

А.Н. Школин

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)
A.N. Shkolin (Bryansk, Bryansk State Technical University)

**ЧИСЛЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**NUMERICAL FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF
SWITCHING CONVERTERS BEHAVIORAL MODELS**

Данная работа посвящена способу численного определения частотных характеристик при моделировании нелинейных динамических объектов, в частности при поведенческом моделировании микросхем импульсных преобразователей. Проведен анализ существующих методов моделирования частотных характеристик импульсных преобразователей. Приведена методика сокращения объема вычислений при выполнении расчёта частотных характеристик моделей нелинейных динамических импульсных систем в области их устойчивости на основе расчета во временной области. Это позволяет учитывать существенные особенности исследуемых нелинейных объектов, в отличие от линеаризованных моделей, применимых только к режиму малого сигнала. Способ основан на применении корреляционного анализа при нахождении установившегося стационарного движения моделируемого объекта во временной области при варьировании частоты гармонического входного воздействия. Приведены результаты моделирования с применением предложенного подхода.

This work is devoted to a method for numerically determining the frequency characteristics when modeling nonlinear dynamic objects, in particular during behavioral modeling of pulse converter circuits. The analysis of existing methods for modeling the frequency characteristics of pulse converters is carried out. A technique is given for reducing the amount of calculations when calculating the frequency characteristics of models of nonlinear dynamic pulse systems in the field of their stability based on a calculation in the time domain. This allows one to take into account the essential features of the studied nonlinear objects, in contrast to the linearized models applicable only to the small signal mode. The method is based on the use of correlation analysis when finding the steady-state stationary motion of the simulated object in the time domain while varying the frequency of the harmonic input signal. The results of modeling using the proposed approach are presented.

Ключевые слова: импульсные преобразователи напряжения, микросхемы, моделирование, частотный анализ.

Keywords: switching voltage converters, microcircuits, simulation, frequency response analysis.

Введение

На сегодня импульсные преобразователи активно применяются для построения систем электропитания электронных устройств. Область применения таких электронных устройств разнообразна, и включает в себя системы автоматики, радиотехнику, бортовые системы летательных аппаратов, электронные приборы для медицины, бытовые устройства, мобильные устройства и т.д.

При разработке таких электронных устройств большое значение придается показателям надежности, стабильности характеристик при воздействии различных внешних факторов, изменяющихся в широких диапазонах и т.п. В частности разработка источников электропитания на системном уровне связана с проработкой общих вопросов устойчивости при малых и больших значениях возмущающих факторов. Для чего при выборе системы управления и силовой части (пассивных элементов силового фильтра) импульсного преобразователя напряжения (ИПН) определяются частотные характеристики: ЛАЧХ и ЛФЧХ коэффициента петлевого усиления, запас по фазе и амплитуде, частота единичного усиления и др.

Для решения указанных проблем активно применяется моделирование ИПН, которое позволяет существенно сократить сроки, повысить качество и снизить затраты на разработку. Так как многие современные ИПН выполняются с использованием интегральных микросхем (ИМС) ИПН, при моделировании часто применяются поведенческие модели (ПМ) [16]. ПМ – это имитационная модель, воспроизводящая внешнее поведение объекта. Так как для ПМ описание внутренней структуры объекта моделирования является не обязательным, то с одной стороны ПМ с точки зрения минимальных требований к вычислительным ресурсам представляют интерес для инженеров-разработчиков электронных устройств, или конечных потребителей ИМС, а с другой стороны, вследствие необязательности воспроизведения внутренней структуры элемента ЭКБ позволяют производителям ЭКБ реализовать свои права на интеллектуальную собственность (например, топологию ИМС). Вследствие этого ПМ активно применяются в электронной сфере.

С появлением расширений высокоуровневых языков описания аппаратуры, таких как Verilog-AMS и VHDL-AMS [8], ПМ активно применяются для технической реализации ПМ непрерывных (аналоговых систем), в том числе так называемых мультидисциплинарных, примером которых являются электротепловые ПМ, учитывающие взаимосвязь электрических и тепловых свойств полупроводниковых приборов.

