математической модели .....	10
<b>Денисов И.А.</b> Анализ функциональных возможностей свободно распространяемых программных пакетов для автоматизации инженерных расчётов .....	14
<b>Денисов И.А.</b> Моделирование напряжённо-деформированного состояния элементов грузоподъёмных машин с концентраторами напряжений .....	18
<b>Исаев А.С., Ползиков М.Н.</b> Исследование критического времени перерыва питания для успешности самозапуска .....	22
<b>Кинев Е.С., Тяпин А.А., Хороших А.А., Колодочкин М.Д., Пантелеев В.И.</b> Цифровая система управления тиристорным регулятором в сети металлургического цеха .....	26
<b>Клюкин Д.В., Демаков А.В., Иванов А.А., Куксенко С.П.</b> Моделирование входного импеданса антенны методом моментов .....	30
<b>Колесник М.Б., Иванов С.Н.</b> Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках .....	34
<b>Лапшов М.О., Прытков С.В.</b> Применение САПР в печатной электронике .....	39
<b>Лапшов М.О., Прытков С.В.</b> Проектирование осветительного прибора в Компас-3D .....	42
<b>Лебедев В.А.</b> Учет жесткостных характеристик рельсовых направляющих качения станочного оборудования .....	46
<b>Махаммадиева Х.Н., Шамсиева М.Б.</b> Математическое планирование экспериментов и определение рациональных значений параметров жирования кожи для верха обуви на основе сложного эфира .....	50
<b>Труфанова Н.С., Аргищев С.А.</b> Методика экстракции электрических частотных параметров проводящих чернил .....	54

<b>Туркина Н.Р., Чукарин А.Н.</b> Конечно-элементный анализ инструментов для технологии глубокого сверления .....	58
<b>Турко В.А.</b> Автоматизированный комплекс экономической эффективности проектов .....	64
<b>Akhundjanov U.Yu., Starovoitov V.V.</b> Problems of biometric identification in access systems .....	69
<b>Павленко Б.И.</b> Технологии быстрого прототипирования печатных плат .	73
<b>СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»</b> 77	
<b>Анцыферов С.С., Фазилова К.Н.</b> Идентификация состояний информационно-измерительной системы управления процессами калибровки эталонных мер нанометрии .....	77
<b>Батенков К.А.</b> Выбор ключевых данных с точки зрения предназначения системы связи .....	81
<b>Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.</b> Нейросетевая информационно-измерительная система в задачах прогнозирования ресурса .....	83
<b>Пустошилов А.С.</b> Обнаружение скачков в фазовых измерениях навигационных приемников с высокостабильными опорными генераторами.....	87
<b>Топчий О.А.</b> Исследование электромагнитной активности в атмосфере с помощью средств дистанционного мониторинга .....	91
<b>Третьяков А.С.</b> Модернизация программного обеспечения «IM VIEW» для исследования тепловентиляционных режимов асинхронных электродвигателей.....	96
<b>Холкин А.В., Андреев Н.В.</b> Распознавание сигналов светофора на изображении с использованием сверточной нейронной сети .....	99
<b>Холкин А.В., Гаптуллазянова Г.И.</b> Система дистанционного управления автозапуском автомобиля на платформе Arduino .....	103
<b>Okhunov D.M., Okhunov M.H.</b> General methodology of evaluation and selection of components of automated systems .....	107
<b>СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ» .....</b>	
<b>Гончаров К.А.</b> Математическое моделирование механических характеристик электродвигателей с фазным ротором при неустановившемся движении механизмов подъемно-транспортных машин .....	111

