

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ И ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Применение синусоидальной частотно-импульсной модуляции в автономных инверторах напряжения (АИН) вместо синусоидальной широтно-импульсной модуляции позволит уменьшить динамические потери в полупроводниковых ключах. Цель исследования представленной статьи заключается в разработке и математическом моделировании альтернативного вида модуляции (так называемой частотно-импульсной модуляции), которая позволяет уменьшить динамические потери в полупроводниковых ключах. Для анализа и сравнения энергетических зависимостей автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) в статье применены методы математического моделирования в среде *Matlab / Simulink*. В среде *Matlab / Simulink* разработана модель АИН с синусоидальной ЧИМ, которая задается аналого-цифровым способом. В ЧИМ длительность импульса остается постоянной, а периоды следования импульсов являются переменными и изменяются по синусоидальному закону. Полученные диаграммы автономного инвертора напряжения с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Вследствие этого динамические потери в модулях *IGBT*-транзисторов автономного инвертора напряжения с ЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ. Также приведены аналитические выражения, описывающие статические и динамические потери мощности в силовых полупроводниковых диодах и транзисторах. Методом полиномиальной аппроксимации силовых характеристик *IGBT*-транзисторов получены математические выражения, описывающие зависимости $U_{ce}(I_c)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. На базе полученных выражений в среде *Matlab / Simulink* разработан блок расчета статических и динамических потерь мощности. Разработаны математические модели АИН с ЧИМ и ШИМ в среде *Matlab / Simulink* с использованием блоков из библиотеки *SimPowerSystem*. Применение ЧИМ вместо ШИМ позволяет увеличить коэффициент полезного действия АИН.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, частотно-импульсная модуляция, широтно-импульсная модуляция, моделирование, динамические потери, аппроксимация, коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразование постоянного напряжения в переменное может осуществляться с помощью инвертора, выполненного на транзисторных модулях *IGBT* [1]. Одним из наиболее простых преобразователей этого типа является трехфазный двухуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [2, 3], схема которого представлена на **рис. 1**.

Частотно-импульсная модуляция – это тип модуляции, где ширина импульса t_n остается постоянной и меняется только время паузы t_p . На **рис. 2** показаны диаграммы формирования напряжения для управления полупроводниковыми ключами инвертора методом частотно-импульсной модуляции. Синусоидальный сигнал $U(t)$, прошедший частотно-импульсную модуляцию, будет представлен последовательностью импульсов одинаковой длительности t_n , ширина паузы t_p между которыми будет изменяться с изменением амплитуды $U(t)$ [4-7].

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В АИН

Потери мощности при коммутации *IGBT*-транзистора для заданных форм сигналов тока и напряжения разделены на три части, как показано на **рис. 3**. Суммарные потери энергии включают в себя статические и коммутационные потери в *IGBT*-транзисторе и в обратном диоде [8]. Статические потери *IGBT*-транзисторов и диодов происходят при включенном состоянии. Это потери P_{cond} их можно рассчитать как произведение тока коллектора и напряжения коллектора-эмиттера по формуле

$$P_{cond.inv} = \int_{t_2}^{t_3} (U_{ce}(I_c) I_c) \cdot dt, \tag{1}$$

где U_{ce} – напряжение коллектор-эмиттер; I_c – ток коллектора.

