

УДК 621.314

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ДВУХУРОВНЕВОГО
АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ
С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Дунаев Михаил Павлович

Д.т.н., профессор, e-mail: mdunaev10@mail.ru,

Довудов Сарфароз Умедович

Аспирант, e-mail: dsu_1991@mail.ru,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83.

Аннотация. Научная статья посвящается моделированию однофазного двухуровневого инвертора напряжения (АИН) с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Модель реализована в среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscape. Описаны основные элементы библиотеки Simscape. Разработана и смоделирована схема АИН с ЧИМ с использованием блоков из библиотеки Simscape. Полученные диаграммы АИН с ЧИМ показали, что частота в середине периода ЧИМ в 3 раза больше относительно краев. Также получены диаграммы тока и напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке АИН.

Ключевые слова: частотно-импульсная модуляция; широтно-импульсная модуляция; частота; моделирование.

Цитирование: Дунаев М. П., Довудов С. У. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 134 – 143. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.011

Введение. Преобразование постоянного напряжения в переменное может осуществляться с помощью инвертора, выполненного на транзисторных модулях IGBT [7]. Одним из наиболее простых преобразователей этого типа является однофазный двухуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [9, 10], схема которого представлена на рисунке 1.

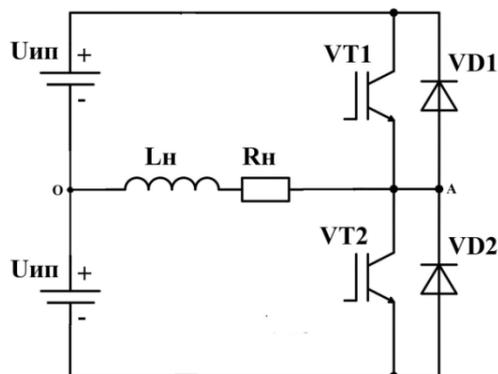


Рис. 1. Схема однофазного АИН

Инвертор (рисунок 1) питается от двух источников напряжения постоянного тока ($U_{ип}$). АИН содержит два полупроводниковых ключа из IGBT-транзисторов ($VT1$ и $VT2$), к которым встречно подключены диоды обратного тока ($VD1$ и $VD2$). Нагрузка инвертора (R_n , L_n) включена между средней точкой источника питания и общей точкой включения транзисторов $VT1$, $VT2$.

У АИН с ШИМ имеется ряд недостатков [3], основным из которых является снижение к.п.д. преобразователя. Можно повысить к.п.д. преобразователя, если использовать в инверторах для управления полупроводниковые ключи с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) [2, 4, 5, 14].

Частотно-импульсная модуляция - это тип модуляции, где время (ширина) импульса $t_{и}$ остается постоянной и меняется только время паузы $t_{п}$ [2, 3]. Фактически меняется период выходного напряжения, соответственно меняется и частота выходного напряжения. На рис. 2 показаны диаграммы формирования напряжения для управления полупроводниковых ключей инверторов методом частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). В ЧИМ модулируемый сигнал $U(t)$ является синусоидальным и при фиксированной ширине импульса с увеличением амплитуды $U(t)$, ширина паузы между импульсами уменьшается, то есть ширина паузы обратно пропорциональна амплитуде модулируемого сигнала $U(t)$. С увеличением амплитуды $U(t)$ период ЧИМ уменьшается, соответственно увеличивается частота.

Максимальная частота в ЧИМ получается при максимальной амплитуде модулируемого сигнала $U(t)$.

