

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

А.В. Удовиченко, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко, С.В. Кучак, С.В. Брованов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Рассматривается математическая модель для расчета электромагнитных процессов в многозонном полупроводниковом преобразователе, который выступает в качестве регулятора переменного напряжения. Математическая модель реализована с применением спектрального метода на базе переключающих функций. Отмечено преимущество применения данной математической модели для расчета характеристик полупроводниковых преобразователей в установившемся режиме по сравнению с существующими пакетами программного моделирования, особенно для случаев множественных итерационных расчетов. Данные преобразователи позволяют улучшить качество регулируемых электромагнитных параметров в системе по сравнению с однозонными тиристорными регуляторами. Результаты математического моделирования были верифицированы имитационным моделированием.

Ключевые слова: регулятор переменного напряжения, плавный пуск, спектральный метод, коэффициент гармоник.

Введение

В настоящее время в работах, посвященных разработкам устройств плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей, особенно высоковольтных, актуальна проблема повышения их энергоэффективности [1–6]. Широко применяемые тиристорные регуляторы переменного напряжения (РПН), выполняющие роль устройств плавного пуска двигателей переменного напряжения, снижают пусковой ток (ПТ) двигателей, но существенно искажают его форму, что увеличивает потери активной мощности [7–9]. По данным ряда исследований, при медленном пуске последнее приводит даже к выходу двигателей из строя вследствие тепловых перегрузок [10, 11].

В настоящее время большинство выпускаемых промышленностью тиристорных регуляторов переменного напряжения сформированы по схеме со встречно-параллельным включением тиристорных групп [12, 13]. При разном уровне входного напряжения (0,4–10 кВ) тиристорная группа содержит от 1 до 5 последовательно включенных тиристорных групп. Такой вариант регулятора напряжения пред-

ставляет схему с зонным регулированием амплитуды выходного напряжения и фазовым регулированием момента включения тиристорных групп. Это способствует повышению качества ПТ, а также снижает величину броска пускового тока по сравнению с однозонным регулятором переменного напряжения [14]. На рис. 1 показана известная схема многозонного тиристорного регулятора с встречно-параллельными группами тиристорных групп. Недостатками такой схемы являются высокие относительные значения напряжений на тиристорах и наличие трансформатора.

В последнее время уделяется большое внимание развитию многозонных топологий регуляторов переменного напряжения, позволяющих улучшить качество пускового тока и снизить напряжение на полупроводниковых приборах [15]. Схемы многозонных тиристорного и транзисторного регуляторов напряжения приведены на рис. 2 и 3, соответственно. Как видно из представленных рисунков, этим схемам присуще наличие конденсаторных делителей напряжения в виде цепочек последовательно соединенных конденсаторов C_1 , C_2 и т. д.

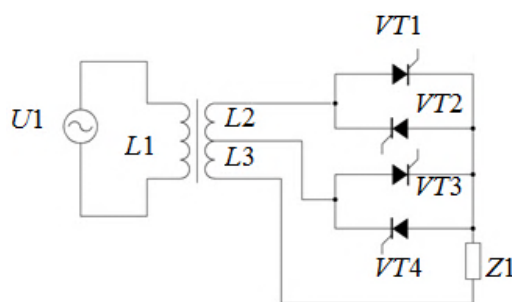


Рис. 1. Схема многозонного тиристорного регулятора с встречно-параллельными группами тиристорных групп

