

Иоффе И.С., Зюзев А.М., Костылев А.В., Нестеров К.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ

Активный выпрямитель напряжения зачастую применяют в системах энергоснабжения, таких как регулируемый электропривод, электрогенераторы различного типа, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, применяемые для питания собственных нужд или в качестве систем поддержания электрической сети при параллельной работе. В таких системах нейтральный провод при необходимости можно подключить к средней точке конденсаторов на стороне постоянного тока преобразователя или создать дополнительный канал для протекания токов нулевой последовательности через дополнительную стойку транзисторов. Отметим, что схема подключения нейтрального провода к средней точке конденсаторов имеет ряд недостатков, таких как дисбаланс напряжений между конденсаторами в звене постоянного тока, а также протекание через конденсаторы токов высших гармоник и токов нулевой последовательности при их компенсации. Устранение указанных проблем представляется возможным при использовании схемы с дополнительной стойкой. Данная компоновка электрического полупроводникового преобразователя даёт возможность использования полного напряжения в звене постоянного тока и управления токами нулевой последовательности. В статье обсуждается построение математической модели активного выпрямителя с четырьмя транзисторными стоками как объекта управления на основе анализа комбинаций состояний ключей при работе на нагрузку. Приводится математическое описание активного выпрямителя с дополнительной стойкой в матричной форме. Предлагаемая математическая модель может быть использована для синтеза регуляторов системы автоматического управления преобразователем и выделения токов нулевой последовательности с целью их компенсации, что является значимым фактором для будущих исследований всей системы активного выпрямителя с дополнительной стойкой.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, полупроводниковый преобразователь, математическая модель, нейтральный провод, дополнительная стойка, энергоэффективность, нестационарные режимы, нулевая последовательность, обратная последовательность, несимметричные режимы.

ВВЕДЕНИЕ

Активные выпрямители напряжения (АВН) в настоящее время являются важными элементами энергетических систем [1-5]. Данные полупроводниковые устройства определяют эффективность функционирования электротехнического комплекса, состоящего из электроприводных или генераторных установок. Силовые схемы активных выпрямителей в ряде применений должны иметь нейтральный провод. Преобразователь в таком случае формирует в несимметричных режимах работы токи нулевой и обратной последовательности [1], которые необходимо учитывать и компенсировать за счёт действия системы автоматического регулирования [2, 6]. Для применений АВН как элемента сети электроснабжения необходимо исследовать распределение электрических переменных в данной системе. Так как решение данной проблемы не нашло должного отражения в имеющихся публикациях, актуальной является задача разработки математической модели активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом при учете несимметрии в его каналах. Другой важной задачей является полное использование напряжения в звене постоянного тока при работе системы с нейтральным проводом. При появлении ещё одной ветви (нейтральной) создаётся дополнительный путь для протекания тока в цепи и нулевой потенциал. Для расширения диапазона регулирования выходного напряжения применяется алгоритм ШИМ с предмодуляцией по третьей гармонике [3]. Однако третья

гармоника при схеме с нейтральным проводом оказывает влияние на работу схемы, так как потенциал в четвёртой стойке изменяется с её учётом, поэтому необходимо компенсировать данное влияние. Исходя из вышесказанного, в работе были выдвинуты следующие задачи:

- формирование комбинаций состояний ключей при работе АВН на нагрузку;
- применение алгоритма ШИМ с предмодуляцией по третьей гармонике;
- представление математической модели АВН в матричной форме записи.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАГРУЗКИ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Для понимания принципа работы активного выпрямителя напряжения с дополнительной стойкой обратимся к упрощенной схеме замещения электрического преобразователя, изображенного на **рис. 1**.

АВН в своём составе имеет восемь ключей $1A, 1B, 1C, 1N, 2A, 2B, 2C, 2N$, обеспечивающих разные режимы работы нагрузки Z_a, Z_b, Z_c . Средней точкой преобразователя является точка потенциала φ_s , которая делит пополам напряжение u_d в звене постоянного тока. Данный преобразователь имеет два ключа в стойке, что, в свою очередь, определяет количество комбинаций состояний ключей, которое равно $2^4=16$.