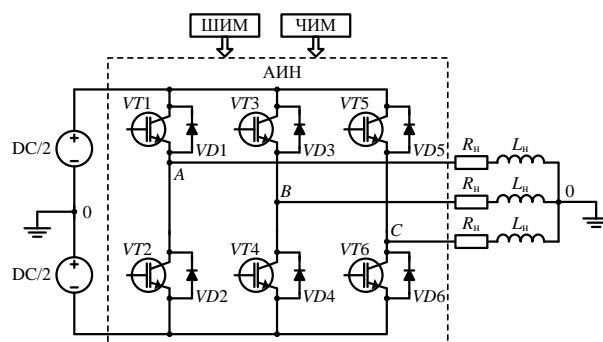


Рис. 1. Схема трехфазного АИН с ШИМ или ЧИМ модуляцией

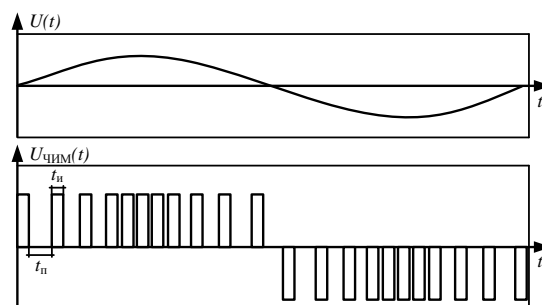


Рис. 2. Диаграммы формирования частотно-импульсной модуляции

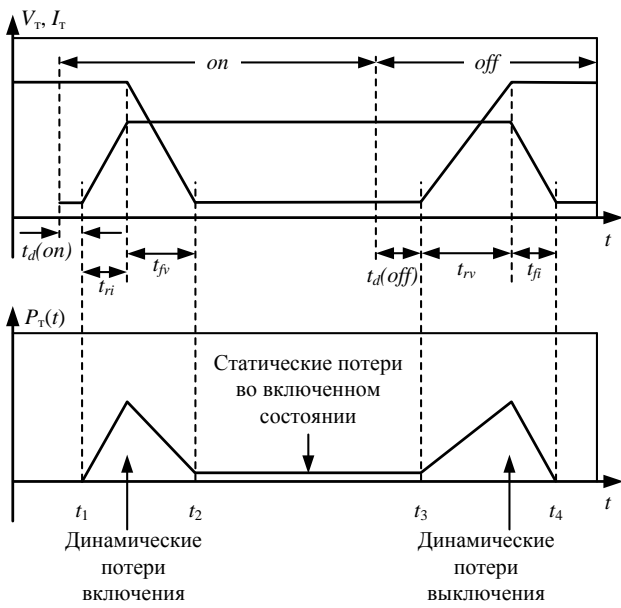


Рис. 3. Процесс коммутации IGBT-транзистора:

$t_1 - t_2$ - интервал включения; $t_2 - t_3$ - интервал включенного состояния; $t_3 - t_4$ - интервал выключения

Динамические потери в IGBT-транзисторах происходят при переходе из одного установившегося режима в другой (рис. 3), т.е. при переходе от выключенного состояния во включенное и наоборот [9-13]. Потери энергии при переключении устройства могут изменяться в зависимости от тока, напряжения, сопротивления затвора и температуры перехода [8].

Величина средней мощности коммутационных потерь определяется по следующим формулам:

$$P_{sw.inv} = [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)]f, \quad (2)$$

$$P_{sw.inv} = \int_{t_1}^{t_2} [(I_c U_{ce})] dt + \int_{t_3}^{t_4} [(I_c U_{ce})] dt, \quad (3)$$

где $E_{on}(I_c)$ – энергия при включении, которая зависит от величины тока коллектора; $E_{off}(I_c)$ – энергия при выключении, которая тоже зависит от значения тока коллектора; f – частота коммутации.

Суммарные потери в АИН можно определить по выражению

$$P_{АИН} = P_{con.inv} + P_{SW.inv}, \quad (4)$$

где $P_{АИН}$ – потери мощности в ПЧ; $P_{con.inv}$ – статические потери мощности в транзисторе и обратном диоде; $P_{SW.inv}$ – коммутационные потери мощности в IGBT-транзисторе и обратном диоде.

В АИН значительный вклад в общие потери вносят коммутационные потери. Чтобы оценить КПД АИН и надежность его конструкции, необходимо точно рассчитать коммутационные потери.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АИН С ШИМ И ЧИМ

В среде Matlab с использованием блоков из библиотеки Simulink [14, 15] смоделирована схема АИН с ЧИМ, которая приведена на рис. 4. В работе [8] смоделированы и показаны потери в АИН с ШИМ.