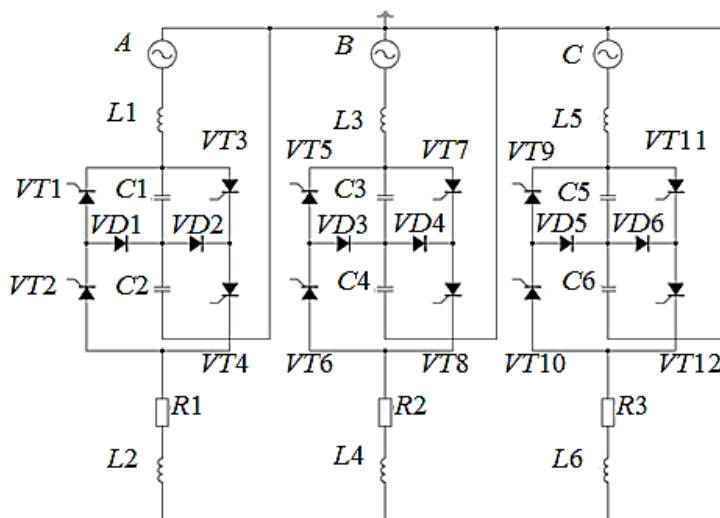


Рис. 2. Многозонный тиристорный регулятор напряжения

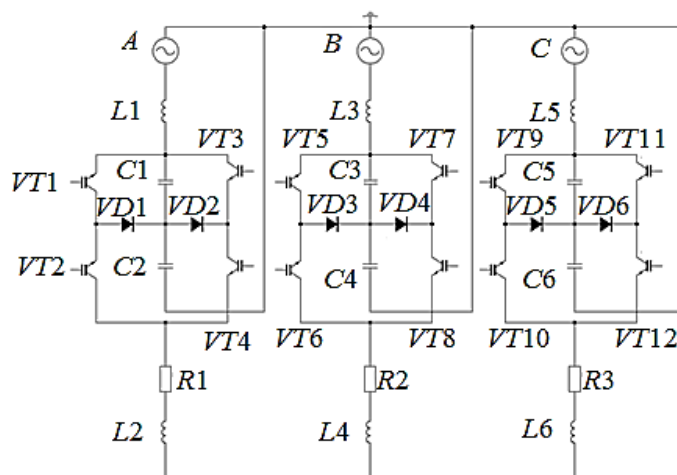


Рис. 3. Схема многозонного транзисторного регулятора напряжения

Конденсаторный делитель обеспечивает получение половинного напряжения сети без использования трансформатора, что дает два уровня входного напряжения регулятора, а значит, и две зоны регулирования выходного напряжения регулятора. Тиристоры с дополнительными фиксирующими диодами включены последовательными цепочками, включенными встречно-параллельно, что позволяет получить на всех полупроводниковых приборах половинную величину напряжения сети, что обуславливает снижение стоимости тиристоров по сравнению с трансформаторной схемой регулятора (см. рис. 1). Стоит отметить, что в данной схеме ток протекает в верхней зоне регулирования через два последовательных тиристора, а не один, как в схеме на рис. 1. Наличие цепочки из нескольких последовательно включенных тиристоров, обусловленных количеством n -зонных конденсаторных делителей напряжения [16], позволит снизить общие потери в тиристорах.

Для получения различных характеристик многозонных полупроводниковых преобразовате-

лей в установившихся режимах требуется специализированное программное обеспечение (ПО), которому необходимо наличие высокопроизводительных аппаратно-вычислительных комплексов. Кроме того, для случаев множественных итерационных расчетов, необходимых для построения характеристик, понадобится большое количество расчетного времени. В этой связи становится актуальным использование математических моделей, позволяющих рассчитать электромагнитные процессы с меньшими затратами по временным и аппаратным ресурсам, в разработке которых стоит острая необходимость. Реализация таких моделей может быть осуществлена на базе спектрального метода с применением переключающих функций [17, 18].

Одной из ключевых характеристик многозонного полупроводникового регулятора напряжения является коэффициент гармоник тока, который позволяет оценить качество пускового тока двигателя. Также стоит отметить, что в некоторых случаях требуются более точные оценочные показатели,

в роли которых выступает интегральный коэффициент гармоник высокого порядка. Для нахождения вышеописанного коэффициента гармоник требуется решение дифференциальных уравнений высокого порядка. Таким образом, использование математических моделей, реализованных с применением спектрального метода на базе переключающих функций [19], позволит избежать решения дифференциальных уравнений для нахождения параметров РПН в установившемся режиме. Для реализации таких моделей может быть использован легкодоступный математический пакет – *Mathcad*.

В связи с этим в статье предложена математическая модель, позволяющая проводить анализ электромагнитных процессов с возможностью расчета средних, действующих значений, коэффициентов гармоник токов и напряжений в элементах схемы многозонного тиристорного регулятора напряжения, а также получать их спектральный состав.

Математическая модель двухзонного РПН

Для упрощения реализации математической модели пренебрежем потерями в полупроводниковых приборах и реактивных элементах схемы.

Процедуру получения математической модели для исследуемого типа регулятора напряжений разделим на ряд этапов. На первом этапе определяются переключающие функции в соответствии с законами коммутации полупроводниковых приборов. Это могут быть функции, описывающие длительности коммутации тиристоров, соответствующие их законам управления. Эти функции будут использованы для описания выходных напряжений устройств. На втором этапе выполняются математическое описание выходных фазных и линейных напряжений регулятора. На третьем этапе осуществляется математическое описание фазных токов данного регулятора напряжения, определение их мгновенных, средних и действующих значений и их спектральных составов.

Всю процедуру реализации математической модели рационально представить в виде блок-схемы (рис. 4). Каждый блок характеризуется математическим описанием электромагнитных процессов в исследуемой схеме.

Определим понятие переключающей функции. Переключающая функция принимает два значения в зависимости от истинности условий:

$$F = \begin{cases} 1, & \text{условие истинно} \\ 0, & \text{условие ложно} \end{cases} \quad (1)$$

Переключающая функция силового полупроводникового вентиля равна единице, когда ключ открыт, и нулю в противном случае:

$$F_{sw} = \begin{cases} 1, & \text{ключ открыт} \\ 0, & \text{ключ закрыт} \end{cases} \quad (2)$$

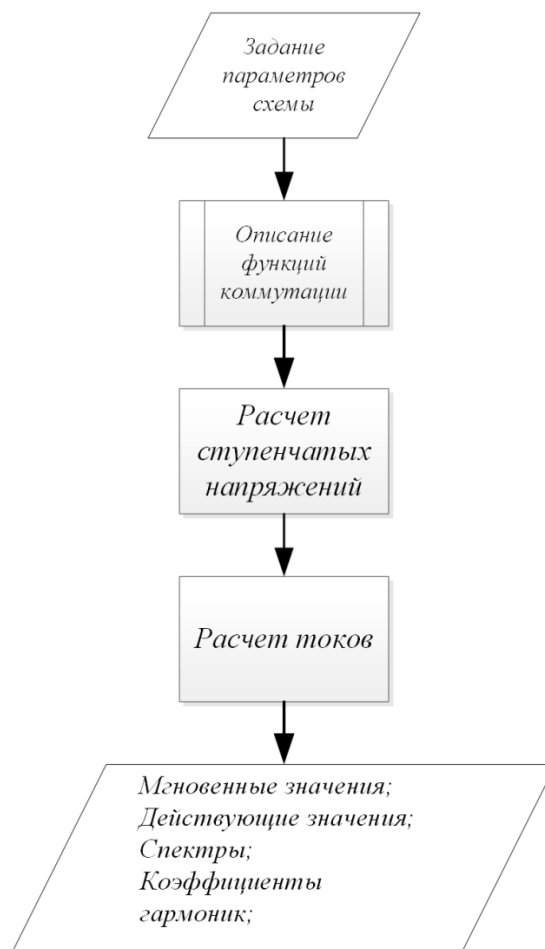


Рис. 4. Блок-схема реализации математической модели

Математическое описание выходного напряжения тиристорного регулятора напряжения

Реализация математической модели многозонного тиристорного РПН начинается с задания входных синусоидальных напряжений питающей сети:

$$\begin{aligned} V_a &= U_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi); \\ V_b &= U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \\ V_c &= U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Далее задается принцип управления многозонным тиристорным регулятором напряжения, для этого по необходимости формируется структурная схема управления рис. 5. На рис. 5 $u_{on11} \dots u_{onk}$ – опорные сигналы пилообразной формы для управления регуляторами; u_{M1} и u_{M2} – модулирующие сигналы для задания угла управления группами управления тиристоров; K – компаратор; P_i – группа управления i -м регулятором. Реализация принципа управления многозонного тиристорного регулятора напряжения в соответствии с предложенной структурой начинается с задания законов изменения модулирующего и опорных сигналов.

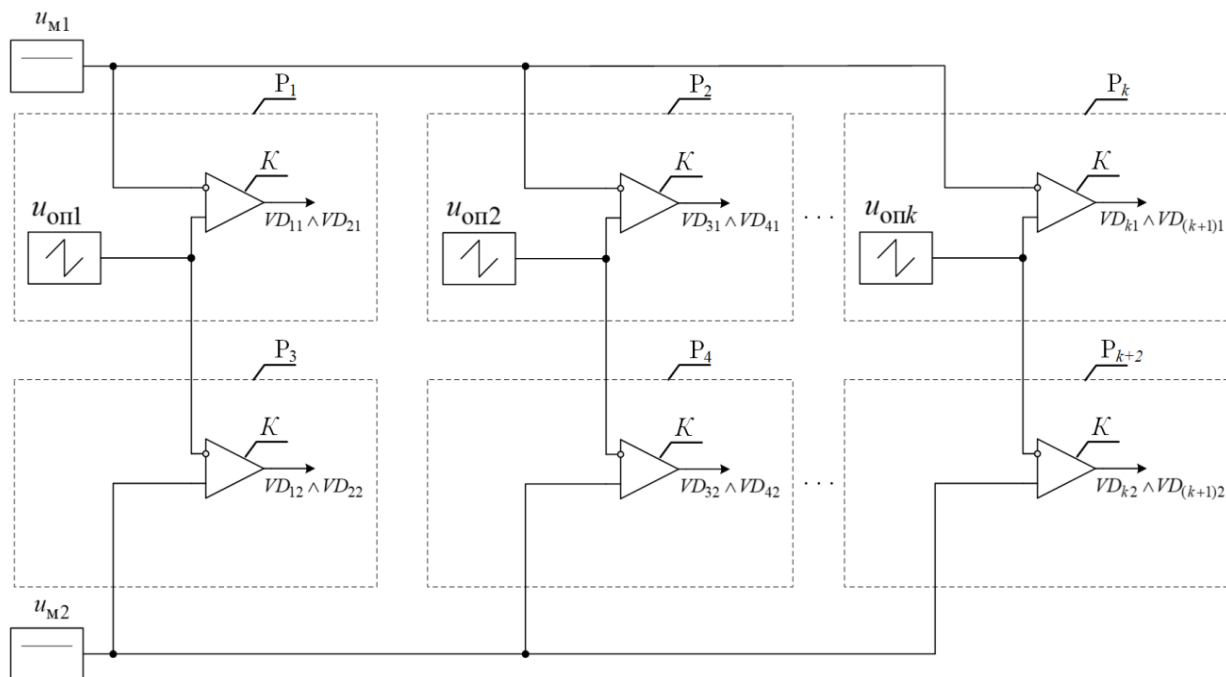


Рис. 5. Структурная схема для управления многозонным тиристорным регулятором напряжения

Закон изменения опорных сигналов при реализации данных математических моделей принят пилообразной формы, который описывается следующим образом [19]:

$$u_{oni} = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left[\tan \left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2} - \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{k} \right) \right] + 1, \quad (4)$$

где $i \in [1; k]$ – индекс описывающий номер фазы, k – количество фаз у регулятора напряжения.

Модулирующие сигналы задаются константами, пропорциональными углу управления:

$$\begin{aligned} u_{M1} &= \text{const}_1; \\ u_{M2} &= \text{const}_2. \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 6 представлены эпюры, поясняющие предложенный принцип управления.