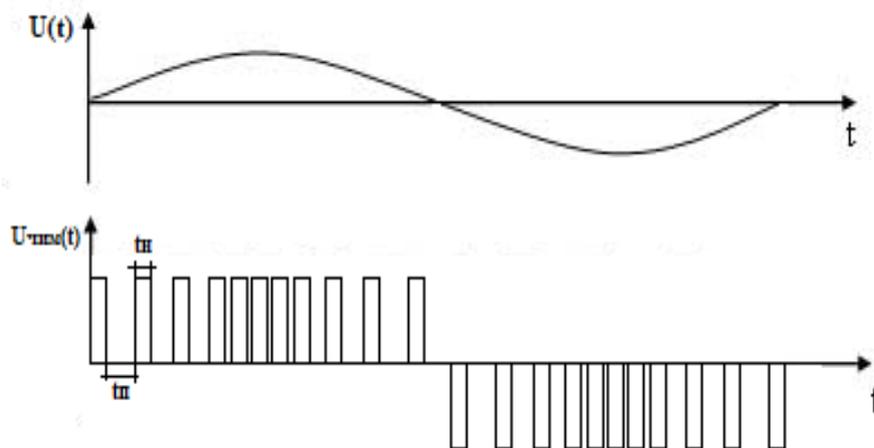


Рис. 2. Диаграммы формирования частотно-импульсной модуляции

Для генератора прямоугольных импульсов, показанного на рис. 3, частота колебаний обратно пропорциональна емкости:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Таким образом, увеличение управляющего напряжения увеличивает частоту колебаний и наоборот. Постоянные резисторы R_1 , R_2 выведены на внешнюю линию управления $V_{control}$. Напряжение, при котором C_1 и C_2 разрядятся через R_1 и R_2 , изменяется с изменением напряжения $V_{control}$. Следовательно, скорость разряда увеличивается с увеличением $V_{control}$.

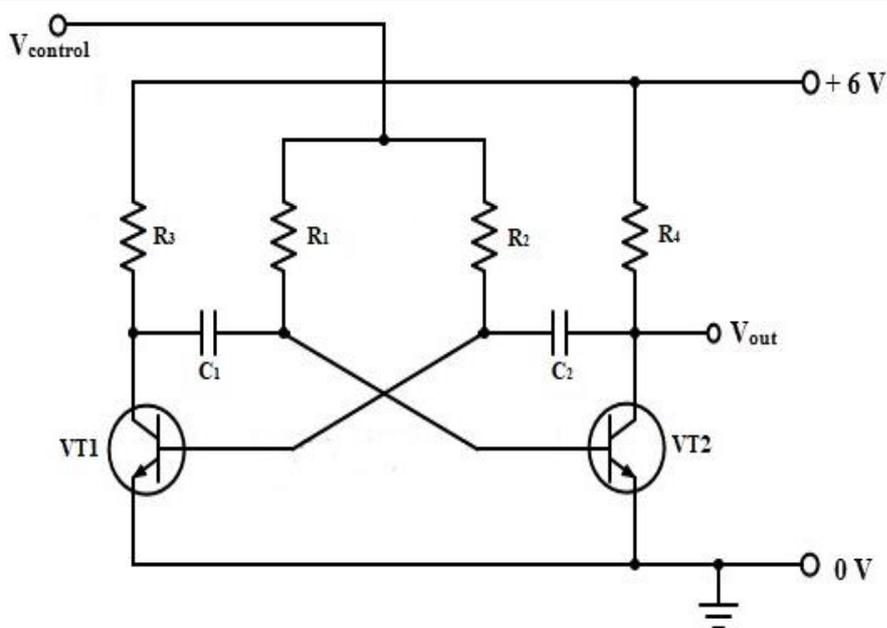


Рис. 3. Генератор прямоугольных импульсов с регулированием частоты

Моделирование АИН с ЧИМ. В среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscare [6] смоделирована схема однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ, которая приведена на рисунке 4.

Модель содержит следующие блоки:

- Блок регулирования U_y - напряжение управления, которое является синусоидальным и изменяется в функции

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где U_m – амплитудное значение, ω - угловая частота, φ_0 - начальная фаза.

Модель блока напряжения управления показана на рис. 5.

