

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРЕХКАНАЛЬНОГО ШИМ-КОНТРОЛЛЕРА В MULTISIM

Федоров Сергей Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, филиал Уфимского государственного авиационного технического университета, Кумертау
e-mail: proinfosystem@gmail.com

Аннотация. В данной статье проводятся исследования влияния алгоритмов ШИМ на качество выходного напряжения преобразователей. Для этого была рассмотрена обобщенная структурная схема широтно-импульсного преобразователя (ШИП). В ее структуре была выделена схема трехканального ШИМ-контроллера. При выборе программы для имитационного моделирования был проведен анализ существующих систем автоматизированного проектирования (САПР). Был выбран программный пакет Multisim 14.0, т. к. этот пакет наиболее прост в освоении и наиболее полно отвечает требованиям разработки. Была разработана схема имитационной модели трехканального ШИМ-контроллера в Multisim с целью оценки эффективности алгоритмов ШИМ, обеспечивающих улучшение спектрального состава выходного напряжения и управление передаточной характеристикой. Приведенная модель позволяет провести детальный анализ работы трехканального ШИМ-контроллера. На основе имитационной модели показано влияние ШИМ на качество выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя. Было доказано, что ШИМ приводит не к уменьшению искажения синусоидальности сигнала, а к смещению гармоник в области частот, кратных несущей частоте. Коэффициент гармоник принимает значения в пределах $64,9\% \geq K_r \geq 63,5\%$ для диапазона частот $50 \text{ Гц} \geq \nu > 5 \text{ Гц}$. При этом ШИМ вносит дополнительные искажения сигнала и, как следствие, увеличение коэффициента гармоник.

Ключевые слова: ШИМ-контроллер, имитационная модель, Multisim, синхронизирующая функция, модулирующая функция.

Для цитирования: Федоров С. В. Разработка имитационной модели трехканального ШИМ-контроллера в Multisim // Шаг в науку. – 2022. – № 2. – С. 16–22.

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF A THREE-CHANNEL PWM CONTROLLER IN MULTISIM

Fedorov Sergey Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft Production Technology, branch of the Ufa State Aviation Technical University, Kumertau
e-mail: proinfosystem@gmail.com

Abstract. This article studies the influence of PWM algorithms on the quality of the output voltage of converters. For this, a generalized block diagram of a pulse-width converter (PWM) was considered. In its structure, a three-channel PWM controller circuit was highlighted. When choosing a program for simulation modeling, an analysis of existing computer-aided design systems (CAD) was carried out. The Multisim 14.0 software package was chosen, because this package is the easiest to learn and most fully meets the development requirements. A simulation model of a three-channel PWM controller in Multisim was developed to evaluate the effectiveness of PWM algorithms that improve the spectral composition of the output voltage and control the transfer characteristic. The above model allows a detailed analysis of the operation of a three-channel PWM controller. Based on the simulation model, the influence of PWM on the quality of the output voltage of a pulse-width converter was shown. It was proved that PWM does not lead to a reduction in the distortion of the sinusoidal signal, but to a shift in harmonics in the region of frequencies that are multiples of the carrier frequency. The harmonic coefficient takes values within $64.9\% \geq K_r \geq 63.5\%$ for the frequency range $50 \text{ Hz} \geq \nu > 5 \text{ Hz}$. In this case, PWM introduces additional signal distortions and, as a result, an increase in the harmonic coefficient.

Key words: PWM controller, simulation model, Multisim, synchronizing function, modulating function.

Cite as: Fedorov, S. V. (2022) [Development of a simulation model of a three-channel PWM controller in Multisim]. *Shag v nauku* [Step into Science]. Vol. 2, pp. 16–22.

Одним из основных критериев при проектировании элементов системы управления широтно-импульсного преобразователя является качество выходного напряжения.

Существующие способы улучшения качества выходного напряжения в преобразователях можно поделить на две категории. Это изменение силовой схемы или изменение системы управления преобразователя.

Одним из способов формирования сигнала в системе управления силовыми ключами преобразователя является использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1,7].

Одним из наиболее важных критериев выбора алгоритма ШИМ является качество выходного напряжения, которое оценивается по спектральному составу или интегральной величине отклонения мгновенных значений выходного напряжения от желаемых средних значений за период модуляции. Для повышения качества выходного напряжения требуется уменьшение периода модуляции, которое ограничивается динамическими возможностями

выбранного способа ШИМ, динамическими возможностями силовых полупроводниковых ключей и ростом дополнительных коммутационных потерь.