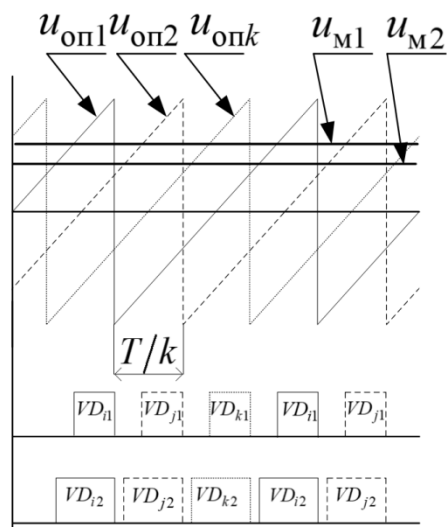


Рис. 6. Эпюры сигналов в системе управления

Далее происходит описание переключающих функций, определяющих моменты коммутации многозонного тиристорного регулятора напряжения, которые являются результатом работы сравнения опорных и модулирующих сигналов с помощью компараторов. Реализация имитируемых компараторов происходит за счет применения функции Хэвисайда или функции «signum», результат будет идентичным:

$$\begin{aligned} F_{i1} &= \Phi(u_{oni} - u_{M1}); \\ F_{i1} &= \frac{1}{2} \cdot [\text{sign}(u_{oni} - u_{M1})] + \frac{1}{2}; \\ F_{i2} &= \Phi(u_{oni} - u_{M2}); \\ F_{i2} &= \frac{1}{2} \cdot [\text{sign}(u_{oni} - u_{M2})] + \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные переключающие функции определяют длительность включения соответствующей тиристорной пары и пропорциональны углам управления. При условии идентичности конденсаторов в теле регулятора и равенства напряжений на них выходное напряжение с учетом переключающих функций определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} V_{ar} &= F_{11} \cdot \frac{V_a}{2} + F_{12} \cdot \frac{V_a}{2}, \\ V_{br} &= F_{21} \cdot \frac{V_b}{2} + F_{22} \cdot \frac{V_b}{2}, \\ V_{cr} &= F_{31} \cdot \frac{V_c}{2} + F_{32} \cdot \frac{V_c}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Форма выходного напряжения представлена на рис. 7.

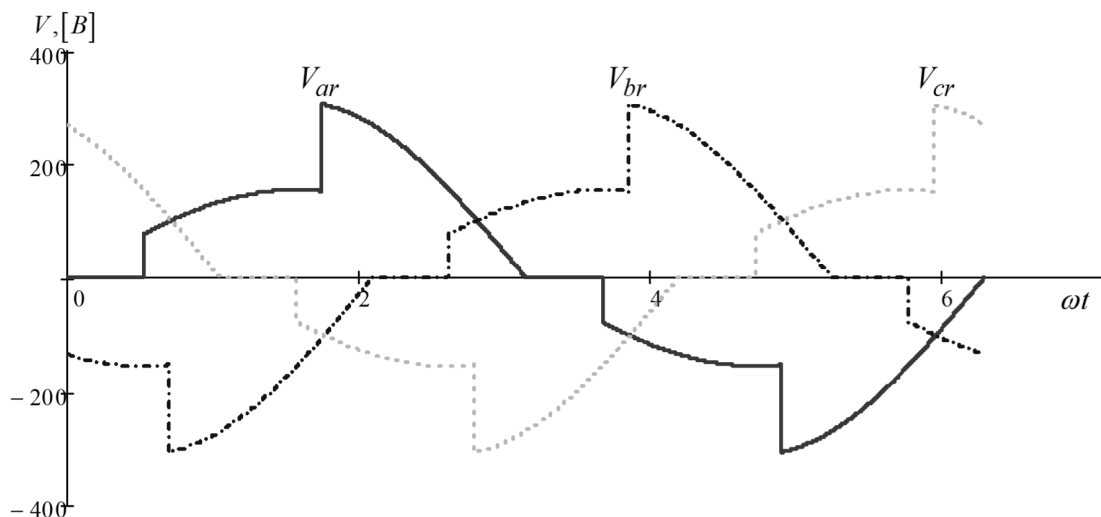


Рис. 7. Выходное напряжение многозонного тиристорного регулятора

Математическое описание тока нагрузки тиристорного регулятора напряжения

После того как было получено описание выходных напряжений, на следующем этапе построения моделей происходит этап математического формирования токов нагрузки тиристорного регулятора напряжения. Для определения токов многозонного тиристорного регулятора первоначально выполняется гармонический анализ напряжений. Для этого воспользуемся вычислением гармоник периодического сигнала выходных напряжений РПН через коэффициенты ряда Фурье. Для ускорения процесса расчета и повышения точности используются быстрые алгоритмы дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Процедура дискретного преобразования Фурье описывается следующим выражением:

$$H_q = \sum_{n=0}^{Nh-1} f_n \cdot e^{-\frac{2\pi}{Nh}j \cdot n \cdot q}, \quad (8)$$

где $H_q = Re(H_q) + j \cdot Im(H_q)$ – q -я гармоническая составляющая в комплексной форме, Nh – число отсчетов некоторой функции $f(t)$ в дискретном представлении, f_n – значение функции $f(t)$ для отсчета n .

При использовании математических пакетов с возможностью выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) по заданному числу гармоник, являющемуся степенью двойки, можно ускорить процесс вычисления гармонических составляющих с помощью операции БПФ:

$$\dot{C}(f) = FFT(f), \quad (9)$$

где $\dot{C}(u_A)$ – вектор-столбец из l элементов, которые являются гармоническими компонентами, представленными в комплексном виде:

$$\dot{C}(f) = \begin{pmatrix} Re[\dot{C}_1(f)] + j \cdot Im[\dot{C}_1(f)] \\ Re[\dot{C}_2(f)] + j \cdot Im[\dot{C}_2(f)] \\ \vdots \\ Re[\dot{C}_q(f)] + j \cdot Im[\dot{C}_q(f)] \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Тогда амплитуды гармоник вычисляются следующим образом:

$$|C_q(f)| = \sqrt{Re[\dot{C}_q(f)]^2 + Im[\dot{C}_q(f)]^2}. \quad (11)$$

В качестве функции f может быть массив дискретных значений любой периодической функции, напряжения, тока и т. п. Пользуясь инструментом БПФ, можно оценить коэффициенты гармоник.

