

Также было выявлено следующее. Полное совпадение характеристик с заданными наблюдалось без учёта инерционности оптрона. При введении реальных параметров оптрона, АЧХ в области верхних частот шла значительно ниже желаемой характеристики. Исправить эту ситуацию отчасти удается удалением конденсатора C_{Pole2} , обеспечивающим 2-й высокочастотный полюс.

Разработанная методика позволяет достаточно точно рассчитывать параметры корректирующей цепи для обеспечения устойчивости импульсных стабилизаторов напряжения и иных устройств, содержащих гальванически развязанную цепь обратной связи. В частности, такую методику можно использовать при проектировании преобразователей электроэнергии, содержащих контроллеры управления мощными силовыми ключами со встроенным оптоэлектронным каналом обратной связи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-07-00380 А.

Список литературы

1. Christophe P. Basso Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs, Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies.

2. Мелешин, В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.

3. Амелина, М.А. Методика расчета статического режима усилителя рассогласования на основе микросхемы TL431/ М.А. Амелина, А.И. Гатина // ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ-2015 – ЭИИ-2015: сборник трудов: В 2 т. – Смоленск: Универсум, 2015. – Т.1. – Секции 1,2,3,4. – 506 с.: ил. (с. 245–250).

4. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М.А. Амелина, С.А. Амелин–Электрон. текстовые дан. – СПб. : Лань, 2014. – 632 с. Режим доступа: URL http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53665

Материал поступил в редколлегию 12.10.18.

УДК 621.314

DOI: 10.30987/conferencearticle_5c19e5e1dc9249.56226934

С.А. Амелин, А.С. Амелин

(г. Смоленск, филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ОБРАТНОХОДОВОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрен способ обеспечения устойчивости импульсного стабилизатора напряжения с использованием непрерывной модели этого

дискретного устройства. Проанализирована область применимости такого способа. Показана возможность использования непрерывных моделей при анализе работы устройств преобразовательной техники, в том числе содержащие контроллеры управления мощными силовыми ключами.

A method for ensuring the stability of Switch-Mode voltage converter using an averaged continuous model of this discrete device is considered. The analysis of the scope of this method is carried out. The possibility of using averaged continuous models in the analysis of Power Electronics devices, including those containing controllers for driving power switches, is shown.

Ключевые слова: импульсный стабилизатор напряжения, контроллер силовых ключей, непрерывная модель, устойчивость, цепи коррекции.

Keywords: Switch-Mode voltage converter, power switch controller, averaged continuous model, stability, correction circuits.

Важной частью любого сетевого импульсного источника питания являются элементы гальванической развязки вторичной (выходной) цепи от первичной (сетевой) [1]. Эти элементы должны быть как в силовом тракте, так и в тракте обратной связи. Кроме того, тракт обратной связи должен содержать цепи коррекции, обеспечивающие устойчивость замкнутой системы стабилизации. Эти цепи, как правило, строятся на основе усилителя рассогласования, в качестве которого может выступать, к примеру, микросхема TL431.

В [1] была представлена принципиальная схема такого усилителя и методика его расчета по постоянному току на заданные параметры для сопряжения с микросхемой ШИМ-контроллера. В [2] продемонстрированы основные принципы формирования частотно-зависимой характеристики усилителя с оптоэлектронной развязкой для обеспечения устойчивости замкнутой системы, коей и является импульсный стабилизатор напряжения (ИСН).

Остается открытым вопрос, как именно по шагам, используя систему компьютерного моделирования Micro-Cap [3], обеспечить устойчивость стабилизатора. Этой проблеме и посвящена данная статья.

Основная проблема состоит в получении частотной характеристики ключевого преобразователя постоянного напряжения (ППН), на основе которого строится стабилизированный источник питания. Поскольку ППН является нелинейной импульсной системой (т.е. содержит в своем составе ключ, меняющий конфигурацию системы), непосредственно получить его частотную характеристику в окрестности стационарного режима весьма сложно и трудоёмко. Выходом является использование для этой цели непрерывных моделей ППН, содержащихся в библиотеке программы Micro-Cap [3].