В связи с этим создание эффективных алгоритмов ШИМ, позволяющих не только повышать качество выходного напряжения, но и осуществлять управление передаточной характеристикой, является весьма актуальной задачей.

Целью данного исследования является определение влияния алгоритмов ШИМ на качество выходного напряжения преобразователей.

Известны способы ШИМ, основанные на сравнении синхронизирующих сигналов с сигналом модуляции (рисунок 1). Процесс сравнения производится на каждом тактовом интервале ШИМ при любой форме представления сигналов, цифровой или аналоговой, и формально сводится к решению уравнения

$$M(t)=f(t),$$

где

$M(t)$ – модулирующая функция;
 $f(t)$ – синхронизирующая функция.

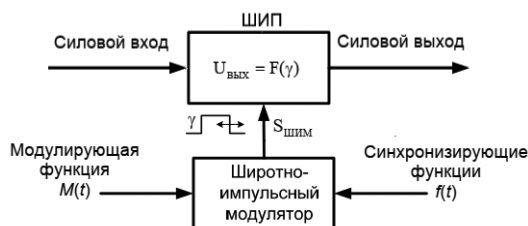


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема широтно-импульсного преобразователя (ШИП)

Источник: разработано автором на основе [5]

Структурная схема устройства трехканального ШИМ-контроллера для системы управления преобразователем по принципу ШИМ приведена на ри-

сунке 2, а. На рисунке 2, б приведены диаграммы 3-фазной синусоидальной ШИМ [10].

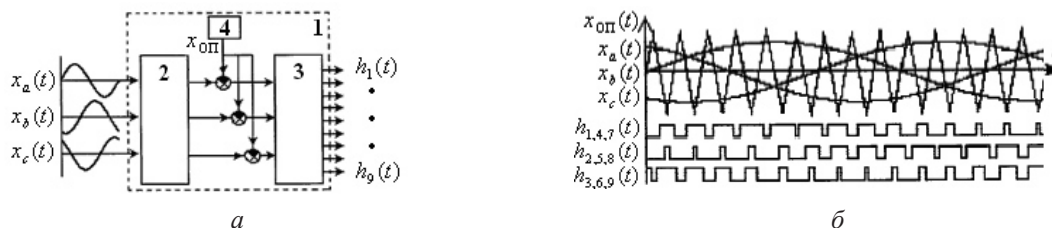


Рисунок 2. Структурная схема устройства трехканального ШИМ-контроллера:

а – структура устройства формирования управляющих импульсов;

б – диаграммы 3-фазной синусоидальной ШИМ

Источник: взято из [10]

Схема системы управления 1 (рисунок 2, а) содержит блок 2 (рисунок 2, а), на входы которого подается 3-фазный сигнал $x_a(t)$, $x_b(t)$, $x_c(t)$, гармонической формы. Блок 3 является модулятором-распределителем (рисунок 2, а), на входах которого

происходит сравнение модулирующих и поступающего из блока 4 (рисунок 2, а) опорного $x_{оп}(t)$ сигналов, результатом которого является получение на выходах блока 3 (рисунок 2, а) последовательно из 9 управляющих импульсов $h_1(t) - h_9(t)$.

В настоящей работе синтезируется имитационная модель трехканального ШИМ-контроллера на мощных МОП-транзисторах, которые получили широкое применение в преобразовательных устройствах силовой электроники.

Одним из способов анализа эффективности вы-

бранного алгоритма ШИМ является имитационное моделирование ШИМ-контроллера, реализующего тот или иной алгоритм ШИМ. В данной статье была синтезирована имитационная модель трехканального ШИМ-контроллера, представленная на рисунке 3.