Модель (см. рис. 4) содержит следующие блоки: блок автономного трехфазного мостового инвертора напряжения на шести IGBT/Diode-модулях (VT1/VD1 – VT6/VD6); блок системы управления ЧИМ; блок автоматического расчета потерь в инверторе (FS15R06XE1); блок нагрузки (R_n, L_n); комплект измерительных приборов.

Модель системы управления с синусоидальной ЧИМ показана на рис. 5.

Временные диаграммы системы управления показаны на рис. 6. В ЧИМ длительность импульса остается постоянной, а периоды следования импульсов являются переменными и меняются по синусоидальному закону.

На рис. 7 и 8 показаны диаграммы токов в АИН с ЧИМ и ШИМ.

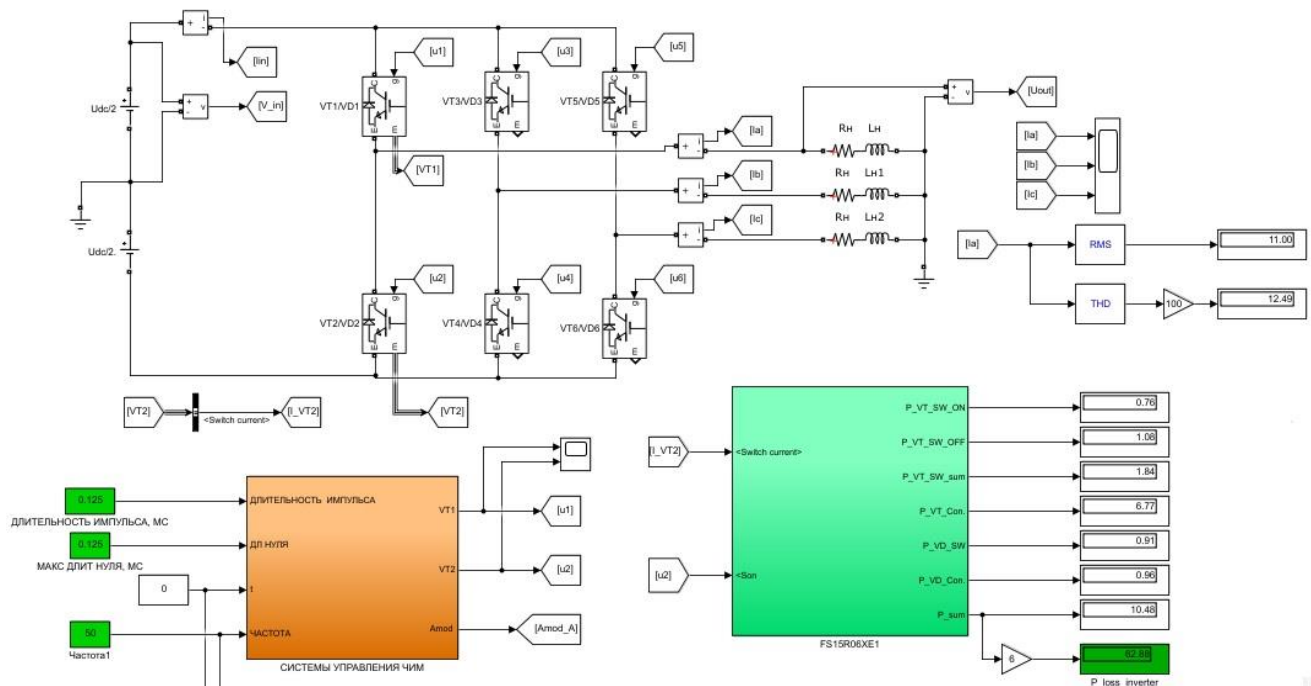


Рис. 4. Модель АИН с ЧИМ в среде MATLAB

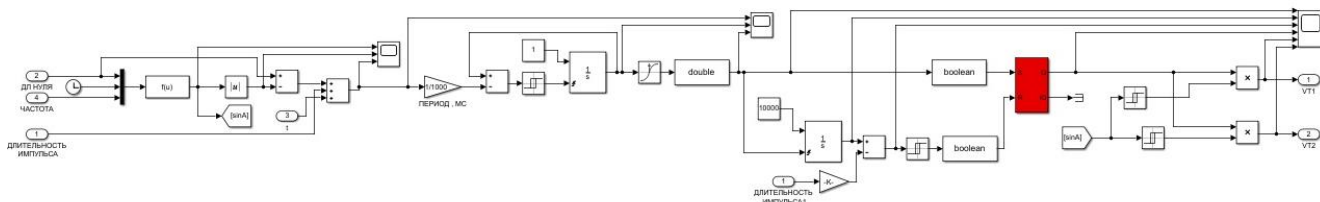


Рис. 5. Модель системы управления синусоидальной ЧИМ