Следует отметить, что импульсные стабилизаторы напряжения бывают двух типов: с режимом управления Voltage Mode и с режимом управления Current Mode [3]. Первый режим характеризуется управлением

коэффициентом заполнения силового ключа (ключей) преобразователя только сигналом рассогласования выходного напряжения. Второй режим характеризуется дополнительным введением местной обратной связи по току дросселя, осуществляемой заменой генератора пилообразного напряжения на одном из входов ШИМ-компаратора сигналом с датчика тока дросселя. Большинство современных ШИМ-контроллеров позволяют управлять преобразователем постоянного напряжения и в первом, и во втором режимах.

Для демонстрации методики обеспечения устойчивости рассмотрим сетевой ИСН с режимом Voltage Mode на основе обратногоходового преобразователя (FLYBACK).

Непрерывная модель рассматриваемого ИСН (рис. 1) включает:

- источник входного постоянного напряжения V_{in} — выдает амплитудное значение напряжения сети ~ 220 В после выпрямителя с емкостным фильтром;
- непрерывную модель обратногоходового импульсного преобразователя напряжения X1;

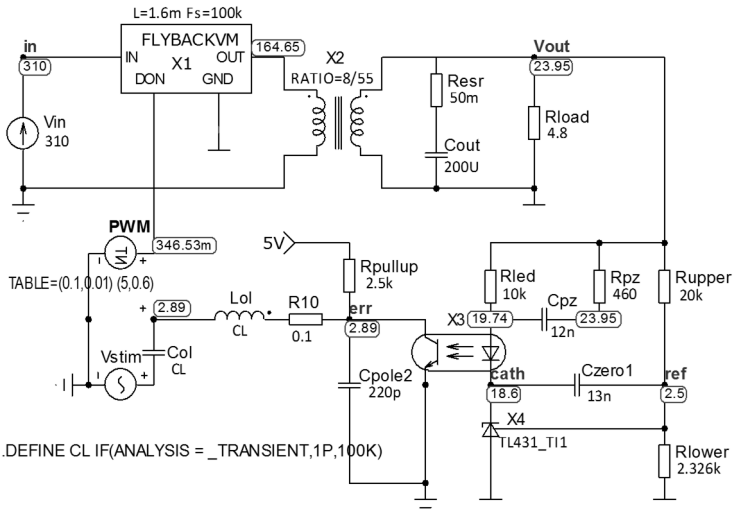


Рис. 1. Непрерывная модель ИСН на основе FLYBACK в режиме анализа Dynamic DC

- модель понижающего дросселя-трансформатора FLYBACK X2;
- выходной RC-фильтр Cout-Rload;
- делитель обратной связи Rupper-Rlower;

- усилитель сигнала рассогласования с оптоэлектронной развязкой на элементах Х3-Х4;
- непрерывную модель ШИМ-компаратора PWM.

Усилитель рассчитан по постоянному току с использованием методики [1], при учете того, что для его питания используется выходное напряжение стабилизатора 24 В, а выходной транзистор оптопары питается от низковольтного источника питания собственных нужд величиной 5 В. Результаты анализа стационарного режима ИСН (Dynamic DC) по его непрерывной модели (рис. 1) показывают, что расчет выполнен верно: напряжение на нагрузке стабилизатора стремится к заданным 24 В.

Без частотно-зависимых цепей усилителя (т.е. при запрете конденсаторов C_{pz}, C_{zero}, C_{pole1}) система неустойчива в динамических режимах и в ней возникают автоколебания (рис. 2).