При разработке ПМ одним из наиболее важных этапов является проверка адекватности ПМ на ее соответствие экспериментальным данным. Для этих целей помимо классических характеристик во временной области активно применяются частотные характеристики.

Данная статья посвящена способу численного определения частотных характеристик при моделировании нелинейных динамических объектов, в частности при поведенческом моделировании ИМС ИПН.

Проблематика и методология

На сегодня существует ряд работ, посвященных данной проблематике. Исторически первыми среди них можно выделить ряд работ, посвящённых методам, проводимых в условиях натурального эксперимента на макетной плате или готовом образце.

В известной работе Мидлбрука Р.Д. [10] предлагается способ определения ЧХ ИПН с сохранением устойчивости анализируемой системы посредством замкнутого контура обратной связи, основанный на введении в этот контур источника гармонического возмущающего воздействия. При этом даются рекомендации по выбору соотношений внутреннего сопротивления источника напряжения инжектируемого гармонического сигнала относительно входа и выхода ИПН. Также проанализированы схемотехнические варианты для разных типов источников инжектируемого сигнала – источник тока или источник напряжения.

При технической реализации данного подхода часто применяются методы, основанные на применении в качестве источника инжектируемого сигнала в виде генератора качающейся частоты. Однако, как отмечается в [3], при этом наблюдается искажение ЧХ, требующее его дополнительного учета и анализа.

Выбору формы инжектируемого сигнала, отличного от гармонического сигнала и проведению последующего частотного анализа также посвящены ряд работ. В частности в работах [5, 14] для этих целей применяются сигнал PRBS. Примером данного подхода при идентификации ЧХ является [7], в котором определены коэффициенты дискретного разностного уравнения с использованием псевдослучайного двоичного сигнала (PRBS) в качестве инжектируемого возмущающего сигнала.

При использовании упомянутых методов в задачах моделирования явным образом [4] существует ряд проблем. Главная из которых это увеличение вычислительной трудности задачи моделирования импульсных объектов, для которых анализируемый частотный диапазон существенно отличается от тактовой частоты внутреннего генератора импульсного объекта. В частности, при расчете в НЧ-области максимальный шаг решателя выбирается, как величина, которая меньше такта работы импульсной системы, и в результате на несколько порядков меньше частоты инжектируемого в цепь обратной связи сигнала. Что в целом приводит к необходимости расчета большего числа точек.

Наиболее простым способом моделирования ЧХ ИПН является использование подходов, основанных на применении осредненных (линеаризованных) малосигнальных моделей ИПН [11]. Однако с общих

позиций данный подход приводит к появлению неточностей моделирования при использовании режимов большого сигнала.

При необходимости учета данного режимы наиболее часто применяется совмещенный время-частотный способ, например [4, 13]. При этом ЧХ получаются как результат анализа серии вычислительных экспериментов во временной области для интервалов времени кратных периоду инжектируемого гармонического сигнала. При использовании в качестве основного метода анализа преобразование Фурье, такой способ получил название Frequency Response Analysis (FRA) [4]. Следует отметить, что для выполнения FFT и DFT нужен ряд данных для интервала времени как минимум за полный период анализируемого сигнала.

Другим способом вычисления амплитуды и фазы при моделировании ЧХ нелинейных объектов, на примере микросхем АЦП, предложен в [13]. В данном случае авторами предлагается выполнять аппроксимацию выходного сигнала синусоидальным с применением метода наименьших квадратов. Данный подход в [13] интересен тем, что в некоторых частных случаях может позволить определять ЧХ по интервалу времени, не превышающем период инжектируемого монотонального гармонического сигнала. Однако для этого в анализируемом выходном сигнале моделируемой системы формы отрицательной и положительной полуволн (относительно среднего значения постоянной составляющей) должны совпадать, что в общем случае в нелинейных системах исключается. Другим недостатком данного подхода является некоторое увеличение вычислительной сложности решаемой задачи при выполнении аппроксимации нескольких периодов с большим числом рассчитанных точек временного ряда.