Гармонический состав выходных напряжений, реализованный с помощью использования быстрого преобразования Фурье:

$$\begin{aligned} \dot{C}(V_{ar}) &= 2FFT(V_{ar}); \\ \dot{C}(V_{br}) &= 2FFT(V_{br}); \\ \dot{C}(V_{cr}) &= 2FFT(V_{cr}), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\dot{C}(V_{ai})$ – вектор-столбец гармонических составляющих ряда Фурье в комплексной форме. Коэффициент «2» необходим именно вследствие комплексного представления ряда Фурье [20].

Получив гармонический состав выходного напряжения, определяют гармоники тока:

$$\begin{aligned} \dot{C}_q[i_a(V_{ar})] &= \dot{C}_q(V_{ar})/qZ; \\ \dot{C}_q[i_b(V_{br})] &= \dot{C}_q(V_{br})/qZ; \\ \dot{C}_q[i_a(V_{cr})] &= \dot{C}_q(V_{cr})/qZ, \end{aligned} \quad (13)$$

где z – комплексное сопротивление выходной цепи многозонного тиристорного регулятора. В случае активно индуктивной нагрузки z равно:

$$z = R_d + j\omega L. \quad (14)$$

Мгновенные значения тока находятся через обратное преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{1}{2}IFFT[\dot{C}[i_a(V_{ar})]]; \\ i_b &= \frac{1}{2}IFFT[\dot{C}[i_b(V_{br})]]; \\ i_c &= \frac{1}{2}IFFT[\dot{C}[i_c(V_{cr})]]. \end{aligned} \quad (15)$$

Эпора тока нагрузки трехфазного тиристорного регулятора на рис. 8. Сопоставления напряжения фазы A и тока данной фазы показано на рис. 9.

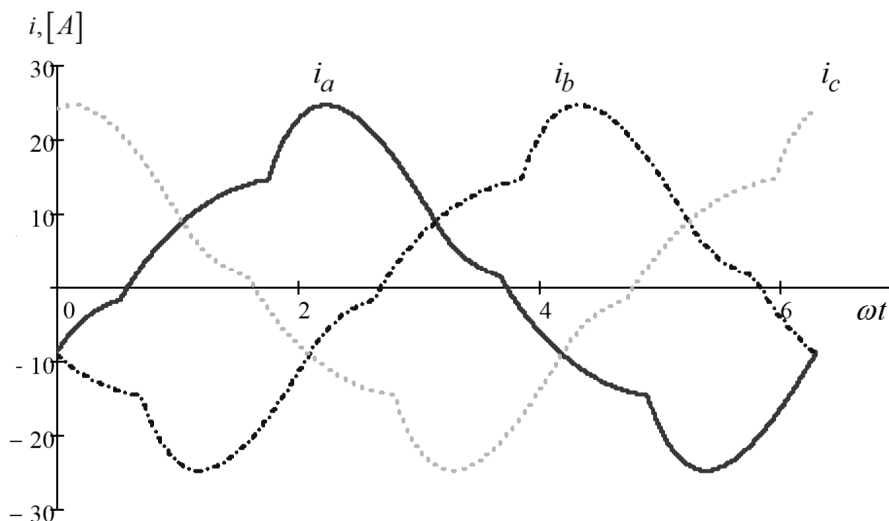


Рис. 8. Ток нагрузки трехфазного многозонного тиристорного регулятора

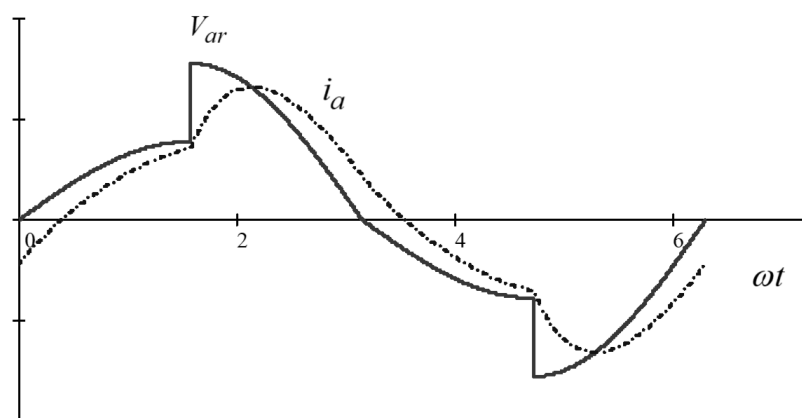


Рис. 9. Выходное напряжение и ток трехфазного многозонного тиристорного регулятора

Получив математическое описание фазных токов нагрузки, рассчитывают их средние и действующее значения, а также производят их гармонический анализ, пользуясь той же процедурой, что и для напряжения. Например, применим быстрое преобразование Фурье для тока фазы A :

$$\dot{C}(i_a) = 2FFT(i_a). \quad (16)$$

Зная вектор-столбец гармонических составляющих ряда Фурье в комплексной форме для фазного тока, рассчитывают коэффициент гармоник тока и интегральный коэффициент гармоник тока p -го порядка:

$$K_{ГТ} = \sqrt{\sum_{q=2}^{\infty} (C_q(i_a))^2} / C_1(i_a); \quad (17)$$

$$\bar{K}_{ГТ}^{(p)} = \sqrt{\sum_{q=2}^{\infty} (C_q(i_a)/q^p \cdot C_1(i_a))}. \quad (18)$$

Следующим шагом оценивается спектральный состав тока нагрузки многозонного тиристор-

ного регулятора напряжения. Например, было отмечено, что в спектре тока нагрузки многозонного тиристорного регулятора присутствуют только нечетные гармоники [21, 22]. При увеличении углов управления происходит увеличение этих нечетных гармоник.