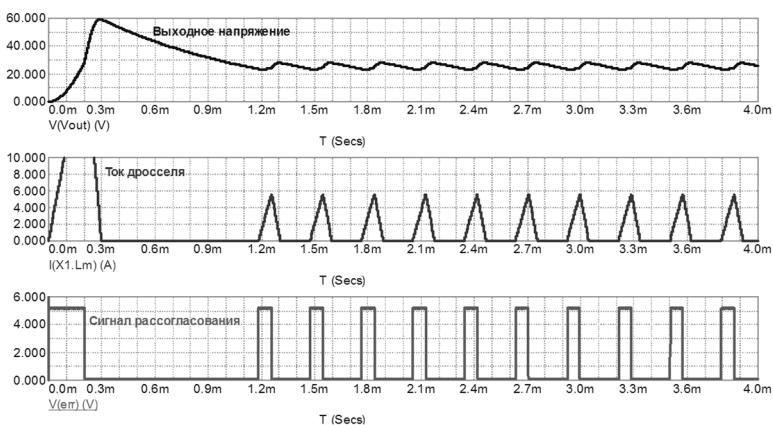


Рис. 2. Результаты анализа Transient ИСН без коррекции (C_{pz}, C_{zero}, C_{pole1} – запрещены)

Для коррекции системы по методике [2] необходимо сначала получить частотную характеристику собственно ППН. Она может быть снята в режиме частотного анализа схемы (рис. 1) для напряжения в узле Vout (рис. 3). По ней видно, что имеется двойной полюс на резонансной частоте LC-фильтра ППН $F_{pp}=1,3$ кГц и нуль на частоте $F_z=30$ кГц. Для того чтобы получить необходимую желаемую ЛАЧХ разомкнутого тракта, необходимо сформировать ЛАЧХ усилителя обратной связи два нуля – два полюса в порядке возрастания частот $F_{z1}-F_{z2}-F_{p1}-F_{p2}$ [2]. Данные частоты могут быть вычислены по характерным частотам ППН F_{pp} и F_z по следующим формулам:

$$F_{z1}=0,5F_{pp}; \quad F_{z2}=F_{pp}; \quad F_{p1}=F_z; \quad F_{p2}=10F_z.$$

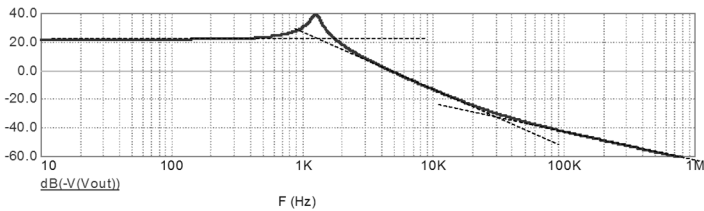


Рис. 3. АЧХ непрерывной модели ППН FLYBACK

По известным частотам двух нулей и полюсов усилителя по методике [2] могут быть рассчитаны элементы усилителя с оптоэлектронной развязкой на основе ИМС TL431, формирующие необходимую частотную характеристику: R_{PZ} , C_{PZ} , C_{ZERO1} , C_{POLE1} . Рассчитанные значения этих компонентов и представлены в схеме (рис. 1).

Частотная характеристика разомкнутого тракта (напряжения в узле *err*), снятая в режиме АС при наличии в схеме усилителя формирующих частотную характеристику компонентов (R_{PZ} , C_{PZ} , C_{ZERO1} , C_{POLE1}) свидетельствует о том, что система устойчива и имеет достаточный запас по фазе в 41° (рис. 4).