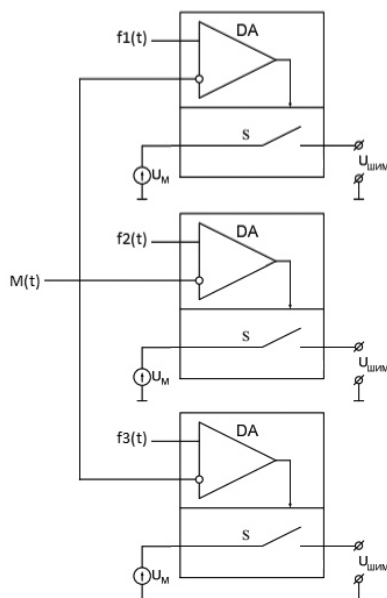


Рисунок 3. Трехканальный ШИМ-контроллер
 Источник: разработано автором на основе [6]

Данный ШИМ-контроллер является однополярным на базе дифференциальных компараторов DA, где

- $f1(t), f2(t), f3(t)$ – синхронизирующие функции;
- $M(t)$ – модулирующая функция;
- S – ключи.

В качестве синхронизирующего сигнала было

использовано линейное напряжение [5, 6, 9].

В качестве модулирующей функции была выбрана функция в виде синусоиды [2, 3, 10].

При выборе программы для имитационного моделирования был проведен анализ существующих систем автоматизированного проектирования (САПР) (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики САПР

Наименование ПО	Разработка печатных плат	Моделирование	Моделирование по постоянному току	Моделирование по переменному току	Создание схем
OrcadLite 16.5	+	+	+	+	+
Eagle 6.2.0	+	-	-	-	+
Qucs 0.0.16	-	+	+	+	+
Multisim 14.0	-	+	+	+	+

Рассмотрев характеристики программных пакетов САПР, применяемых в области электроники, для создания и моделирования заданной схемы был выбран программный пакет Multisim 14.0, т. к. этот пакет наиболее прост в освоении и наиболее

полно отвечает требованиям разработки.

Схема имитационной модели трехканального ШИМ-контроллера в Multisim приведена на рисунке 4.