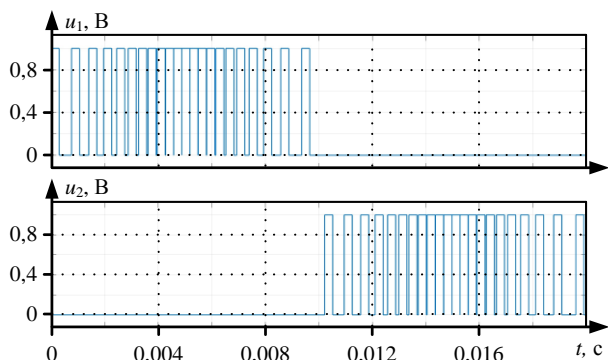


Рис. 6. Результаты моделирования: u_1, u_2 – напряжения управления транзисторами АИН в режиме ЧИМ

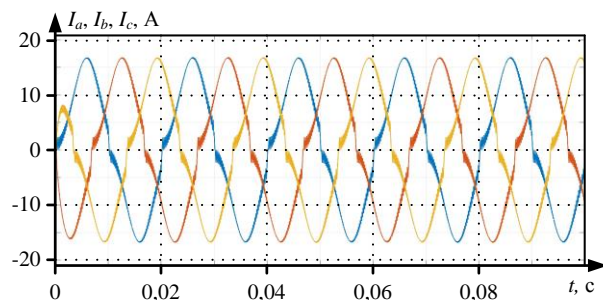


Рис. 7. Результат моделирования: выходные токи АИН с ЧИМ

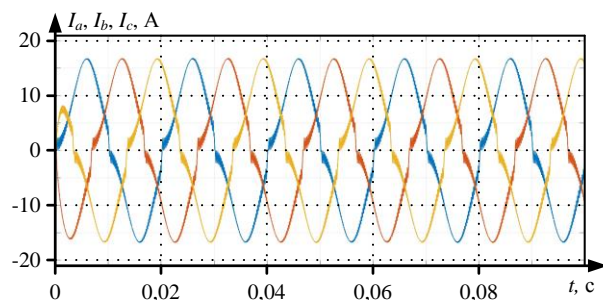


Рис. 8. Результат моделирования: выходные токи АИН с ЧИМ

БЛОК АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ИНВЕРТОРЕ

В настоящее время для расчета потерь в IGBT-транзисторах существуют различные способы, которые используют довольно сложные формулы с использованием многочисленных параметров. Следовательно, эти методы расчета нелегко реализовать на практике. В этой статье потери в АИН определены методом компьютерного моделирования, при котором использовались графики энергетических зависимостей полупроводниковых диодов и транзисторов.