<b>Дадабаев Ш.Т.</b> Моделирование пусковых режимов синхронного электропривода насосной станции .....	115
<b>Зарипов А.Р., Сафина Д.Н., Габдрахманова Ч.Ш.</b> Проектирование и разработка системы контроля микроклимата в помещении на платформе Arduino .....	120
<b>Зарипов А.Р., Сафина Д.Н., Габдрахманова Ч.Ш.</b> Реализация контроля температуры воздуха с использованием платформы Arduino.....	124
<b>Кинев Е.С., Тяпин А.А., Колодочкин М.Д., Пантелеев В.И.</b> Моделирование системы управления зарядом шины постоянного тока IGBT-инвертора для двухфазной линейной индукционной машины.....	128
<b>Сафина Д.Н., Зарипов А.Р., Гаптуллазянова Г.И.</b> Изучение системы контроля за состоянием животных в ветеринарной клинике с использованием платформы Arduino.....	132
<b>Сафина Д.Н., Зарипов А.Р., Гаптуллазянова Г.И.</b> Реализация секретного замка с использованием платформы Arduino .....	136
<b>Хвостов В.А., Кумбу Ж.К.</b> Синтез адаптивной системы управления движением крана с демпфированием колебаний груза .....	140
<b>Чепига А.А., Анучин А.С.</b> Разработка универсальной системы управления каскадным многоуровневым преобразователем.....	144
<b>Чуприна Н.В.</b> Сравнительный анализ систем управления автономным инвертором напряжения для электроприводов переменного тока .....	148
<b>СЕКЦИЯ «МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ПОВЕДЕНЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ».....</b>	<b>152</b>
<b>Козлов С.В., Коркин А.Г., Корнилов С.А.</b> Генератор случайных чисел для моделирования потока вызовов .....	152
<b>Креселюк Ю.В., Ивженко А.А., Кирса М.Н.</b> Упрощённая математическая модель магнитной системы с магнитопроводом круглого сечения.....	155
<b>Марус В.А., Пугачев А.А.</b> Математическое моделирование систем скалярного управления асинхронным двигателем .....	159
<b>Порубай О.В.</b> Принятие управленческих решений электроэнергетической системы с помощью параконсистентной логической модели экспертной системы (PES <sub>PAL2V</sub> ).....	162
<b>Семенов В.И., Шурбин А.К.</b> Использование вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой для фильтрации сигналов.....	167
<b>Алхадж Хасан А.</b> Модифицированное правило равной площади для аппроксимации проводящих поверхностей сеткой из проводов при решении задач излучения .....	171



<b>Холкин А.В., Павлов А.Д.</b> Имитационное и математическое моделирование автомобильного движения средствами AnyLogic и STATISTICA.....	175
<b>Школин А.Н.</b> Разработка поведенческой модели интегральной микросхемы импульсного регулятора напряжения 1290ЕФ1 .....	179
<b>Щирый А.О.</b> Использование опыта разработки отечественной САПР РЛС в создании и комплексной отладке новых алгоритмов адаптации загоризонтных РЛС к ионосферной обстановке.....	181
<b>СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ»...</b>	<b>185</b>
<b>Алимова Г.Р., Сиддиков И.Х.</b> Исследование системы автоматического регулирования скорости натяжении нити в процессе прядения .....	185
<b>Антипин Д.Я., Лукашов Н.А., Лукашова Е.В.</b> Моделирование процессов колебания кузова пассажирского вагона.....	189
<b>Аубакирова В.Р., Мукаева Г.Р., Фаррахов Р.Г., Буторин А.В., Парфенов Е.В.</b> Математические модели свойств покрытий при различных технологических режимах ПЭО .....	192
<b>Зайцев В.В., Касим А.Х.</b> Нелинейные осцилляторы в дискретном времени: анализ и синтез динамических систем .....	196
<b>Раупов Р.Р., Афанасьев В.В.</b> Особенности моделирования конфиденциальных систем передачи информации на основе псевдослучайных сигналов Multi-Scroll системы.....	198
<b>Халматов Д.А., Хушназарова Д.Р.</b> Разработка математической модели процесса отделки тканей .....	202
<b>Шевченко Г.М., Семенов Э.В.</b> Ключевые факторы, влияющие на невязку экспериментальных и модельных кривых, при моделировании $p-n$ - перехода на импульсных широкополосных сигналах .....	208
<b>Коноваленко С.П.</b> Моделирование свойств материалов сенсоров газов на основе органических полупроводников .....	211
<b>СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОСИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, ПРОИЗВОДСТВЕ, НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ».....</b>	<b>213</b>
<b>Андреев Д.В., Дороднов А.Ю., Любецкий Д.С.</b> Математические модели однородных элементов MAX, MIN на основе функций двужначной логики .....	213
<b>Антоненко Н.И., Меркутов А.С.</b> Моделирование усилителей радиопередающих устройств в САПР Matlab.....	217

