

Разработка и исследование системы управления преобразованием электроэнергии

А. В. Лилло¹, А. Д. Стоцкая²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹alexandr_934@mail.ru, ²inferum@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию характеристик и особенностей функционирования преобразователей электроэнергии и их систем управления. Для исследования взята структура преобразователя электроэнергии, основанная на типовом варианте построения импульсного понижающего преобразователя постоянного тока. Система управления используется для контроля параметров, выполнения диагностики и реализации требуемого режима работы преобразователя. Исследование проводится в системе Matlab с использованием среды Simulink. Основными критериями оценки при исследовании являются точность поддержания заданных параметров, и общее качество функционирования системы. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для уточнения структуры и параметров системы с её последующей аппаратной реализацией.

Ключевые слова: преобразование; электроэнергия; мощность; пульсации; система управления; Matlab

I. ВВЕДЕНИЕ

Питание практически всех потребителей электроэнергии связано с использованием источников и преобразователей питания. В качестве источников, как правило, используются химические элементы одноразового или многократного использования, а преобразователи представляют собой широкий класс электрических устройств, осуществляющих основные преобразования электроэнергии. К этому классу относятся выпрямители, фильтры, различные типы блоков питания [1], конвертеры (повышающие и понижающие преобразователи постоянного тока в постоянный), инверторы (преобразователи постоянного тока в переменный) [2], частотные преобразователи и прочие виды преобразовательных устройств [3]. Так как целью работы является исследование преобразователей, то источники питания далее не рассматриваются.

В зависимости от характеристик потребителей электроэнергии к преобразователям предъявляются определённые требования в отношении их видов и параметров. Широко распространены случаи, когда один преобразователь используется для питания множества устройств с различными электрическими параметрами (например, лабораторный блок питания). В силу

требований в подобных преобразователях часто используется независимая регулировка ограничений тока и напряжения во избежание выхода из строя потребителя и преобразователя. Такой подход позволяет индивидуально настраивать ограничения при питании каждого отдельного устройства. Подобным образом могут быть рассмотрены и преобразователи с постоянным выходным напряжением и ограничением тока, с той лишь разницей, что эти параметры являются нерегулируемыми. Однако с помощью обратной связи такая структура осуществляет лишь поддержание уровня выходного напряжения и довольно редко тока, что не всегда является достаточным условием для оптимальной работы некоторых устройств. Подобные преобразователи не позволяют поддерживать потребляемую устройством мощность, а, следовательно, и осуществлять управление ей. Кроме того, они неспособны выполнять диагностику нагрузки и адаптироваться к её типу, изменяя в соответствии с ним такие параметры как время переходных процессов, параметры фильтров, быстродействие, точность поддержания заданных значений и другие.

В качестве объекта исследования выбрана концепция преобразователя электроэнергии с системой автоматического управления, структура которого основана на типовом варианте построения импульсного понижающего преобразователя постоянного тока [3] с применением N-канального полевого транзистора в ключевом режиме работы.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Исследование преобразователя с системой управления проводилось на основе модели (рис. 1), построенной в системе Matlab с использованием среды Simulink. В рамках данной работы исследовалась модель с релейным законом управления и обратной связью по мощности. Внешние возмущающие воздействия и помехи при моделировании не учитывались [4], [5].

A. Объект управления

Модель преобразователя состоит из моделей его электронных компонентов, расположенных в библиотеке Simscape.