На рис. 10 представлен нормированный по первой гармонике спектр тока фазы A .

На рис. 11 показаны результаты моделирования в программе PSIM. Представлены выходное напряжение с током и входное напряжение с током во второй (верхней) зоне регулирования. Далее сопоставим эти результаты с результатами аналитического расчета. Предложенный математический аппарат позволяет определить коэффициенты гармоник токов и напряжений предлагаемых регуляторов, и тем самым можно оценить качество этих параметров. Так, коэффициент гармоник входного и выходного тока двузонного тиристорного регулятора переменного напряжения оценивается менее 5 %.

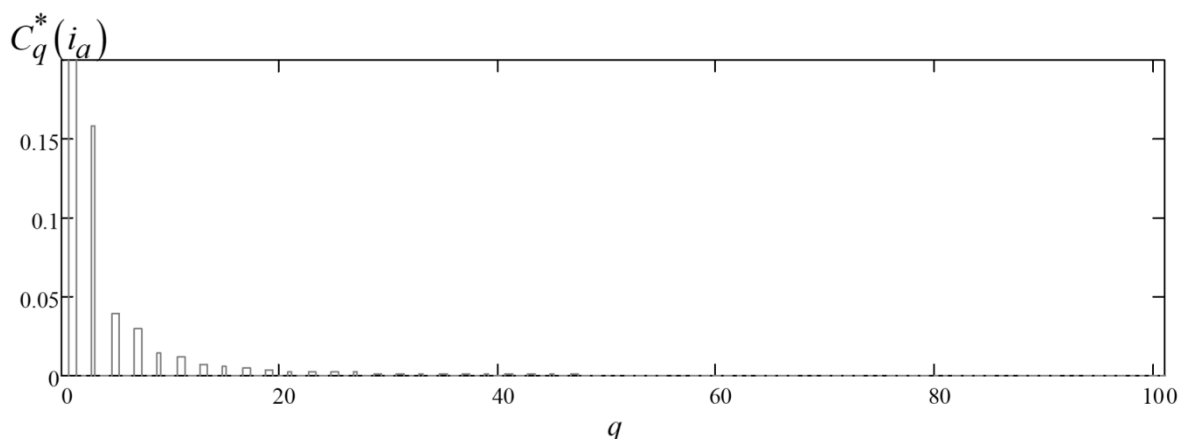


Рис. 10. Спектр тока нагрузки регулятора

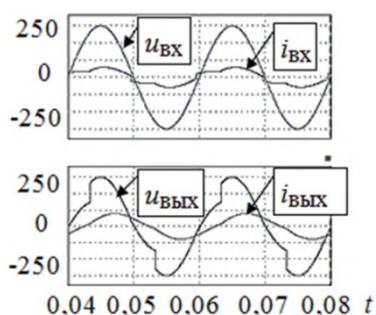


Рис. 11. Результаты моделирования однофазного РПН

Заключение

В данной работе был рассмотрен процесс создания математической модели для многозонного полупроводникового преобразователя, который выступает в качестве регулятора переменного напряжения. Данные регуляторы позволяют повысить качество выходного тока в устройствах плавного пуска, а также снизить величину броска пускового тока по сравнению с однозонными тиристорными регуляторами. Предложенные математические модели позволяют производить расчет электромагнитных процессов в установившемся режиме с меньшими затратами по временным и с меньшими требованиями к аппаратным ресурсам вычислительных комплексов по сравнению с существующими специализированными программными обеспечениями.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-48-543169.

Литература

1. Montero-Hernandez, O.C. Application of a boost AC-AC converter to compensate for voltage sags in electric power distribution systems / O.C. Montero-Hernandez, P.N. Enjeti // *PESC Proc.* – 2000. – Vol. 1. – P. 470–475. DOI: 10.1109/PESC.2000.878905

2. Fedyczak, Z. Three-phase AC-AC semiconductor transformer topologies and applications / Z. Fedyczak, M. Klutta, R. Strzelecki // *Proc. 2-nd Conf. PEDC.* – 2001. – P. 25–38.

3. Peng, F.Z. Simple topologies of PWM AC-AC converters / F.Z. Peng, L. Chen, F. Zhang // *IEEE power electronics letters.* – 2003. – vol. 1, no. 1. – P. 10–13. DOI: 10.1109/LPEL.2003.814961

4. Basic topologies of direct PWM AC choppers / D. Florica, M. Dumitrescu, I. Popa, S. Ivanov // *Annals of the University of Craiova. Electrical Eng. Series.* – 2006. – No. 30b. – P. 141–146.

5. Prasai, A. Dynamic capacitor-VAR and harmonic compensation without inverters / A. Prasai, D. Divan // *Proc. EPE.* – 2011. – File 831. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

6. Liu, Q. A novel AC-AC shunt active power filter without large energy storage / Q. Liu, Y. Deng, X. He // *EPE.* – 2011. – File 356. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

7. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд. – М.: Урайт, 2012. – 667 с.

8. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 4е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

9. Endrejat, F. Multiple large motor solid state soft start, control and communication system / F. Endrejat, J. Piorkowski // *Presented at SPEEDAM-Capri.* – 2004.

10. Zenginobuz, G. Performance optimization of induction motors during voltage-controlled soft starting / I. Cadirci, M. Ermis, C. Barlak // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2004. – vol. 19, no. 2. – P. 278–288. DOI: 10.1109/TEC.2003.822292

11. Мугалимов, Р.Г. Опыт создания энерго-сберегающих электроприводов волоочильных станков / Р.Г. Мугалимов, А.П. Мугалимова, А.П. Губайдуллин // *Промышленная электроника.* – 2009. – № 7. – С. 11–15.

12. Тиристорные системы плавного пуска высоковольтных двигателей на базе устройств

серии УБПВД / В.Ф. Шепелин, В.Н. Кальсин, Н.В. Донской и др. // Научно-издательские и проектные разработки. Инжиниринг. – С. 166–168.

13. Тиристорный преобразователь для плавного пуска мощных асинхронных электродвигателей / А. Ткачук, В. Кривовяз, В. Копырин, А. Силуков // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 54–57.

14. *Soft-starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations* / G. Zenginobus, I. Cadirci, M. Ermis, C. Barlak // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2001. – vol. 37, no. 5. – P. 1334–1347. DOI: 10.1109/28.952509

15. Zinoviev, G.S. *New Multi-Zone Soft Starters for Alternating-Voltage Machines* / G.S. Zinoviev, A.V. Udovichenko, H. Weiss // *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality.* – 2010 (*Pcim Europe 2010*). – Vols 1 and 2. – P. 993–998. DOI: 10.1541/ieejias.130.NL9_2

16. Зиновьев, Г.С. Новое семейство конверторов сетевого напряжения с зонным регулированием выходного напряжения / Г.С. Зиновьев // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 4 (33). – С. 113–122.

17. Грабовецкий, Г.В. Применение переключающих функций для анализа электромагнитных процессов в силовых цепях вентильных преобразователей частоты / Г.В. Грабовецкий // Элек-

тричество. – 1973. – № 6. – С. 42–46. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981814

18. Гарганеев, А.Г. Модификация метода переключающих функций для анализа вентильных преобразователей при работе на противо-ЭДС / А.Г. Гарганеев, С.А. Харитонов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 122–126.

19. Чаплыгин, Е.Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели: учеб. пособие по курсам «Автономные преобразователи» и «Моделирование электронных устройств и систем» по направлению «Электроника и микроэлектроника» / Е.Е. Чаплыгин; Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 64 с.

20. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь. – 1986. – 511 с.

21. Grishanov, E.V. *Aspects of common-mode leakage current suppression in single-phase PV-generation systems* / E.V. Grishanov, S.V. Brovanov // *The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017, Altai, Erlagol.* – 2017. – P. 541–546.

22. Basiri-Kejani, M. *Holomorphic Embedding Load-Flow Modeling of Thyristor-Based FACTS Controllers* / M. Basiri-Kejani, E. Gholipour // *IEEE Transactions on Power Systems.* – 2017. – Vol. 32, no. 6. – P. 4871–4879. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2682117

Удовиченко Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроники и электротехники», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; udovichenko@corp.nstu.ru.

Гришанов Евгений Валерьевич, м. н. с., кафедра «Электроники и электротехники», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; e.grishanov@corp.nstu.ru.

Дыбко Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой, кафедра «Электроники и электротехники», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; dybko@corp.nstu.ru.

Кучак Сергей Викторович, аспирант, ассистент, кафедра «Электроники и электротехники», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; kuchak.2012@corp.nstu.ru.

Брованов Сергей Викторович, д-р техн. наук, доцент, проректор по учебной работе, кафедра «Электроники и электротехники», Новосибирский государственный технический университет г. Новосибирск; brovanov@corp.nstu.ru.

Поступила в редакцию 17 марта 2018 г.

MATHEMATICAL MODEL FOR ELECTROMAGNETIC PROCESSES ANALYSIS IN SEMICONDUCTOR CONVERTERS

A.V. Udovichenko, *udovichenko@corp.nstu.ru*,

E.V. Grishanov, *udovichenko@corp.nstu.ru*,

M.A. Dybko, *dybko@corp.nstu.ru*,

S.V. Kuchak, *kuchak.2012@corp.nstu.ru*,

S.V. Brovanov, *brovanov@corp.nstu.ru*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The article considers a mathematical model used to calculate the instantaneous, average, average-nonquadratic values, electrical energy conversion quality indicators as well as to analyze the electromagnetic processes in semiconductor converters. The mathematical model is implemented with a spectral method based on switching functions. The method of switching functions is most suitable for the systems, in which the switching frequency is comparable to the output voltage frequency. It is due to this that the development of AC voltage regulators mathematical models appears promising. It should be noted that AC voltage regulators are widely used in chemical industry, municipal heat and water supply, mining and metallurgical electrical equipment, as well as soft starters for asynchronous machines. However, the existing methods of these regulators calculation are usually complicated and in some cases it is extremely difficult to conduct calculations and in different operating modes. The developed mathematical model allowed considering and analyzing various modes of AC voltage regulators operation. In addition, the spectral composition of the regulator with parallel-series thyristors connection and a multi-zone AC voltage regulator currents and voltages were estimated. The results of the mathematical modeling were verified by means of imitation modeling.