Все состояния АВН с дополнительной стойкой отображает **таблице**, в которой приводятся векторные диаграммы в фазных координатах $nabc$ и матрицы напряжения питания нагрузки.

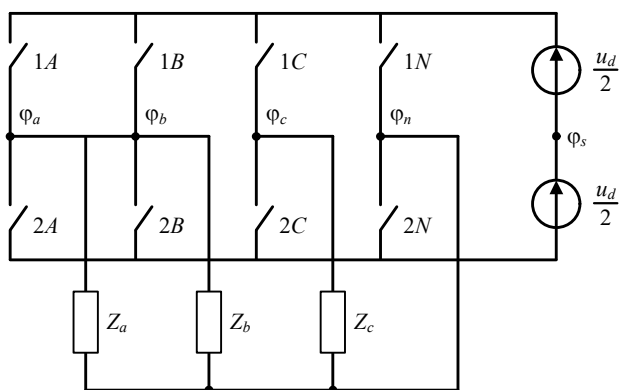


Рис. 1. Упрощенная схема АВН с дополнительной стойкой

Состояний АВН с дополнительной стойкой

№	Комбинация	Схема питания нагрузки	Диаграмма состояний	Вектора
1	1A; 2B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
2	1A; 1B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
3	2A; 1B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
4	2A; 1B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
5	2A; 2B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
6	1A; 2B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
7	1A; 1B; 1C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
8	2A; 2B; 2C; 2N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
9	2A; 1B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

10	2A; 2B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
11	1A; 2B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
12	1A; 2B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$
13	1A; 1B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
14	2A; 1B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
15	2A; 2B; 2C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$
16	1A; 1B; 1C; 1N			$u_d \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Как видим, получается шестнадцать диаграмм состояний, восемь из которых являются прямыми и восемь инверсными. В конечном итоге годограф вектора напряжения при разных комбинациях состояния ключей образует два одинаковых шестиугольника в проекциях $0a\beta$, что следует из диаграммы состояний.

АЛГОРИТМ ШИРотно-ИМпульсной МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ АВН С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Базовые алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) не позволяют раскрыть всех возможностей схем инвертора. В связи с этим применяются модифицированные (специальные) алгоритмы ШИМ с использованием предварительной модуляции сигнала. На рис. 2 показана данная реализация ШИМ, содержащая в своём составе генератор сигнала предмодуляции (ГСПР) по третьей гармонике и генератор опорного пилообразного сигнала (ГОС).

Задающими воздействиями в данной схеме являются синусоидальные сигналы $u_{a,m}^*(t)$, $u_{b,m}^*(t)$, $u_{c,m}^*(t)$ с амплитудой задающего напряжения U_0 . Введение предмодуляции по третьей гармонике позволяет уменьшить амплитуду результирующих задающих воздействий u_a^* , u_b^* , u_c^* на входах ШИМ в $\sqrt{3}/2$ раз. В связи с этим новое предельно-допустимое пороговое значение будет равно [4]:

$$U_m = \frac{2}{\sqrt{3}} U_0 \approx 1,155 U_0. \quad (1)$$

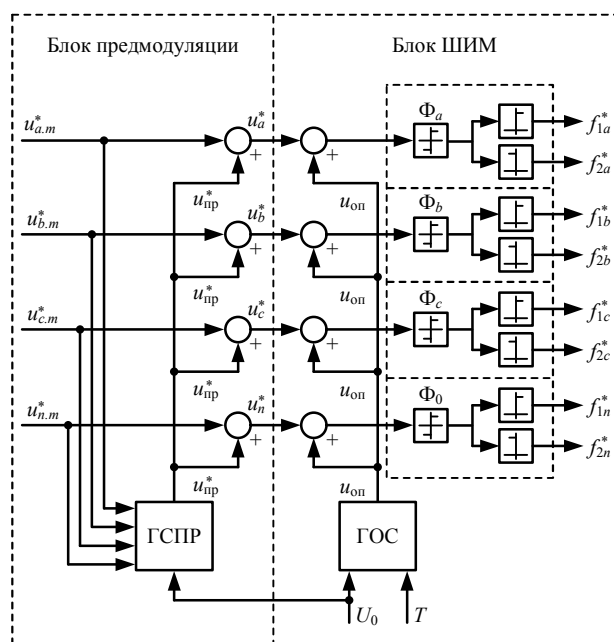


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ШИМ АВН с дополнительной стойкой