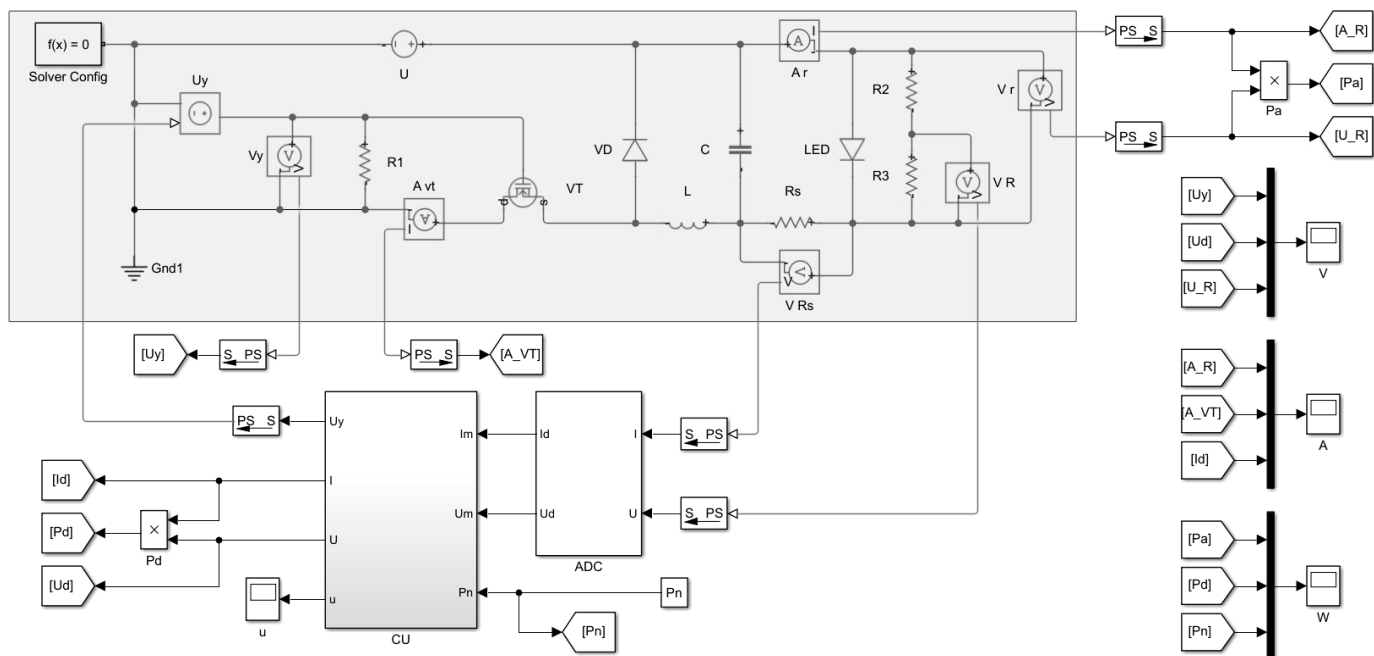


Рис. 1. Модель преобразователя с системой управления

Преобразователь включает в себя из следующие блоки:

- источник напряжения для питания нагрузки U ;
- источник U_y , напряжение которого изменяется в зависимости от сигналов, поступающих от системы управления;
- полевой транзистор VT , осуществляющий коммутацию цепи нагрузки;
- подтягивающий резистор $R1$;
- обратный диод VD ;
- конденсатор C и индуктивность L , образующие сглаживающий фильтр;
- нагрузку, представленную в данном случае элементом с нелинейной вольт-амперной характеристикой – мощным светодиодом LED ;
- шунт R_s , служащий для измерения тока в цепи нагрузки;
- резистивный делитель для измерения напряжения на нагрузке;
- и блок конфигурации параметров расчёта Solver Config.

Также используются блоки амперметров и вольтметров, преобразующие значения токов и напряжений в соответствующие физические сигналы и их последующее повторное преобразование в сигналы Simulink.

Основные характеристики модели транзистора соответствуют полевому транзистору IRF3205 и взяты из технической спецификации на него. Сопротивление

резистора $R1$ выбрано 10 кОм. Отношение сопротивлений резисторов $R2$ и $R3$ составляет 9:1 из расчёта, что опорное напряжение АЦП +5 В.

В. Система автоматического управления

Модель системы управления состоит из стандартных блоков Simulink, а также блоков Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter. Для удобства часть стандартных блоков объединена в две подсистемы: ADC – аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и CU – цифровой модуль, реализующий заданный закон управления [6], [7].