Также при моделировании нелинейных динамических объектов, в составе которых применяется обратная связь, а моделирование выполняется из нулевых начальных условий, важно обеспечить «траекторию запуска» моделируемой системы, которая обеспечивает выход системы в устойчивое состояние. В работах посвященных анализу нелинейной динамики ИПН [1, 2] и др., этот режим называют как одноцикловый, и для его нахождения используется так называемое отображение Пуанкаре [6]. При этом соответствующий «траектории запуска» начальный рассчитываемый интервал времени в каждом вычислительном эксперименте во временной области необходимо исключать для выполнения FRA, что дополнительно отрицательно сказывается на росте вычислительной сложности решаемой задачи.

Переходный процесс во времени присутствует в общем случае у нелинейных динамических объектов, исследуемых в рамках данной статьи (старт системы, смена частоты при проведении FRA). Его нужно или исключить, или минимизировать его продолжительность.

Одним из вариантов исключения из рассчитанного временного ряда данных, относящихся к переходному процессу, является проведение предварительного анализа на основе PSS-анализа (periodic steady-state). Данному подходу посвящены ряд работ, например [6, 9] и др., и реализован во многих средах моделирования [17], таких средах как Cadance Spectre RF, MicroCAP, LTSpice и др.

Выполнение PSS основано на выполнении дополнительных предварительных расчетов, например, по определению ненулевых начальных условий (ННУ), позволяющим сразу перейти моделируемой системе в установившийся режим. Для этого используется решение краевой задачи с подбором ННУ, что требует решения и дополнительно увеличивает вычислительную сложность задачи моделирования. Либо же время перехода системы в установившийся режим прогнозируется на основе линеаризованной модели ИПН (например, в среде LTSpice), что выполняется вычислительно нетрудно, но обладает схожими недостатками, отмеченными ранее при обсуждении малосигнальных моделей.

На сегодня не разработаны критерии и подходы для оценки и выбора минимального необходимого времени расчета, которое при этом обеспечивало бы проведение FRA при моделировании ИПН с наперед заданной точностью.

Как показывает практика, подбор ННУ требует высокой точности при их расчете, например, на стадии PSS, т.к. в анализируемых системах, дополнительно ситуация усугубляется ошибками численного метода при расчете начальных точек, и тем обстоятельством, что система ИПН стартует с определенного положения ключа, которое не обязательно совпадает с тем, при котором выбирались ННУ. Таким образом, принимается предположение об априорном существовании переходного процесса в начале оси времени рассчитываемого графика.

Сократить, но не исключить, временной интервал переходного процесса возможно, только выбирая ННУ вблизи точки покоя системы, рассчитываемого на предварительном подготовительном этапе. При этом сигнал в процессе переходного процесса можно рассматривать как случайную величину.

Суть предлагаемого подхода состоит в том, что, как и при натурном эксперименте по определению частотных характеристик коэффициента петлевого усиления [10], в контур цепи обратной связи по напряжению вводится источник гармонического сигнала и производится расчет ММ во временной области, а критерием останова расчета определяется по фиксации момента наличия установившегося (стационарного) режима на интервале времени, соответствующем периоду гармонического сигнала. Что далее позволяет выполнять вычисление амплитуды и фазы основной гармоники выходного сигнала ИМС ИПН посредством алгоритма быстрого

преобразования Фурье. При этом определение установившегося режима осуществляется посредством расчета статистических показателей стационарности режима. В частности, для интервалов выделенных динамических «окон» (внутри разных периодов гармонического сигнала) рассчитанного ряда данных вычисляется коэффициент корреляции Пирсона (PCC). По его величине и по результату дополнительных тестов (тест проверки на нулевую гипотезу H_0 и др.) происходит принятие решения об останове расчёта во временной области (см. рис. 1).