Важно заметить, что задающим сигналом ШИМ для дополнительной стойки (нейтральной стойки) будет нулевой сигнал, что обеспечит скважность импульсов $\tau = 0.5$. Однако при введении сигнала предмодуляции из задающего нулевого сигнала необходимо вычесть сигнал третьей гармоники для компенсации его влияния. Этот вывод следует из условия баланса фазных напряжений, а именно разности нулевых и фазных потенциалов.

Рассмотрим задающие воздействия блока ШИМ, представленного на рис. 2.

Вектор фазных и нулевых задающих воздействий:

$$U_f^* = \begin{bmatrix} u_a^* \\ u_b^* \\ u_c^* \end{bmatrix}, \quad U_n^* = \begin{bmatrix} u_n^* \\ u_n^* \\ u_n^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где задающие фазные и нулевые воздействия определяются следующими уравнениями

$$\begin{aligned} u_a^* &= U_m \cos(\theta_u^*) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \\ u_b^* &= U_m \cos\left(\theta_u^* - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \\ u_c^* &= U_m \cos\left(\theta_u^* - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \end{aligned} \quad (3)$$

$$u_n^* = -\frac{1}{6} U_m \cos(3\theta_u^*), \quad (4)$$

в которых U_m – модуль амплитуды задающего вектора напряжения; θ_u^* – угол поворота задающего вектора напряжения; $-1/6 \cdot U_m \cos(3\theta_u^*)$ – сигнал предмодуляции по третьей гармонике.

Вектор напряжения опорного сигнала

$$U_{оп} = \begin{bmatrix} u_{оп} \\ u_{оп} \\ u_{оп} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коммутационные векторы-функции для фазных и нулевых воздействий соответственно:

$$F_f^* = \begin{bmatrix} f_a^* \\ f_b^* \\ f_c^* \end{bmatrix}, \quad F_n^* = \begin{bmatrix} f_n^* \\ f_n^* \\ f_n^* \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$F_f^* = sg(U_f^* + U_{оп}), \quad F_n^* = sg(U_n^* + U_{оп}); \quad (7)$$

$$sg(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > 0; \\ 0, & \text{при } x \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Потенциалы выходных шин АВН с дополнительной стойкой:

$$\Phi_f = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = u_d F_f^*; \quad \Phi_n = \begin{bmatrix} \Phi_n \\ \Phi_n \\ \Phi_n \end{bmatrix} = u_d F_n^*, \quad (9)$$

где u_d – напряжение в звене постоянного тока.

Вектор фазных напряжений является разностью векторов фазного и нулевого потенциала:

$$U = \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \Phi_f - \Phi_n. \quad (10)$$

Исходя из приведённых уравнений, можно заметить, что введение сигнала предмодуляции по третьей гармонике необходимо учитывать в нейтральном (нулевом) канале задания ШИМ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

При разработке математической модели АВН с дополнительной стойкой были определены следующие допущения:

- отсутствие потерь при переключении ключей;
- ключи рассматриваются как полностью управляемые с двухсторонней проводимостью;
- переключение ключей происходит мгновенно, в связи с чем можно принять время переключения ключей равным нулю;
- пассивные элементы буферного реактора являются идеализированными, что обеспечивает постоянство параметров активно-индуктивных цепей.