Поскольку в работе исследуется релейный закон управления, то цифро-аналоговое преобразование не требуется.

Значения токов, напряжений и мощностей в точках схемы, представляющих наибольший интерес, выводятся на блоки Scope.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ

В процессе исследования изменению подвергались следующие параметры:

- постоянная и переменная составляющая напряжения источника питания нагрузки;
- ёмкость конденсаторов и индуктивность катушки;
- частота коммутации транзистора;
- разрядность АЦП;
- время АЦ-преобразования и расчёта управляющего воздействия;

- значение мощности, подаваемой на нагрузку.

Основной задачей системы управления являлось поддержание на светодиоде задаваемой мощности. Номинальная мощность светодиода составляет 100 Вт и достигается при напряжении около +35 В. Система должна отслеживать потребляемую мощность и подавать управляющие импульсы на транзистор таким образом, чтобы мощность, потребляемая светодиодом была номинальной. Переходные процессы, возникающие вследствие инерционности фильтра, не учитывались.

Главным критерием качества работы системы являлась точность поддержания задаваемого значения мощности. Основные результаты исследования представляют собой зависимости пульсаций мощности от изменения следующих параметров:

- 1) частоты переключений транзистора;
- 2) ёмкости конденсатора и индуктивности катушки;
- 3) значения переменной составляющей напряжения источника питания нагрузки;
- 4) величины задаваемой мощности, подаваемой на нагрузку.

Зависимость от времени АЦ-преобразования и расчёта управляющего воздействия, а также от разрядности АЦП была опущена, поскольку первая может быть приближённо оценена по зависимости от частоты переключений транзистора, а АЦП с разрядностью 12 бит способен обеспечить ошибку измерения, не превышающую 0,025%. Использование АЦП с разрядностью 20 бит и более практически полностью исключает влияние преобразования на качество работы системы.

Для упрощения представления полученных результатов составлены табл. I с описанием параметров модели и соответствующих им обозначений и табл. II, содержащая информацию о значении параметров при исследуемых зависимостях.

ТАБЛИЦА I ОБОЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ.

Параметр моделирования	Обозначение
Величина постоянной составляющей напряжения источника питания нагрузки	U
Амплитуда переменной составляющей напряжения источника питания нагрузки	U _v
Частота переменной составляющей напряжения источника питания нагрузки	F _U
Частота переключений транзистора (частота импульсов управления)	F _{VT}
Ёмкость конденсатора	C
Внутреннее сопротивление конденсатора	R _C
Индуктивность катушки	L
Проводимость катушки	G
Время АЦ-преобразования и расчёта управляющего воздействия	t
Разрядность АЦП	N
Значение задаваемой мощности, подаваемой на нагрузку	P _n

ТАБЛИЦА II ОПИСАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Параметр моделирования	Исследуемая зависимость			
	1	2	3	4
U, В	+50	+50	+100	+50
U _v , В	0	0	50	0
F _U , Гц	0	0	500	0
F _{VT} , кГц	100-2000	1000	1000	1000
C, мФ	0,5-2,5	0,5-2,5	2	1
R _C , мОм	0,1	0,1	0,1	0,1
L, мГн	0,2-2	0,05-2	0,5	1
G, кСм	10	10	10	10
t, мкс	0,1	0,1	0,1	0,1
N, ед	16	16	16	16
P _n , Вт	100	100	100	5-1000

Зависимость пульсаций мощности от частоты переключений транзистора (рис. 2) получена для пяти сочетаний значений ёмкости (в мкФ) и индуктивности (в мГн):

1. C = 500, L = 200.
2. C = 1000, L = 650.
3. C = 1500, L = 1100.
4. C = 2000, L = 1550.
5. C = 2500, L = 2000.

Моделирование следующей зависимости (рис. 3) проводилось при значениях ёмкости конденсатора от 500 до 2500 мкФ с шагом 76,923 мкФ и значениях индуктивности катушки от 50 до 2000 мГн с шагом 75 мГн.