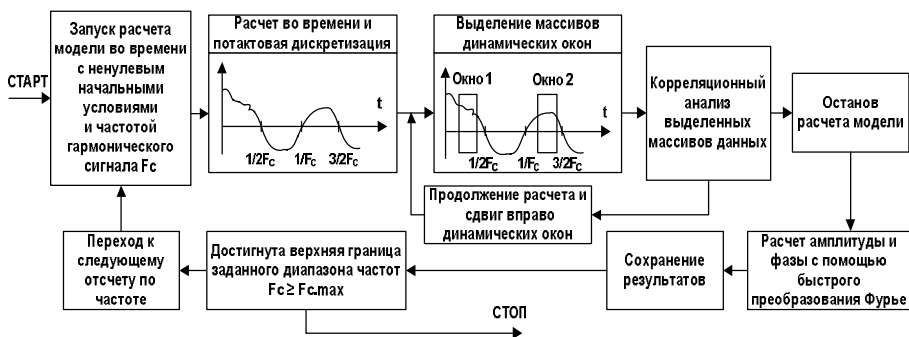


Рис.1. Поясняющая схема способа для выполнения частотного анализа ИМС ИПН понижающего типа

Результаты

Приведенная ранее методика применялась авторами при разработке ПМ ИМС ИПН LM2596. Данная ИМС работает с тактовой частотой 150 кГц, а нижний полюс передаточной функции внутреннего регулятора находится на частоте порядка 60 Гц, что потребовало выполнения расчета FRA от величины 10 Гц, т.е. требуется рассчитать для этой частоты только для одного периода инжектируемого гармонического сигнала (без учета переходного процесса) 15000 тактов, каждый из которых включает в себя расчет нескольких десятков точек.

ПМ данной ИМС ИПН реализована Проект в Matlab/ Simulink. При выполнении анализа применялись следующие настройки: ширина синхронизируемого окна порядка 50 тактов и принятый диапазон коридора требуемых значений PCC 0,98-1,0, что для случая расчета во времени позволило остановить симуляцию и выполнять FRA на интервале порядка полутора периода инжектируемого сигнала (с учетом дополнительного запаса по времени).

На основе идентифицированной ЛАЧХ И ЛФЧХ удалось синтезировать ПМ LM2596. Сравнение результатов полученных на основе предложенного подхода и с использованием классического подхода к FRA на базе расчета с

увеличенным интервалом времени показало их отличие на уровне 5%. При этом сокращение времени составило порядка 10 раз.

Наряду с преимуществами предлагаемого способа следует отметить и его ограничения. При задании ННУ, их необходимо формировать для всех переменных состояния линейной части, что бывает затруднительно. Диапазон коридора доверительных значений РСС эмпирически выбирался авторами как 0,98-1,0, однако нижнее значение может в общем случае быть немного другим.

Следующим важным вопросом является выбор ширины динамического окна. Его значение можно в процессе выполнения FRA автоматически изменять, как и число анализируемых периодов, либо же задавать наперед заданный профиль распределения этих значений относительно оси анализируемых частот. Данное замечание актуально для области частот вблизи тактовой частоты ИПН.

Заключение

Предложен подход сокращения объема вычислений при выполнении расчёта частотных характеристик ММ нелинейных динамических импульсных систем в области их устойчивости на основе расчета во временной области, что позволяет учитывать особенности данного вида объектов, в отличие от линеаризованных ММ, применимых только к режиму малого сигнала.

Приведенные в данной статье результаты применялись при разработке поведенческой модели ИМС ИПН LM2596. Полученные результаты могут быть использованы для анализа поведенческих моделей ИМС с учетом протекающих в них процессов, и других типов нелинейных динамических объектов, таких как АЦП, УВХ, и т.д.

Статья подготовлена благодаря заданию Минобрнауки № 8.1729.2017/ПЧ.