Описание математической модели целесообразно проводить в фазных координатах abc , что в будущем позволит упростить синтез регуляторов системы автоматического регулирования при работе в несимметричных режимах, за счёт управления каждой фазой активного выпрямителя напряжения (пофазного регу-

лирования). С учётом вышеизложенного введем алгебраические векторы-столбцы для относительных значений фазных токов:

$$I_f = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

пассивных элементов, а именно активного сопротивления и индуктивности буферного реактора (с учётом нагрузки):

$$R = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} l_a & 0 & 0 \\ 0 & l_b & 0 \\ 0 & 0 & l_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Математическое описание объекта управления определяется следующими уравнениями:

$$0 = U + RI_f + L \frac{dI_f}{dt}; \quad (13)$$

$$\Phi_f = u_d F_f^*; \quad (14)$$

$$\Phi_n = u_d F_n^*; \quad (15)$$

$$U = \Phi_f - \Phi_n; \quad (16)$$

$$F_f = \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(U_f^* + U_{\text{он}}); \quad (17)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(U_n^* + U_{\text{он}}); \quad (18)$$

$$i_n = i_a + i_b + i_c; \quad (19)$$

$$i_d = F_f I; \quad (20)$$

$$i_d = F_f i_n; \quad (21)$$

$$i_d - i_n = C \frac{du_d}{dt}, \quad i_d - i_n = C \frac{du_d}{d\tau}, \quad (22)$$

где i_d – ток в звене постоянного тока; i_n – ток возмущения; C – ёмкость конденсатора в звене постоянного тока.

На рис. 3 представлена структурная схема, описанная уравнениями (13)–(22). Предлагаемая модель раскрывает структуру АВН как объекта управления, что создаёт предпосылки для синтеза регуляторов тока и напряжения для каждой фазы (пофазного управления).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВН С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОЙ

Моделирование работы АВН на основе приведённой системы уравнений проведено в абсолютных единицах в среде Matlab Simulink (рис. 4). Корректность работы модели подтверждается сопоставлением с результатами моделирования, полученными в библиотеке SimPowerSystems. Вследствие данного утверждения предлагаемую модель можно считать адекватной.

Результаты моделирования АВН в режиме генератора при симметричном режиме работы нагрузки приведены на рис. 5–8.