Исследование зависимости от величины переменной составляющей источника напряжения (рис. 4), также как и зависимости от величины задаваемой мощности (рис. 5) проводилось с допущением, что все элементы преобразователя рассчитаны на соответствующие токи и напряжения.

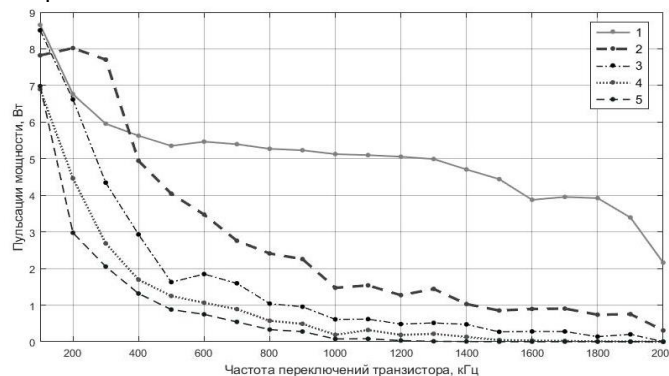


Рис. 2. Зависимость пульсаций мощности от частоты переключений транзистора

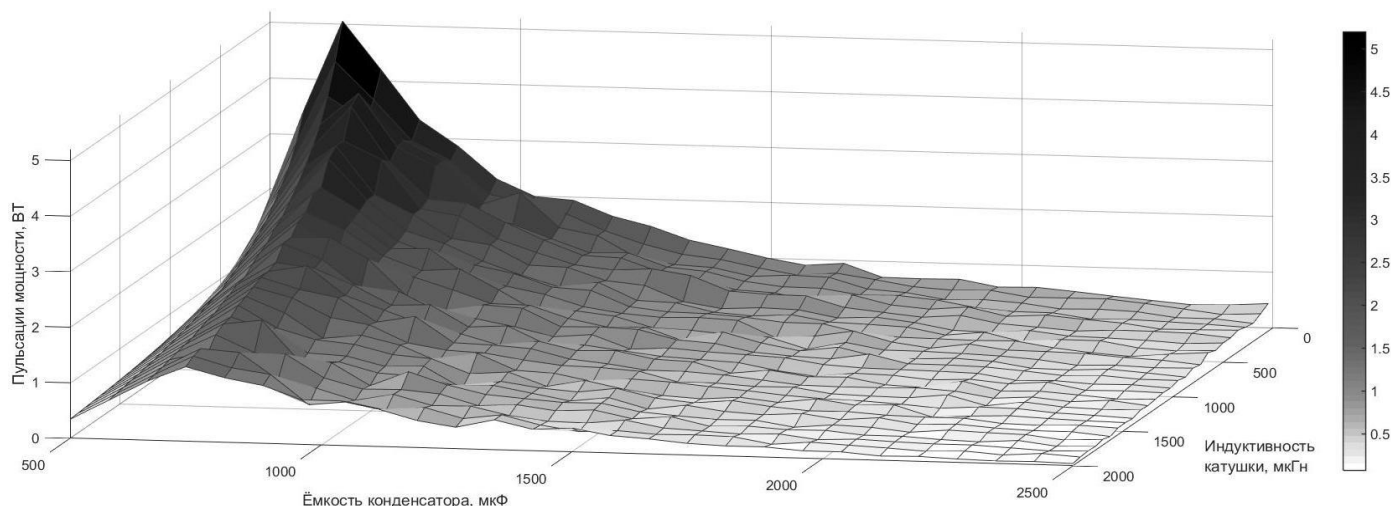


Рис. 3. Зависимость пульсаций мощности от значений ёмкости конденсатора и индуктивности катушки