Методом аппроксимации определены математические функции, наиболее точно описывающие графики энергетических зависимостей $U_{ce}(I_C)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_C)$,

$E_{off}(I_C)$, $E_{rec}(I_C)$ [9, 11, 12]. Энергетические графики зависимостей $U_{ce}(I_C)$, $E_{on}(I_C)$, $E_{off}(I_C)$ взяты из документации на полупроводниковые диоды и транзисторы и после аппроксимации показаны на рис. 9 и 10. Используя данный метод расчета, можно определить статические и динамические потери в IGBT-транзисторах и обратных диодах АИН, а также в целом количественно оценить КПД преобразователя.

После аппроксимации графиков потерь мощности IGBT-транзисторного модуля типа FS15R06XE3 получены следующие уравнения:

$$U_{CE}(I_C) = -102775 \left(\frac{I_C}{100}\right)^6 + 98467 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^5 - 36327 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 6505,8 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 - 590,76 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 32,772 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0,3152; \quad (5)$$

$$U_F(I_F) = -72672 \left(\frac{I_F}{100}\right)^6 + 71308 \left(\frac{I_F}{100}\right)^5 - 27122 \left(\frac{I_F}{100}\right)^4 + 5045,3 \left(\frac{I_F}{100}\right)^3 - 481,84 \left(\frac{I_F}{100}\right)^2 + 27,018 \left(\frac{I_F}{100}\right) + 0,4514; \quad (6)$$

$$E_{on}(I_C) = 4,8894 \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 7,928 \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 + 0,0715 \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 1,8573 \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0,0486; \quad (7)$$

$$E_{off}(I_C) = -15,198 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^4 + 16,984 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^3 - 8,0363 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right)^2 + 3,6428 \cdot \left(\frac{I_C}{100}\right) + 0,0456; \quad (8)$$

$$E_{rec}(I_F) = 5,4932 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^3 - 5,7025 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right)^2 + 2,6764 \cdot \left(\frac{I_F}{100}\right) + 0,0792. \quad (9)$$

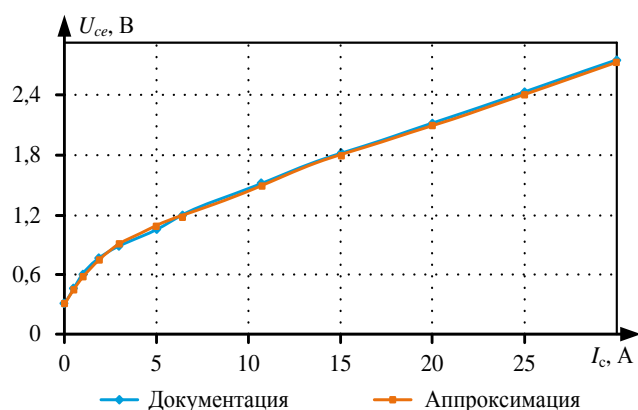


Рис. 9. Напряжение насыщения коллектор-эмиттер транзистора типа FS15R06XE3

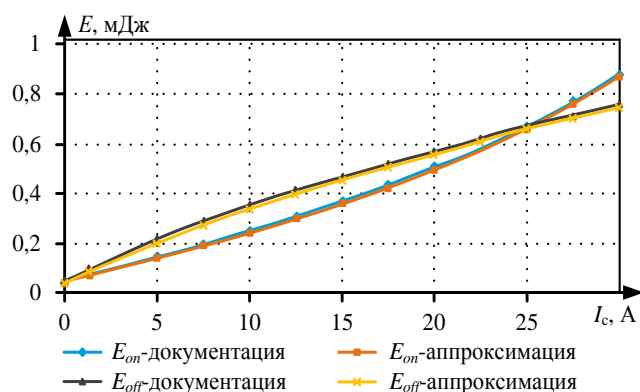


Рис. 10. Энергетические характеристики переключения силового транзистора типа FS15R06XE3

Полученные математические зависимости (5) – (9) достаточно точно описывают энергетические графики потерь мощности в IGBT/Diode модулей АИН.