Keywords: AC voltage regulator, soft start, spectral method, harmonic coefficient.

This work was supported by RFBR and Government of Novosibirsk Region according to the research project No. 17-48-543169.

References

1. Montero-Hernandez O.C., Enjeti P.N. Application of a Boost AC-AC Converter to Compensate for Voltage Sags in Electric Power Distribution Systems. *PESC Proc*, 2000, vol. 1, pp. 470–475. DOI: 10.1109/PESC.2000.878905
2. Fedyczak Z., Klutta M., Strzelecki R. Three-Phase AC-AC Semiconductor Transformer Topologies and Applications. *Proc. 2-nd Conf. PEDC*, 2001, pp. 25–38.
3. Peng F.Z., Chen L., Zhang F. Simple Topologies of PWM AC-AC Converters. *IEEE Power Electronics Letters*, 2003, vol. 1, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.1109/LPEL.2003.814961
4. Floricau D., Dumitrescu M., Popa I., Ivanov S. Basic Topologies of Direct PWM AC Choppers. *Annals of the University of Craiova. Electrical Eng. Series*, 2006, no. 30 b, pp. 141–146.
5. Prasai A., Divan D. Dynamic Capacitor-VAR and Harmonic Compensation without Inverters. *Proc. EPE*, 2011, file 831, 1 CD.
6. Liu Q., Deng Y., He X. A Novel AC-AC Shunt Active Power Filter Without Large Energy Storage. *EPE*, 2011, file 356, 1 CD.
7. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. 5th ed. Moscow, Urait Publ., 2012. 667 p.
8. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher Harmonics in Power Supply Systems for Industrial Facilities]. 4rd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p.
9. Endrejat F., Piorkowski J. Multiple Large Motor Solid State Soft Start, Control and Communication System. *SPEEDAM-Capri*, 2004.
10. Zenginobuz G., Cadirci I., Ermis M., Barlak C. Performance Optimization of Induction Motors during Voltage-Controlled Soft Starting. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 278–288. DOI: 10.1109/TEC.2003.822292
11. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Gubaidullin A.R. [The Experience of Creating Energy-Saving Electric Drives of Drawing Mills]. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics], 2009, no. 7, pp. 11–15. (in Russ.)

12. Shepelin V.F., Kal'sin V.N., Donskoi N.V., Fedorov B.S., Nikitin A.S. [Thyristor Soft Start Systems for High-Voltage Motors Based on UBPVD Series Devices]. *Nauchno-izdatel'skie i proektnye razrabotki. Inzhiniring* [Scientific and Publishing and Design Developments. Engineering], pp. 166–168. (in Russ.)
13. Tkachuk A., Krivovyaz V., Kopyrin V., Silukov A. [Thyristor Converter for Smooth Starting of Powerful Asynchronous Electric Motors]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2007, no. 1, pp. 54–57. (in Russ.)
14. Zenginobus G., Cadirci I., Ermis M., Barlak C. Soft-Starting of Large Induction Motors at Constant Current with Minimized Starting Torque Pulsations. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2001, vol. 37, no. 5, pp. 1334–1347. DOI: 10.1109/28.952509
15. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V., Weiss H. New Multi-Zone Soft Starters for Alternating-Voltage Machines. *International Exhibition and Conference For Power Electronics. Intelligent Motion and Power Quality 2010 (Pcim Europe 2010)*, vols 1 and 2, pp. 993–998. DOI: 10.1541/ieejias.130.NL9_2
16. Zinov'ev G.S. [A New Family of Grid Voltage Converters with Zone-Controlled Output Voltage], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of the NSTU], 2008, no. 4 (33), pp. 113–122. (in Russ.)
17. Grabovetskiy G.V. [Application of Switching Functions for the Analysis of Electromagnetic Processes in Power Circuits of Gate Frequency Converters]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1973, no. 6, pp. 42–46. (in Russ.) DOI: 10.1109/EDM.2017.7981814
18. Garganeev A.G., Kharitonov S.A. [Modification of the Method of Switching Functions for the Analysis of Valve Converters During Counter-emf Operation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 4, pp. 122–126. (in Russ.)
19. Chaplygin E.E. *Inventory napryazheniya i ikh spektral'nye modeli: ucheb. posobie* [Voltage Inverters and Their Spectral Models: Training Manual]. Moscow, MPEI Publ., 2003. 64 p.
20. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. dlya vuzov* [Radio Engineering Circuits and Signals. Textbook for High Schools]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 511 p.
21. Grishanov E.V., Brovanov S.V. Aspects of Common-Mode Leakage Current Suppression in Single-Phase PV-Generation Systems. *The 18th International Conference of Young Specialists on Micro/nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2017, Altai, Erlagol*, 2017, pp. 541–546.
22. Basiri-Kejani M., Gholipour E., Holomorphic Embedding Load-Flow Modeling of Thyristor-Based FACTS Controllers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4871–4879. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2682117

Received 17 March 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в многозонном полупроводниковом преобразователе / А.В. Удовиченко, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 82–91. DOI: 10.14529/power180111

FOR CITATION

Udovichenko A.V., Grishanov E.V., Dybko M.A., Kuchak S.V., Brovanov S.V. Mathematical Model for Electromagnetic Processes Analysis in Semiconductor Converters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 82–91. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180111