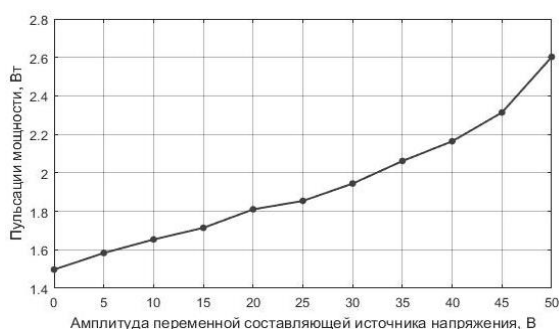


Рис. 4. Зависимость пульсаций мощности от величины переменной составляющей источника напряжения

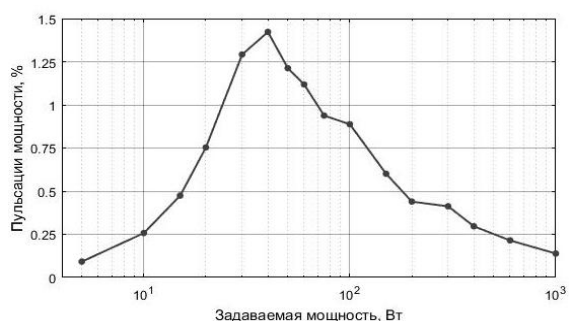


Рис. 5. Зависимость пульсаций мощности от величины задаваемой мощности

На основе результатов исследования можно сделать следующие выводы: полученные зависимости не противоречат теории, однако зависимость на рис. 5 имеет нестандартный вид с выраженным пиком при мощности 40 Вт; наибольшее влияние на точность работы системы оказывали частота переключений транзистора, а также ёмкость и индуктивность фильтра. Увеличение индуктивности приводило к уменьшению пульсаций тока, а увеличение ёмкости – к уменьшению пульсаций напряжения. Пульсации источника напряжения величиной 50% увеличивали пульсации мощности лишь на 30%.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была исследована модель преобразователя электроэнергии с системой управления. При исследовании был получен ряд зависимостей, позволяющих оценить качество работы системы при изменении некоторых параметров модели. В результате моделирования было установлено, что качество работы системы является достаточным для продолжения исследований в данном направлении. Далее планируется уточнить структуру модели, приблизить её к реальной системе, исследовать влияние изменения параметров нагрузки, а также помех и возмущений, рассмотреть другие алгоритмы управления [8] и провести их сравнительный анализ. Заключительным этапом станет аппаратная реализация прототипа системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Joosten P. Considerations When Specifying a DC Power Supply. URL: http://www.programmablepower.com/go/catalog/Xantrex_Programmable_Catalog_03.pdf (Дата обращения: 09.04.2018).
- [2] Liu J., Lap Wong K., Allen S., Mookken J. Performance Evaluations of Hard-Switching Interleaved DC/DC Boost Converter with New Generation Silicon Carbide MOSFETs. URL: https://www.mouser.com/pdfDocs/Cree-Power_Article_4.pdf (Дата обращения: 09.04.2018).
- [3] Коршунов А. Импульсные преобразователи напряжения переменного тока // Силовая электроника. 2006. № 1.
- [4] Эраносян С., Ланцов В. Импульсные источники питания с низким уровнем пульсаций и помех // Силовая электроника. 2008. № 3.
- [5] Артамонов О. Методика тестирования блоков питания. 02.11.2007 // Компания "Ф-Центр". URL: https://fcenter.ru/online/hardarticles/tower/22647-Metodika_testirovaniya_blokov_pitaniya#15 (Дата обращения: 08.04.2018).
- [6] Жданкин В. Цифровое управление преобразованием напряжения – это уже реальность // Силовая электроника. 2009. № 1. С. 28-32.
- [7] Poole I. Digital Power Supply. Radio-Electronics.com. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/power-management/digital-power-supply/basics-tutorial.php> (Дата обращения 10.04.2018)
- [8] Ramus X. Voltage feedback vs. current feedback amplifiers: Advantages and limitations. 26.02.2009. URL: https://iee.li/pdf/viewgraphs/current_feedback_vs_voltage_feedback_amplifiers.pdf. (Дата обращения: 10.04.2018)