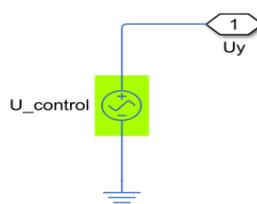


Рис. 5. Блок напряжения управления

- Блок формирования ЧИМ (PFM) смоделирован согласно схеме рис. 3 с использованием блоков из библиотеки Simscare и показан на рис. 7.

Simscare – это среда для построения и моделирования физических систем. Базовая библиотека блоков Simscare расширяется на несколько специализированных библиотек, таких как: Foundation Library, Driveline, Electrical, Fluids, Multibody и др. В данной среде можно разрабатывать электронные, электромеханические, электрические, механические, гидравлические, термальные и другие виды систем.

При моделировании в Simscare используется блок, который соответствует физическим элементам, таким как: двигатели, резисторы, транзисторы, тиристоры, конденсаторы. При соединении их линиями, получается модель физического соединения, по которой передается сигнал. В модели Simulink-е, при соединении блоков у линий имеются стрелки [1, 8, 12]. Это означает, что сигналы передаются только в одном направлении, т.е.

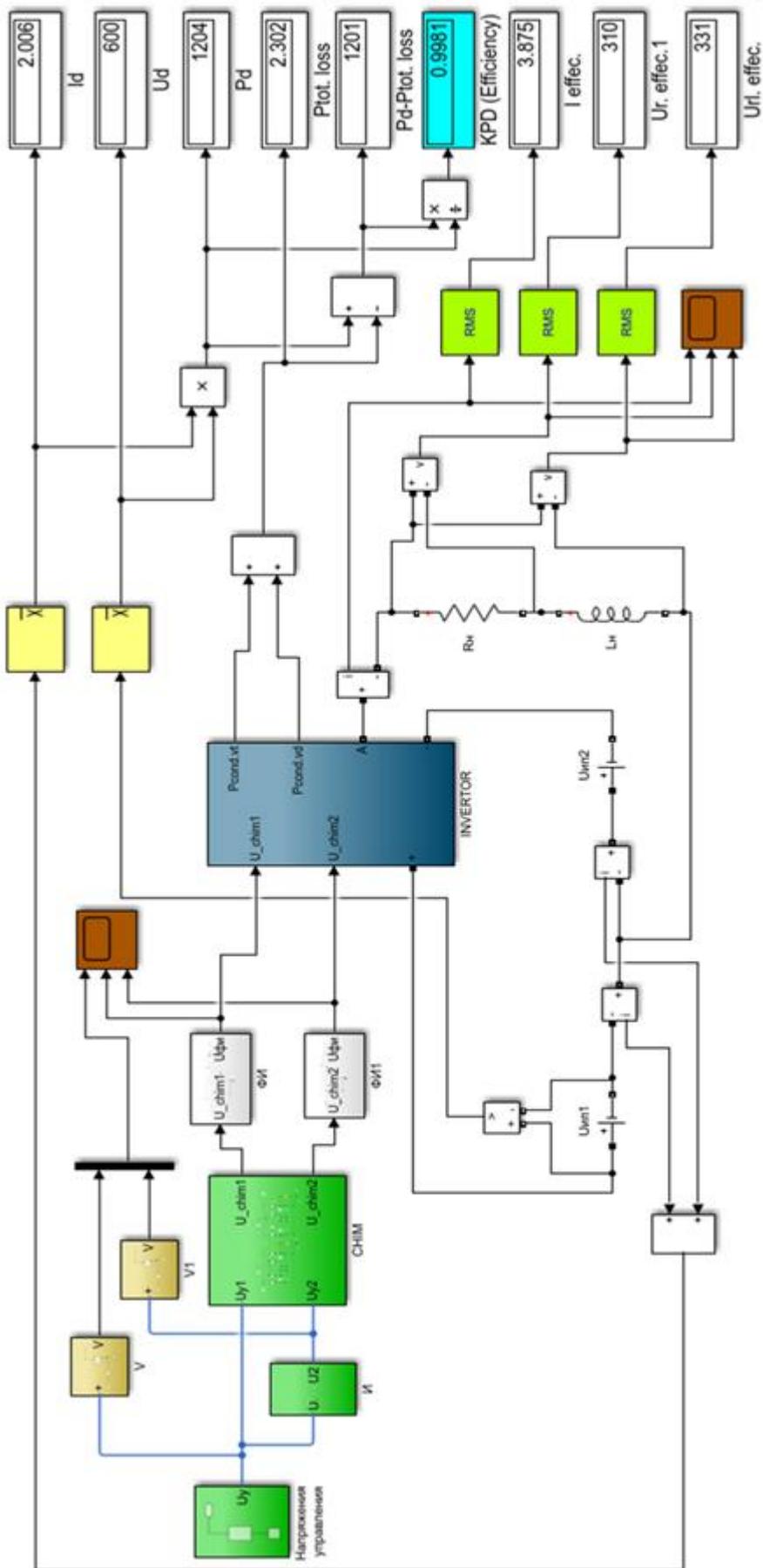


Рис. 4. Модель однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ

поток энергии является однонаправленным. В отличие от Simulink-а, в модели Simscape линии, которые соединяют физические элементы, не имеют стрелок и поток энергии является двунаправленным.

Основные элементы, которые используются в Simscape модели для измерения, показаны на рис. 6. Это блоки Current Sensor (датчик тока) и Voltage Sensor (датчик напряжения), которые являются идеальными датчиками. Датчик тока и напряжения преобразуют ток и напряжение, измеренные в любой электрической ветви, в сигнал, пропорциональный току и напряжению.

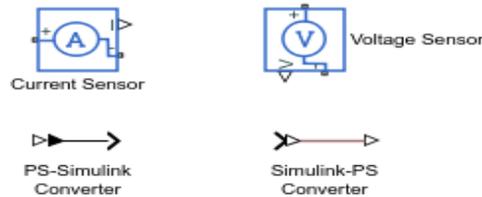


Рис. 6. Основные элементы Simscape

Для того чтобы конвертировать физический сигнал в выходной сигнал Simulink или входной сигнал Simulink в физический сигнал, используется PS-Simulink Converter и Simulink-PS Converter. Эти блоки преобразуют физический сигнал в Simulink выходного сигнала и наоборот - входной Simulink сигнал в физический сигнал.