<b>Барабанов Д.В., Пугачев А.А.</b> Моделирование синхронного двигателя в режиме компенсации реактивной мощности.....	221
<b>Барабанов Д.В., Пугачев А.А.</b> Моделирование преобразователя частоты с многоуровневым инвертором напряжения.....	224
<b>Буравлева М.Э., Кликно Д.Д., Гладышев А.Б.</b> Программно-аппаратный комплекс моделирования широкополосного канала системы спутниковой связи.....	230
<b>Горин В.Я., Куть Е.В., Гуляева И.Б.</b> САПР для решения учебно-исследовательских задач при проектировании современных кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения.....	234
<b>Зотин В.Ф.</b> Программируемый высоковольтный источник напряжения для контроля параметров полупроводниковых приборов.....	239
<b>Киселев А.Ю., Пинчуков П.С.</b> Перспективы применения пакета Matlab для моделирования грозовых разрядов в ЛЭП.....	243
<b>Клямеров К.П., Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Разработка дальномера на основе ультразвукового датчика расстояния HC-SR04.....	247
<b>Клямеров К.П., Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Разработка <i>SPICE</i> -модуля микросхемы <i>HV9931</i> для моделирования электронных схем.....	251
<b>Клямеров К.П., Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Разработка и моделирование работы двухтактного полумостового преобразователя в различных режимах.....	255
<b>Клямеров К.П., Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Проектирование цифрового фильтра верхних частот с помощью САПР ISE DESIGN SUITE.....	259
<b>Курир В.И.</b> Роль пакета Matlab/Simulink в дипломном проектировании	263
<b>Kurir V.I.</b> The role of the Matlab/Simulink package in diploma design.....	268
<b>Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Проектирование повышающего регулятора с непосредственной связью с помощью САПР Matlab.....	274
<b>Лысенков А.А., Амелин С.А.</b> Синтез и симуляция работы понижающего регулятора в САПР Matlab.....	278
<b>Медведев И.И.</b> Исследование спектра сигнала в Multisim.....	282
<b>Медведев Д.М., Малаханов А.А.</b> Моделирование высоковольтного кремниевого диода Шоттки.....	285
<b>Падеров В.П., Аверкин Д.А.</b> Экстракция статических параметров <i>SPICE</i> -модели светодиодов по трем точкам прямой ВАХ.....	289

<b>Пикалов В.В., Бойков А.И., Пономарев П.С., Кондратьев С.Е.</b> Усовершенствование конструкции электродугового плазматрона .....	293
<b>Полищук Н.А., Юрченков А.Д., Дроздецкий С.В.</b> Построение непрерывной модели однотактного прямоходового преобразователя.....	296
<b>Скворцов А.А.</b> Квазианалитический расчет коэффициента затухания в металлических стенках лунарного волновода .....	300
<b>Сурайкин А.И., Лабутин М.С., Кудряшов А.Д., Сурайкин А.А.</b> Компьютерное моделирование источника питания светодиодов с двумя токовыми ключами.....	305
<b>Сурайкин А.И., Кудряшов А.Д., Лабутин М.С., Сурайкин А.А.</b> Моделирование импульсного источника питания повышенной мощности для управления светодиодами.....	309
<b>Усманова Х.А., Тургунбаев А.</b> Исследование взаимодействия сверхвысокочастотных волн с зерном.....	314
<b>Штин А.А.</b> Особенности обучения студентов в среде моделирования Multisim .....	318
<b>Юрченков А.Д., Полищук Н.А., Дроздецкий С.В.</b> Непрерывная модель однотактного обратногоходового преобразователя.....	322
<b>Юрченков А.Д., Полищук Н.А., Дроздецкий С.В.</b> Синтез звеньев коррекции с использованием непрерывной модели импульсного преобразователя.....	326
<b>Краснов Р.П.</b> Многопользовательская радиооптическая система связи с ретрансляторами .....	330

Научное издание

**«САПР И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ»**

**V международная  
научно-практическая конференция  
(Брянск, 21 – 22 октября 2021 г.)**

**Сборник научных трудов**

**Под общей редакцией А.Ю. Дракина**

Компьютерный набор      О.А. Топчий