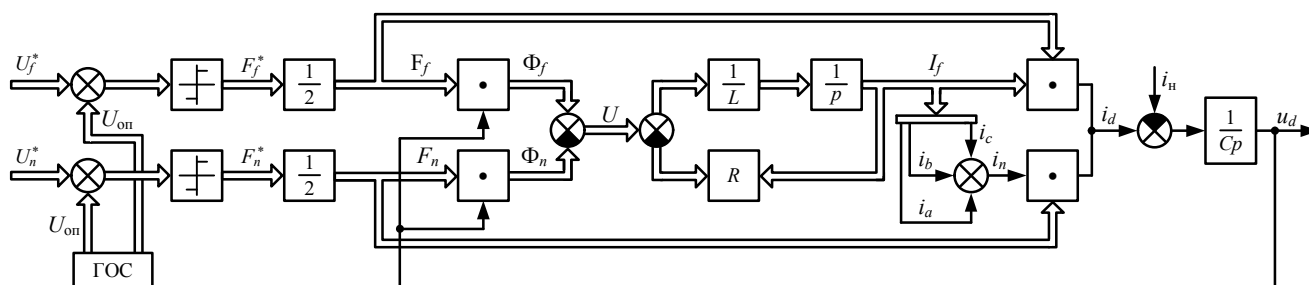


Рис. 3. Математическая модель АВН с дополнительной стойкой

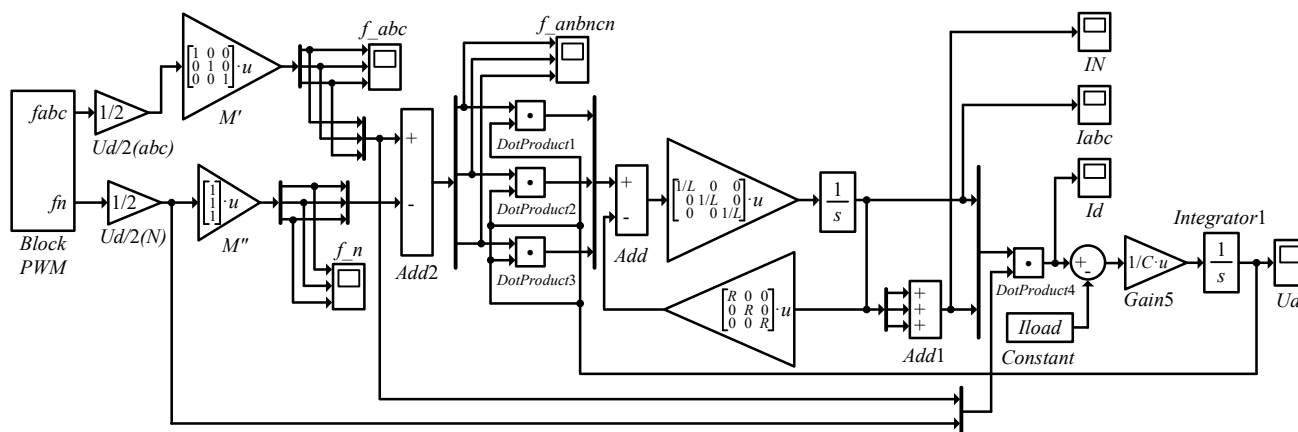


Рис. 4. Математическая модель АВН с дополнительной стойкой в пакете Matlab Simulink

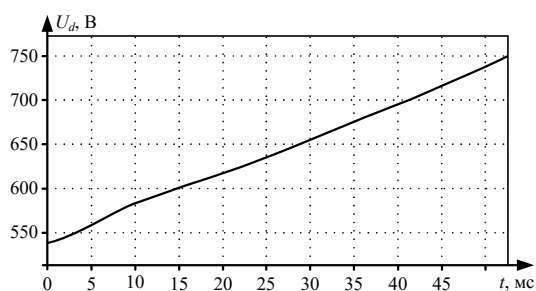


Рис. 5. График напряжения в звене постоянного тока

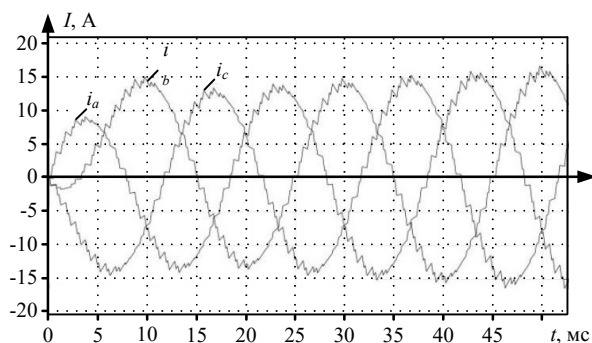
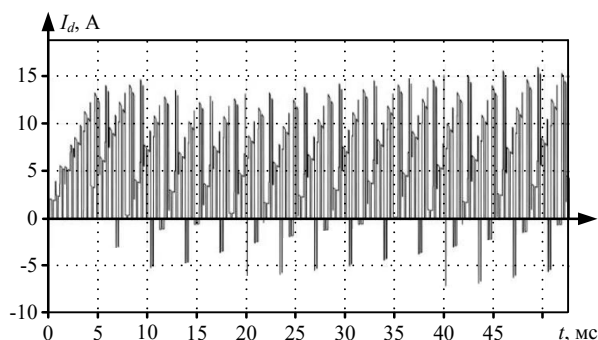
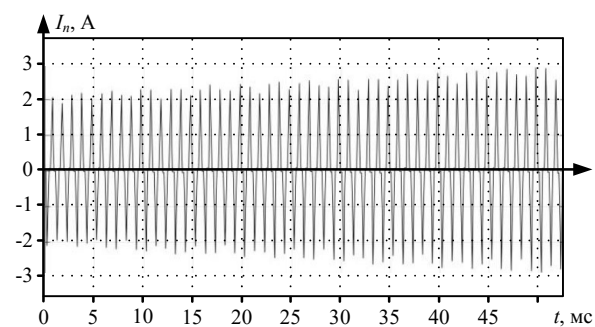


Рис. 6. Графики фазных токов АВН

Рис. 7. Графики тока i_d звена постоянного токаРис. 8. Графики тока i_n в нейтральном проводе

Параметры объекта взяты из расчёта мощности генерирующего устройства равного 10 кВт:

$U_d = 540$ В – начальное напряжение в звене постоянного тока;

$R = 10$ Ом – активное сопротивление буферного реактора;

$L = 0,00551$ Гн – индуктивность буферного реактора;

$C = 0,0012$ Ф – ёмкость конденсатора в звене постоянного тока.