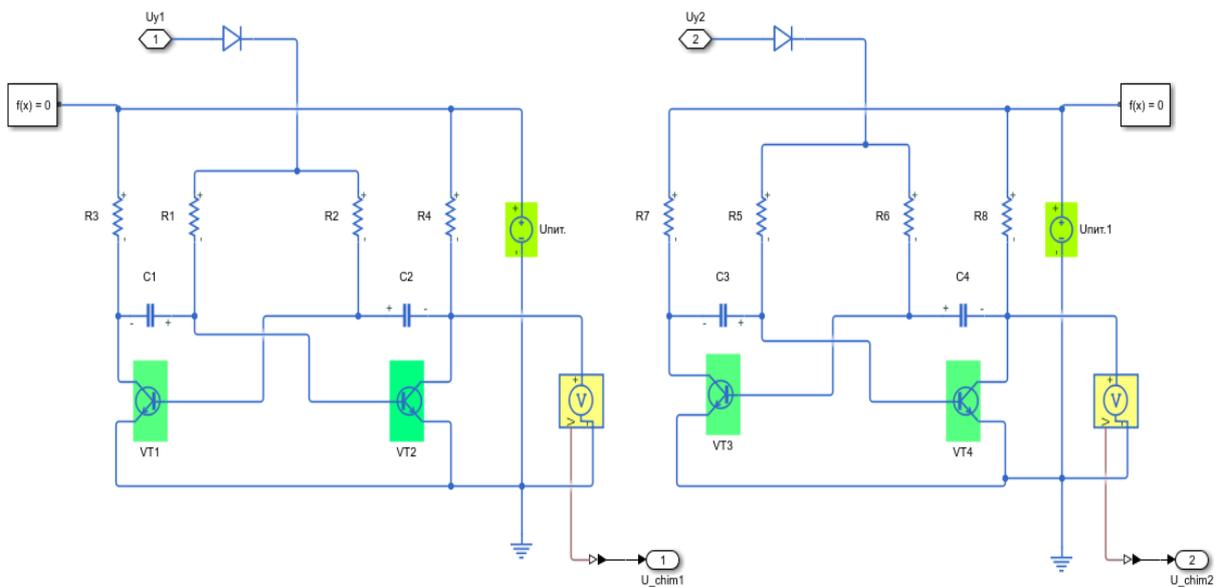


Рис. 7. Частотно-импульсная модуляция

Параметры элементов, которые использовались в модели ЧИМ (рис.7) показаны в таблице 1. Транзисторы V1- V4- это биполярные транзисторы n-p-n типа. Полученные диаграммы ЧИМ показаны на рис. 9. Как видно из диаграммы, моделирующая напряжения является одновременно и напряжением управления, которое является синусоидальной и изменяется по закону:

$$U = 41,5 \sin(2\pi f),$$

где $f = 50$ Гц, $U_m = 41,5$ В.

Таблица 1. Параметры элементов модели ЧИМ

Uпит., В	R1, R5	R2, R6	R3, R7	R4, R8	C1, C3	C2, C4
	кОм				нФ	
6	23	130	2	1	75	15

С увеличением амплитуды напряжения управления выходная частота ЧИМ также увеличивается. В нашем случае частота на краях периода ЧИМ равна 0,7 кГц, а в середине 2,2 кГц. Таким образом, частота в середине периода получается в 3 раза больше, чем на краях.

• Блок силовой схемы (INVERTOR), который показан на рис. 8, состоит из IGBT-транзисторов и обратных диодов; активно-индуктивной нагрузки R_n, L_n ; двух источников постоянного тока; комплекса измерительных приборов.

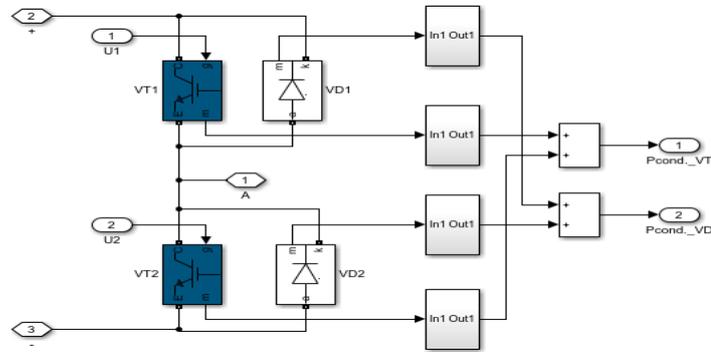


Рис. 8. Модель однофазного двухуровневого АИН

Модель на рис. 8 позволяет вычислять статические потери [11, 13, 15] IGBT-транзисторов и диодов.

Результаты моделирования. Модель АИН с ЧИМ позволяет определить среднее и действующее значение напряжения и тока в нагрузке, мощность источника, мощность нагрузки и к.п.д. преобразователя. Результаты моделирования показаны на рис. 9 и 10.