Для расчета статических и динамических потерь мощности IGBT-транзистора используются напряжение и ток транзистора.

На рис. 11 показан блок расчета статических и динамических потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3. На рис. 12 показан блок расчета статических и динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

Результаты моделирования статических и динамических потерь мощности IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3 показаны на рис. 13 и 14. Для моделирования динамических потерь используется метод моделирования с постоянным шагом расчета [8, 10, 11].

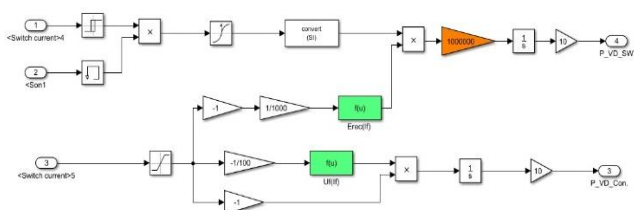


Рис. 11. Блок расчета потерь мощности обратного диода модуля типа FS15R06XE3

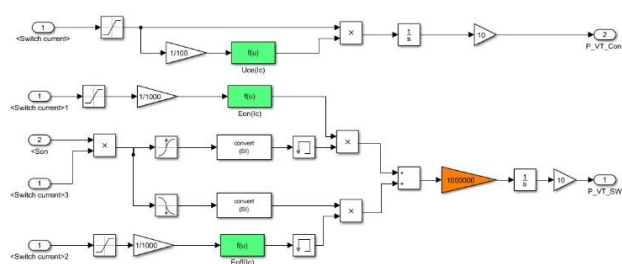


Рис. 12. Блок расчета потерь мощности транзистора модуля типа FS15R06XE3

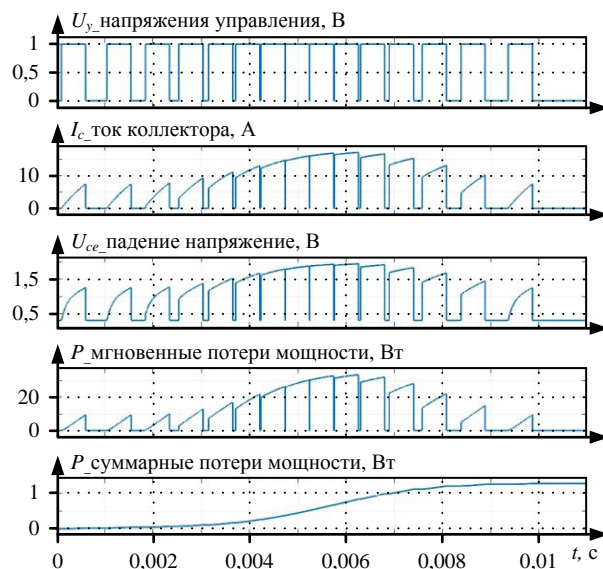


Рис. 13. Результаты моделирования статических потерь модуля типа FS15R06XE3 при ЧИМ

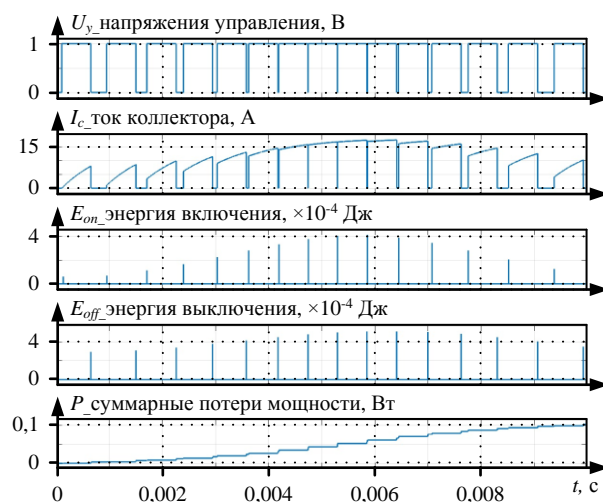


Рис. 14. Результаты моделирования динамических потерь модуля типа FS15R06XE3 при ЧИМ

СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ В АИН С ШИМ И ЧИМ

Анализ потерь, полученных при моделировании схем АИН с ШИМ и ЧИМ при максимальной частоте $f_{\max} = 8$ кГц, приведен в таблице. Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения примерно в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Это приводит к снижению динамических потерь в транзисторах АИН с ЧИМ по сравнению с АИН с ШИМ на 21,4%, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте модуляции.

Потери при моделировании схем АИН с ШИМ и ЧИМ

| Параметры | ШИМ | ЧИМ |
|--|-------|-------|
| Число импульсов за период N | 80 | 60 |
| Действующий ток I_{RMS} , А | 11 | 11 |
| Мощность динамических потерь включения в транзисторе $P_{VT\ SW\ ON}$, Вт | 0,95 | 0,76 |
| Мощность динамических потерь выключения в транзисторе $P_{VT\ SW\ OFF}$, Вт | 1,37 | 1,08 |
| Мощность динамических потерь в транзисторе суммарная $P_{VT\ SW\ SUM}$, Вт | 2,34 | 1,84 |
| Мощность статических потерь в транзисторе $P_{VT\ con}$, Вт | 6,76 | 6,77 |
| Мощность динамических потерь в диоде $P_{VD\ SW}$, Вт | 1,16 | 0,91 |
| Мощность статических потерь в диоде $P_{VD\ con}$, Вт | 1,1 | 0,96 |
| Мощность потерь в транзисторе и диоде суммарная $P_{сум}$, Вт | 11,35 | 10,48 |
| Мощность потерь в транзисторах и диодах АИН суммарная P_{inv} , Вт | 68,11 | 62,88 |
| Коэффициент полезного действия АИН, % | 95,66 | 95,98 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод математического моделирования АИН с ЧИМ и ШИМ. Разработана модель АИН с синусоидальной ЧИМ, которая задается аналого-цифровым способом. Приведенные диаграммы автономного инвертора напряжения с ЧИМ показывают, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Вследствие этого динамические потери в IGBT-модулях автономного инвертора напряжения с ЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ. Для расчета потерь мощности IGBT-транзисторов методом полиномиальной аппроксимации определены математические уравнения, описывающие графики зависимостей $U_{ce}(I_c)$, $U_f(I_f)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. Полученные математические уравнения достаточно точно описывают графики потерь мощности. Применение ЧИМ позволяет уменьшить на 21 % динамические потери и увеличить коэффициент полезного действия АИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. // Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. Pp. 1-5. doi:

- 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271151
3. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 116 с.
4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.
5. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. № 24(2). С. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355
6. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3(15). С. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13
7. Ertan H.B., Simsir N.B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2004. Vol. 40 (6). Pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
8. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 45-51. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51
9. Pulse width and pulse frequency modulation pattern controlled active clamp ZVS inverter link AC-DC power converter utility AC side active power filtering function for consumer magnetron driver / M. Nakaoka, B. Saha, S.P. Mun, T. Mishima, S.K. Kwon // IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2007. Pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
10. Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41
11. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics / O.A. Plakhtii, V.P. Nerubatskyi, D.A. Hordiienko, H.A. Khoruzhevskiy // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82
12. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive // 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2016. Pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216
13. Hanini W., Ayadi M. Comparison of IGBT switching losses modeling based on the datasheet and an experimental study // 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2019. Pp. 382-387. doi: 10.1109/STA.2019.8717219
14. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
15. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

Поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY EFFICIENCY COMPARISON OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER CIRCUITS WITH SINUSOIDAL PULSE-LATEST AND FREQUENCY-PULSE MODULATION

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, mdunaev10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>

Sarfarozi U. Dovudov

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, email: dsu_1991@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>