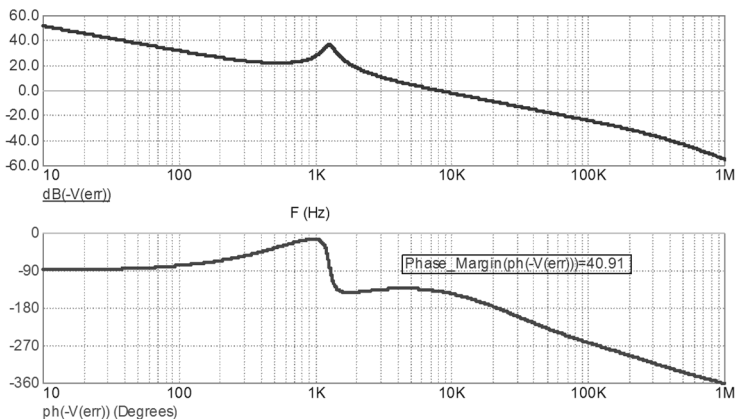


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ разомкнутой скорректированной системы

Однако характеристики рис. 4 свидетельствуют лишь об устойчивости в малом (т.е. при малых возмущениях в окрестности стационарного режима). Модель (рис. 1) является существенно нелинейной (нелинейна регулировочная характеристика преобразователя, в тракте присутствуют звенья с двусторонним ограничением сигнала: усилитель рассогласования и ШИМ). Поэтому окончательно её нужно испытать в режиме больших возмущений, одним из которых является старт ИСН из нулевых начальных условий при подаче питания. Такие временные диаграммы, снятые в режиме TRANSIENT (рис. 5), также свидетельствуют о нормальной работе ИСН.

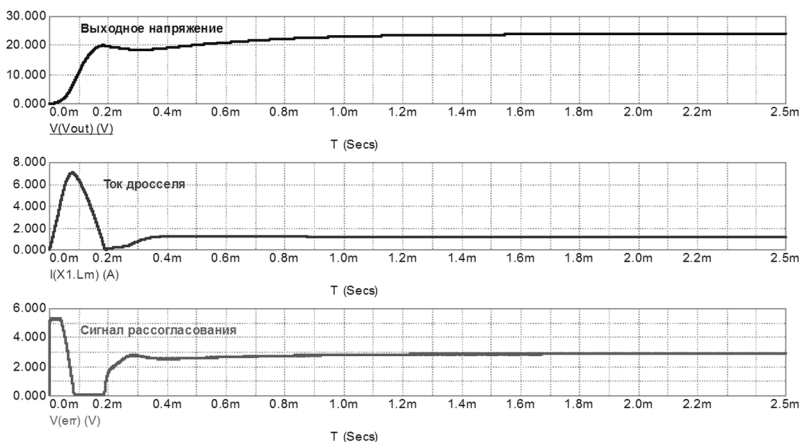


Рис. 5. Временные диаграммы старта ИСН (по непрерывной модели)

Следует отметить, что импульсные преобразователи напряжения по своей сути являются дискретными системами. Использование непрерывной модели является упрощающим допущением, поэтому результаты моделирования при быстрых внешних возмущениях могут отличаться от результатов эксперимента. Однако большинство преобразовательных устройств работают с возмущениями, постоянные времени которых много больше периода коммутации, и в этом случае использование непрерывной модели вполне оправдано. В частности, такую модель можно использовать при анализе режимов работы преобразовательных устройств, содержащих контроллеры управления мощными силовыми ключами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-07-00380 А.

Список литературы

1. Амелина, М.А. Методика расчета статического режима усилителя рассогласования на основе микросхемы TL431 / М.А. Амелина, А.И. Гатина // ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ-2015 – ЭИИ-2015: сборник трудов: В 2 т. – Смоленск: Универсум, 2015. – Т.1. – Секции 1,2,3,4. – 506 с.: ил. (с. 245–250).
2. Гатина, А.И. Звено коррекции на основе усилителя с оптоэлектронной развязкой для импульсного стабилизатора напряжения с режимом Voltage mode/ А.И. Гатина, М.А. Амелина // ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОНОМИКА / Сб. тр. XIII Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3 т. – 2016. – Т.2.– С. 37–40.
3. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М.А. Амелина, С.А. Амелин – Электрон. текстовые дан. – СПб. : Лань, 2014. – 632 с. Режим доступа: URL http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=53665

Материал поступил в редколлегию 12.10.18.