Список литературы

1. *Алейников, О.А.* Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах / О.А. Алейников [и др.] // *Электричество*. – 1991. – № № 4. – С. 16-21.
2. *Баушев, В.С.* О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием / В.С. Баушев, Ж.Т. Жусубалиев // *Электричество*. – 1992. – № №8. – С. 47-53.
3. *Карпов, И.В.* Развитие вычислительных методов определения частотной характеристики радиоканала : [дис. канд. тех. наук :05.12.04] / И.В. Карпов. – Владимир: ВлГУ, 2013. – 141 с.
4. *Engelhardt, M.* LTspice: Extracting Switch Mode Power Supply Loop Gain in Simulation and Why You Usually Don't Need To | Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-extracting-switch-mode-power-supply-loop-gain-in-simulation-and-why-you-usually-don-t-need.html>.

5. *Barkley, A.* Improved Online Identification of a DC–DC Converter and Its Control Loop Gain Using Cross-Correlation Methods / A. Barkley, E. Santi // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24. – № 8. – P. 2021-2031.

6. *Houben, S.H.M.J.* Periodic Steady-State Analysis of Free-running Oscillators / S.H.M.J. Houben, J.M. Maubach // Scientific Computing in Electrical Engineering / coll. M. Griebel [et al.]; eds. U. van Rienen, M. Günther, D. Hecht. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. – Vol. 18. – P. 217-224.

7. *Huynh, P.* Empirical small-signal modeling of switching converters using Pspice / P. Huynh, B.H. Cho // Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference. – Atlanta, GA, USA: IEEE, 1995. – Vol. 2. – P. 809-815.

8. *IEEE standard VHDL analog and mixed-signal extensions: approved 18 March 1999* : IEEE Std. IEEE standard VHDL analog and mixed-signal extensions / ed. Computer Society. – New York, NY: Inst. of Electrical and Electronics Engineers, 1999. – 1076.1-1999. – 303 p.

9. *Kim, J.* Fast, Non-Monte-Carlo Estimation of Transient Performance Variation Due to Device Mismatch / J. Kim, K.D. Jones, M.A. Horowitz // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2010. – Vol. 57. – № 7. – P. 1746-1755.

10. *Middlebrook, R.D.* Measurement of loop gain in feedback systems / R.D. Middlebrook // International Journal of Electronics. – 1975. – Vol. 38. – № 4. – P. 485-512.

11. *Middlebrook, R.D.* Small-signal modeling of pulse-width modulated switched-mode power converters / R.D. Middlebrook // Proceedings of the IEEE. – 1988. – Vol. 76. – № 4. – P. 343-354.

12. *Mondini, V.* Sinc-Windowing and Multiple Correlation Coefficients Improve SSVEP Recognition Based on Canonical Correlation Analysis / V. Mondini [et al.] // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-11.

13. *Osipov, D.* Frequency analysis of switched capacitor circuits / D. Osipov, Y. Bocharov // 2012 International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD) 2012 International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). – Seville, Spain: IEEE, 2012. – P. 209-212.

14. *Roinila, T.* Fast Loop Gain Measurement of a Switched-Mode Converter Using a Binary Signal With a Specified Fourier Amplitude Spectrum / T. Roinila, M. Vilkkö, T. Suntio // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24. – № 12. – P. 2746-2755.

15. *Safi, S.M.M.* Improving the performance of the SSVEP-based BCI system using optimized singular spectrum analysis (OSSA) / S.M.M. Safi, M. Pooyan, A. Motie Nasrabadi // Biomedical Signal Processing and Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 46-58.

16. *Shkolin, A.N.* Development of automated measurement systems for testing integrated circuits of switching converters / A.N. Shkolin, A.Y. Drakin, V.F. Zotin. – IEEE, 2018. – P. 1-4.

17. *Wan, B.* Overview of commercially-available analog/RF simulation engines and design environment / B. Wan, X. Wang // 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT) 2014 IEEE 12th International Conference on Solid -State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). – Guilin, China: IEEE, 2014. – P. 1-4.

Материал поступил в редколлегию 21.10.19.