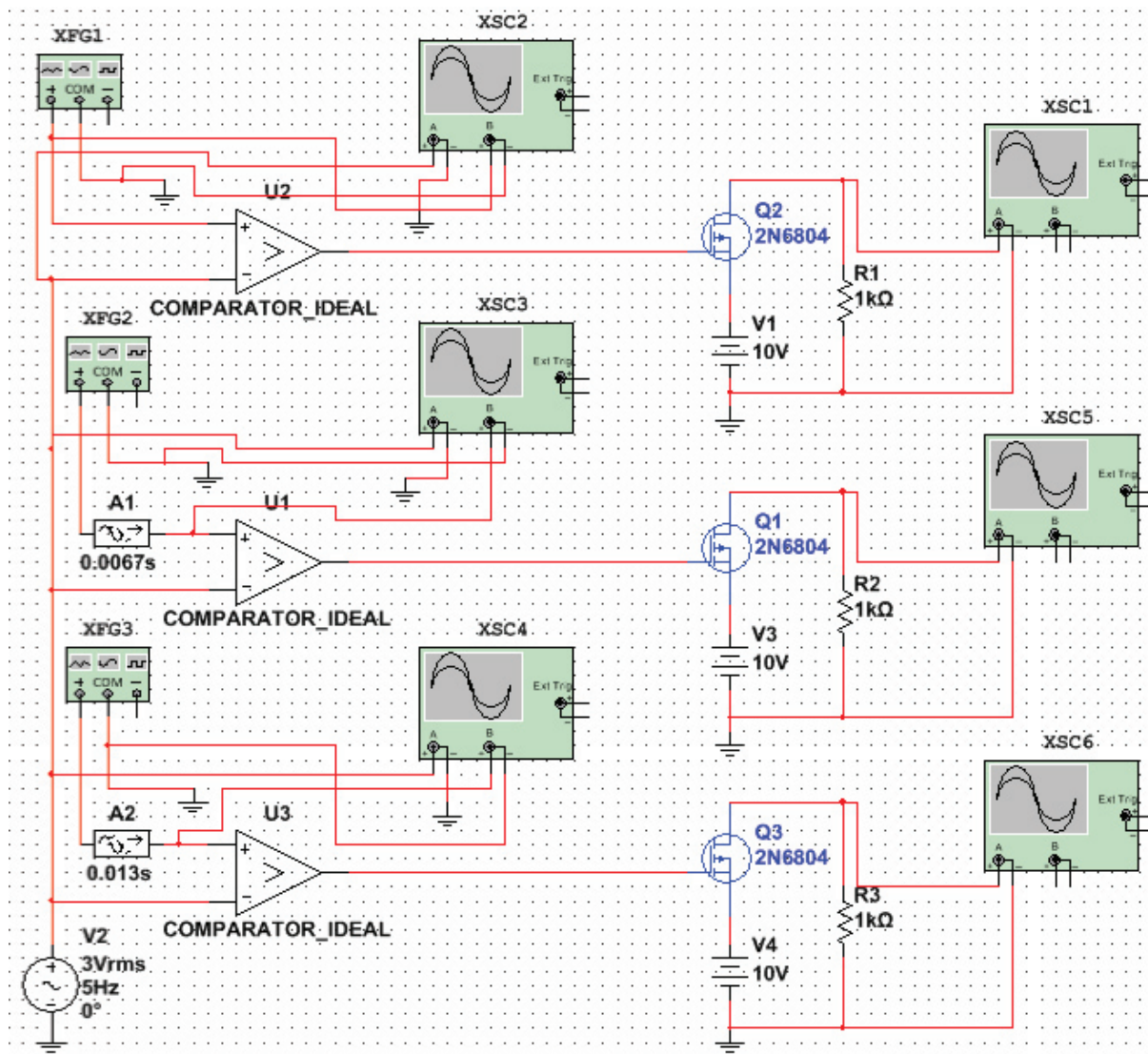


Рисунок 4. Схема трехканального ШИМ-контроллера в Multisim
 Источник: разработано автором

В качестве сигнала модуляции был взят источник синусоидального напряжения V2 с напряжением 3 В и частотой 5 Гц. Синхронизирующие функции реализованы генераторами пилообразного напряжения XFG1, XFG2, XFG3. Сдвиги фаз на углы $2\pi/3$ и $2\pi/4$ были реализованы устройствами задержки A1 и A2. Ключи S реализованы на базе транзисторов Q1, Q2, Q3. В качестве компараторов были выбраны идеальные компараторы из библиотеки Multisim [4, 8].

Результат имитационного моделирования в первом канале, отображаемый на осциллографе XSC2, приведен на рисунке 5. Здесь синусоидальный сигнал представляет собой модулирующую функцию амплитудой 3 В и частотой 5 Гц. Пилообразное напряжение представляет собой синхронизирующий сигнал с нулевым фазовым сдвигом.

Результат имитационного моделирования во вто-

ром канале, отображаемый на осциллографе XSC3, приведен на рисунке 6. В данном случае сдвиг фазы синхронизирующей пилообразной функции составляет $2\pi/3$.

Результат имитационного моделирования в третьем канале, отображаемый на осциллографе XSC4, приведен на рисунке 7. Сдвиг фазы синхронизирующей пилообразной функции составляет $4\pi/3$.

Результат имитационного моделирования, отображаемый на осциллографе XSC1, приведен на рисунке 8.

Результат имитационного моделирования, отображаемый на осциллографе XSC5, приведен на рисунке 9.

Результат имитационного моделирования, отображаемый на осциллографе XSC6, приведен на рисунке 10.

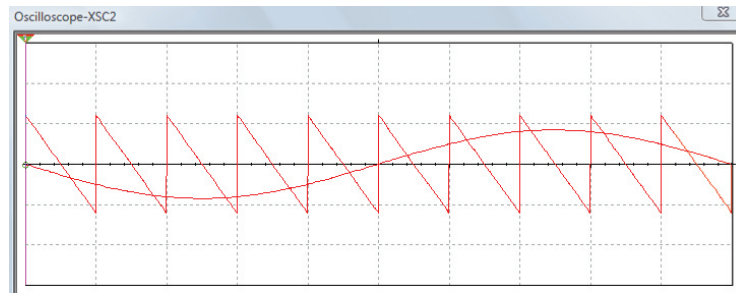


Рисунок 5. Графики модулирующей и синхронизирующей функций
Источник: разработано автором