The sinusoidal pulse-frequency modulation application in autonomous voltage inverters (AVI) instead of sinusoidal pulse-width modulation will reduce dynamic losses in semiconductor switches. The purpose of the study presented in the article is the development and mathematical modeling of an alternative type modulation (the so-called pulse-frequency modulation), which makes it possible to reduce dynamic losses in semiconductor switches. To analyze and compare the energy dependences of autonomous voltage inverters (AVI) with pulse width modulation (PWM) and pulse frequency modulation (PFM), the article uses mathematical modeling methods in the Matlab / Simulink environment. In the Matlab / Simulink environment, an AVI model with a sinusoidal PFM has been developed, which is set in an analog-digital way. In PFM, the pulse duration remains constant while the pulse repetition periods are variable and change sinusoidally. The obtained diagrams of an autonomous voltage inverter with PFM showed that the modulation frequency at the half-period edges of the output pulse voltage is 2 times lower than in the middle of the output pulse voltage half-periods. As a result, the dynamic losses in the IGBT modules of an autonomous voltage inverter with PFM will be significantly lower than in a similar circuit with PWM. Analytical expressions describing static and dynamic power losses in power semiconductor diodes and transistors are also given. By the method of polynomial approximation of the power characteristics of IGBT transistors, mathematical expressions are obtained that describe the dependences $U_{ce}(I_c)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. On the basis of the obtained expressions in the Matlab / Simulink environment, a block for calculating static and dynamic power losses has been developed. The mathematical models of AVI with PFM and PWM have been developed in the Matlab / Simulink environment using blocks from the SimPowerSystem library. The PFM application instead of PWM makes it possible to increase the AVI efficiency.

Keywords: autonomous voltage inverter, pulse-frequency modulation, pulse-width modulation, simulation, dynamic losses, approximation, efficiency.

REFERENCES

- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2(18), pp. 134-143. doi: 10.38028/ESI.2020.18.2.011 (In Russian)
- Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy Characteristics the Autonomous Voltage Inverter with the Pulse-Frequency Modulation. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271151
- Dunayev M.P. *Silovyye elektronnyye preobrazovateli v elektrostantsiy* [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 116 p. (In Russian)
- Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovyye polnostyu upravlyayemye poluprovodnikovyye preobrazovateli* [Power turn-off semiconductor converters]. Saint Petersburg, Elektrosi-
- laPubl., 2003. 172 p. (In Russian)
- Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355. (In Russian)
- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of the frequency-pulse converter circuit. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3(15), pp. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13. (In Russian)
- Ertan H.B., Simsir N. B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Nov.-Dec.2004, vol. 40, no. 6, pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
- Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of Power Losses in a Frequency Inverter. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51. (In Russian)
- Nakaoka M., Saha B., Mun S.P., Mishima T., Kwon S.K. Pulse Width and Pulse Frequency Modulation Pattern Controlled Active Clamp ZVS Inverter Link AC-DC Power Converter Utility AC Side Active Power Filtering Function for Consumer Magneton Driver. *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
- Dunaev M.P., Dovudov S.U. Comparing the Energy Performance of Pulsed DC Converters According to the Results of Computer Simulation. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41 (In Russian)
- Plakhtii O.A., Nerubatskiy V.P., Hordienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, no. 2, pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82
- Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2016, pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
- Hanini W., Ayadi M. Comparison of IGBT switching losses modeling based on the datasheet and an experimental study. 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2019, pp. 382-387. doi: 10.1109/STA.2019.8717219
- Dyakonov V.P. *MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera* [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 976 p. (In Russian)
- Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian)

Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 50-55. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-50-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-50-55)

Dunaev M.P., Dovudov S.U. Energy Efficiency Comparison of Autonomous Voltage Inverter Circuits with Sinusoidal Pulse-Latest and Frequency-Pulse Modulation. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 50-55. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-50-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-50-55)