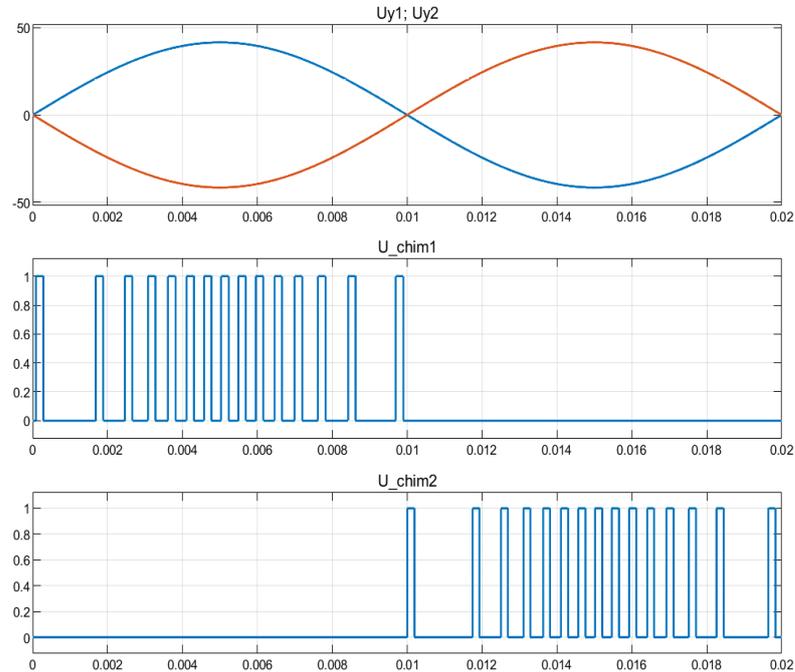


Рис. 9. Результаты моделирования. Первая диаграмма - напряжения управления U_{y1}, U_{y2} , вторая и третья диаграммы - функции состояния транзисторов АИН в режиме ЧИМ

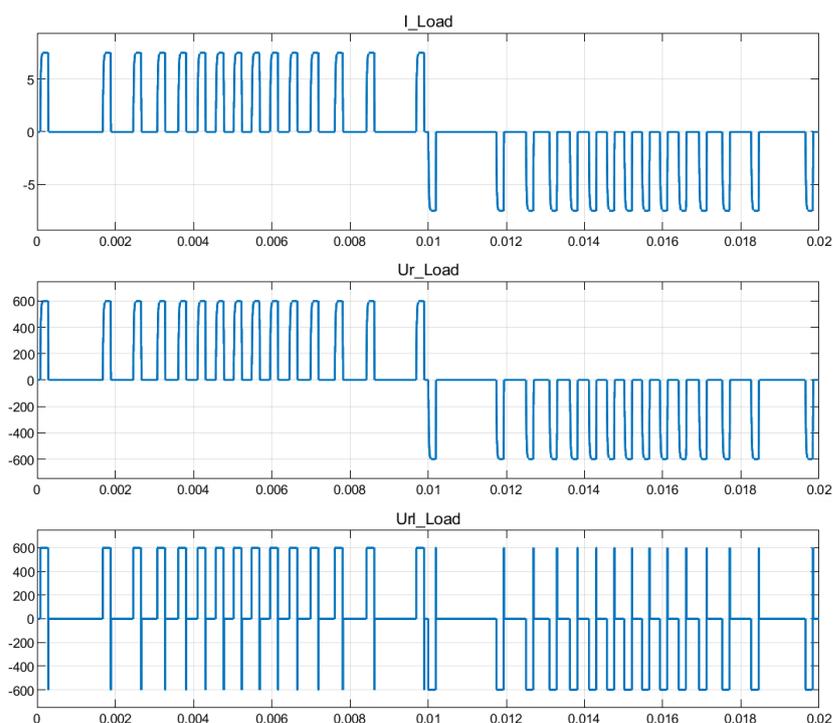


Рис. 10. Результаты моделирования: первая диаграмма - ток нагрузки; вторая диаграмма - напряжения на активной нагрузке; третья диаграмма – напряжения на активно-индуктивной нагрузке

Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ (рис. 9 и 10) показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в 3 раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Это приводит к значительному снижению динамических потерь в транзисторах АИН по сравнению с АИН с ШИМ, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте модуляции [15].

Заключение. Модель однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ реализована в среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscape. Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в 3 раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения, что приводит к значительному снижению динамических потерь в транзисторах АИН по сравнению с АИН с ШИМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MatLab. Учебный курс. С.-Петербург-Москва-Харьков-Минск: Питер. 2000. 432 с.
2. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 345–355.
3. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3. С. 144-152.

4. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя //Всерос. научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири» (Иркутск, 22-26 апреля 2019 г.): труды. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2019. Т.1. С. 3-6.
5. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2016. 116 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.:ДМК Пресс. 2011. 976 с.
7. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб: Питер. 2003. С. 12-13.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс. 2008. 288 с.
9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. vol. 52. Pp. 1114-1128.
10. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. vol. 2. issue 4. Pp. 307-316.
11. Ivakhno V., Zamaruiev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. vol. 2. issue 1. Pp. 20–26. doi.org/10.2478/ecce-2013-0003
12. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
13. Villanueva E., Correa P., Rodríguez J., Pacas M. Control of a singlephase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2009. vol. 56. Pp. 4399-4406.
14. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. 2003. Pp. 51-57.
15. Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications // Industry Applications, IEEE Transactions. 2015. vol. 51. Pp. 1722-1731.

UDK 621.314

**SIMULATION OF THE SINGLE-PHASE TWO-LEVEL
AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER
WITH FREQUENCY-PULSE MODULATION**

Mikhail P. Dunaev

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mdunaev10@mail.ru

Sarfarozi U. Dovudov

Graduate student, e-mail: dsu_1991@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University (ISTU)

83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia

Abstract. The scientific article is devoted to modeling a single-phase two-level voltage inverter (AIV) with pulse-frequency modulation (PFM). The model is implemented in MATLAB R2019a using blocks from the Simulink/Simscape library. The basic elements of the Simscape library are described. A pulse-frequency modulation (PFM) scheme was developed and modeled using blocks from the Simscape library. The obtained PFM diagrams showed that the frequency in the middle of the PFM period is 3 times higher relative to the edges. The current and voltage diagrams of the active and active-inductive load in the AIV are also obtained.

Keywords: pulse-frequency modulation; pulse-width modulation; frequency; simulation.

References

1. Gul'tyayev A. Vizual'noye modelirovaniye v srede MatLab [Visual modeling in MatLab]. St. Petersburg-Moscow-Kharkov-Minsk. Piter = Petersburg. 2000. 432 p. (in Russian).
2. Dovudov S.U., Dunaev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters] // Vestnik IrGTU = ISTU Bulletin. 2020. Vol. 24. № 2. Pp. 345–355. (in Russian).
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy chastotno-impul'snogo preobrazovatelya [Simulation of the frequency-pulse converter circuit] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. T. 3. Irkutsk. MESI SO RAN. 2019. Pp. 144-152. (in Russian).
4. Dunaev MP, Dovudov SU. Modelirovaniye skhemy shirotno-impul'snogo preobrazovatelya [Modeling a Pulse-Width Converter Circuit] // Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22-26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019. vol. 1. Pp. 3–6. (in Russian).
5. Dunaev M.P. Silovye elektronnyye preobrazovateli elektrostantsiy [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk. Izd-vo IRNITU = IRNITU Publish. 2016. 116 p. (in Russian).

6. D'yakonov V. P. MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2011. 976 p. (in Russian).
7. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Silovye polnost'yu upravlyayemyye poluprovodnikovye preobrazovateli [Power fully controlled semiconductor converters]. St. Petersburg. Piter = Petersburg. 2003. Pp. 12-13. (in Russian).
8. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2008. 288 p. (in Russian)
9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. vol. 52. Pp. 1114-1128.
10. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. vol. 2. issue 4. Pp. 307-316.
11. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. vol. 2. issue 1. Pp. 20–26. doi.org/10.2478/ecce-2013-0003
12. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
13. Villanueva E., Correa P., Rodríguez J., Pacas M. Control of a singlephase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2009. vol. 56. Pp. 4399-4406.
14. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. 2003. Pp. 51-57.
15. Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications // Industry Applications, IEEE Transactions. 2015. vol. 51. Pp. 1722-1731.