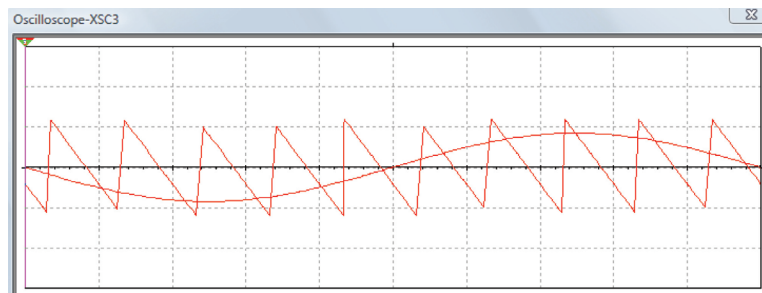


Рисунок 6. Графики модулирующей и синхронизирующей функций
Источник: разработано автором

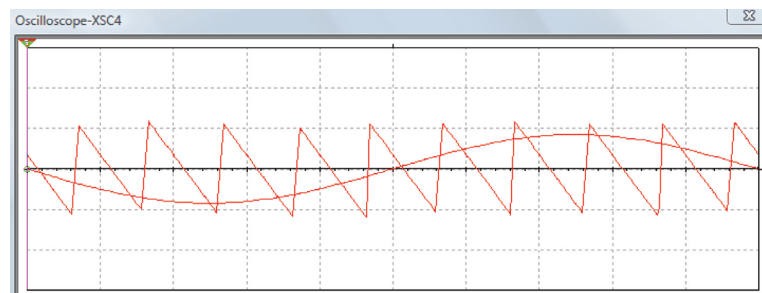


Рисунок 7. Графики модулирующей и синхронизирующей функций
Источник: разработано автором

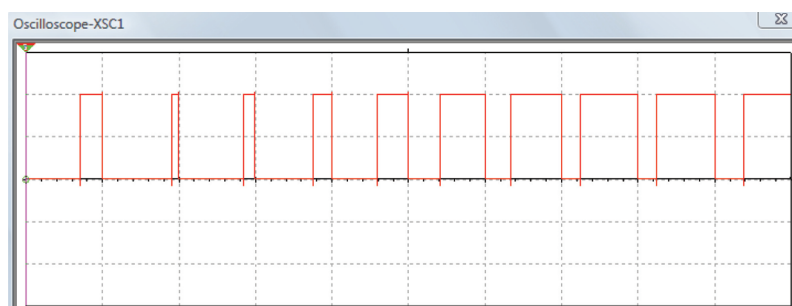


Рисунок 8. График сигнала однополярной широтно-импульсной модуляции
Источник: разработано автором

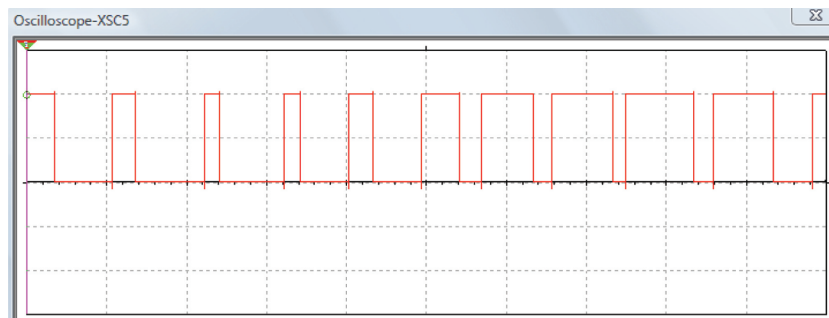


Рисунок 9. График сигнала однополярной широтно-импульсной модуляции
 Источник: разработано автором

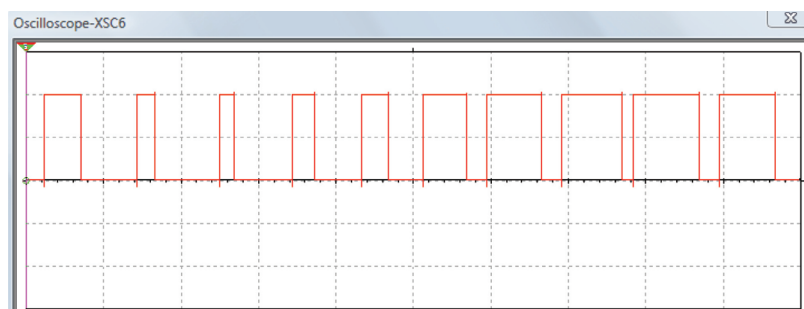


Рисунок 10. График сигнала однополярной широтно-импульсной модуляции
 Источник: разработано автором

В результате исследования была разработана имитационная модель широтно-импульсного модулятора, позволяющая проводить математические эксперименты с целью исследования степени влияния на выходную ШИМ-последовательность параметров аналоговых компараторов (операционных усилителей), силовых транзисторов в качестве нагрузки для уточнения и оптимизации режимов функционирования на заключительном этапе инженерного проектирования. Данная имитационная модель в отличие от аналогичной модели, разработанной и исследованной в работе [6], позволяет реализовать трехканальную ШИМ-модуляцию. Что является необходимым для дальнейшего построения систем управления преобразователями.

Вывод

Разработанная схема имитационного моделирования в Multisim позволяет исследовать влияние различных алгоритмов ШИМ на сигнал с выхода трехканального ШИМ-контроллера. Данная модель позволяет использовать синусоидальные синхронизирующие функции положительного и отрицательного типа, линейные синхронизирующие функции положительного и отрицательного типа. А также широчайший спектр моделирующих функций, таких как: треугольная, линейная, прямоугольная, синусоидальная функции. Разработанная модель

позволяет провести детальный анализ работы трехканального ШИМ-контроллера, оптимизировать выбор элементной базы.

В работе [10] на основе имитационной модели было показано влияние ШИМ на качество выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя. Было доказано, что ШИМ приводит не к уменьшению искажения синусоидальности сигнала, а к смещению гармоник в области частот, кратных несущей частоте. Коэффициент гармоник принимает значения в пределах $64,9\% \geq K_r \geq 63,5\%$ для диапазона частот $50 \text{ Гц} \geq \nu > 5 \text{ Гц}$. При этом ШИМ вносит дополнительные искажения сигнала и, как следствие, увеличение коэффициента гармоник. Так K_r принимает значения в пределах $51,1\% \geq K_r \geq 39,1\%$ для диапазона частот $50 \text{ Гц} \geq \nu > 5 \text{ Гц}$ без ШИМ.

В работе [4] на основе имитационной модели доказано, что ШИМ с функциональной разверткой опорного сигнала позволяет, в отличие от известных методов ШИМ с линейной разверткой, управлять передаточной характеристикой «сигнал управления – выходное напряжение» путем изменения вида функциональной зависимости на периоде модуляции и расширять за счет этого на (10–40)% диапазон регулирования выходного напряжения ШИП с нелинейной регулировочной характеристикой.

Литература

1. Алпаров А. У., Благов А. Е. Модифицированная реверсивная широтно-импульсная модуляция // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 10 (58). – С. 42–54.
2. Джюджи Л., Пели Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Теория, характеристики, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
3. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. – М.: «Энергия», 1977. – 280 с.
4. Катков О. Н., Рыжков А. П., Сафронова Н. А. Особенности моделирования электронных элементов в среде Multisim // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021: Сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т. (Рязань, 03–05 марта 2021 г.). – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2021. – С. 150–152.
5. Кувшинов А. А. Разработка и исследование методов коммутационно-логического управления передаточными характеристиками широтно-импульсных преобразователей: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05. – Тольятти, 2009. – 202 с.
6. Кувшинов А. А., Абрамов Г. Н. Разработка имитационной модели релейного ШИМ-контроллера в стандарте SPICE // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: труды международной «Конференции по логике, информатике, науковедению – КЛИН-2007» (Ульяновск, 17–18 мая 2007 г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Том 3. – С. 149–156.
7. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора / И. Р. Абулвелеев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4 (33). – С. 72–77.
8. Рахман П. А., Федоров В. М., Хасанова Л. Р. Исследование работы широтно-импульсного модулятора в программном пакете моделирования электронных схем MULTISIM // Малоотходные, ресурсосберегающие химические технологии и экологическая безопасность – 2020. Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 556–559.
9. Федоров С. В. Разработка и моделирование универсального алгоритма функционирования устройства формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты на основе прямого преобразования сигнала // Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журн. / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас». – 2020. – № 3 (179). – С. 34–37.
10. Федоров С. В. Устройство формирования переключающих функций управляющего блока матричного преобразователя частоты для системы частотного управления электроприводом: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05. – Уфа, 2015. – 171 с.

Статья поступила в редакцию: 03.06.2021; принята в печать: 01.06.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.