Модель конденсатора в данном случае представляет собой интегрирующее звено с начальными условиями, равными напряжению 540 В. Из графиков видно увеличение напряжения U_d , обусловленное зарядкой конденсатора. В связи с увеличением напряжения происходит рост фазных токов, что отражает график на рис. 6. Надо отметить, что представленная математическая модель является симметричной, что соответствует нулевому среднему значению фазного тока на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлено математическое описание АВН как объекта управления. Рассматриваемый преобразователь является нелинейным, многомерным и многосвязным объектом с внутренними перекрёстными обратными связями. Этот факт необходимо будет учитывать при разработке системы управления и синтезе регуляторов АВН. Отметим, что для режима несимметричной нагрузки структура модели объекта не изменяется, причём предлагаемая структура позволяет выделить токи нулевой и обратной последовательности [1] для их компенсации при пофазном способе регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.
2. Киселёв М.Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трёхфазных системах электропитания на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности: дис... канд. техн. наук. 05.09.01 / Киселёв Михаил Геннадьевич. Москва, 2017.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во Новоуральского государственного технологического университета, 2001. 250 с.
4. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
5. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
6. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И. Электропривод переменного тока с двухсекционным инвертором напряжения // Всероссийская конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. ИЭГУ. 2012. С. 345-350.

Поступила в редакцию 12 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF AN ACTIVE FRONT-END VOLTAGE RECTIFIER WITH A NEUTRAL WIRE

Igor S. Ioffe

Engineer, a Post-graduate student, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: effect66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6595-206X>.

Anatolii M. Ziuzev

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>.

Aleksey V. Kostylev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-9819>.

Konstantin E. Nesterov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Drive and Automation of Industrial Facilities, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: k.e.nesterov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-8556>.

Active front-end is often used in power supply systems, such as regulated electric drive, electric generators of various types, including those based on renewable energy sources, used to power their own needs or as systems for maintaining the electrical network in parallel operation. In such systems, if necessary, the neutral wire can be connected to the midpoint of the capacitors on the DC side of the Converter or create an additional channel for the flow of zero-sequence currents through an additional branch of transistors. It should be noted that the scheme for connecting the neutral wire to the midpoint of the capacitors has a number of disadvantages, such as the voltage imbalance between the capacitors in the DC link, as well as the flow of currents of higher harmonics and zero-sequence currents through the capacitors when they are compensated. These problems can be resolved by using a scheme with an additional branch. This arrangement of an electric semiconductor Converter makes it possible to use the full voltage in the DC link and control the zero-sequence currents. The article discusses the construction of a mathematical model of an active front-end with four transistor branches as a control object based on the analysis of key state combinations when working on a load. A mathematical description of an active front-end with an additional branch in matrix form is given. The proposed mathematical model can be used for the synthesis of regulators of the automatic control system of the Converter and the allocation of zero-sequence currents in order to compensate for them, which is a significant factor for future research of the entire system of an active front-end with an additional branch.

Keywords: active front-end (AFE), semiconductor converter, mathematical model, neutral wire, additional brunch, energy efficiency, non-stationary modes, zero sequence, reverse sequence, asymmetric modes.

REFERENCES

1. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of chain theory]. Moscow: Energy, 1975. 752 p. (In Russian)
2. Kiselev M. G. *Issledovanie i razrabotka metodov simmetrirovaniya tokov v trykhfaznykh sistemakh elektro-snabzheniya na osnove silovykh elektronnykh ustroystv kompensatsii neaktivnoy moshchnosti. Kand. Diss.* [Research and development of methods for simulating currents in three-phase power supply systems based on power electronic devices for compensation of inactive power Ph.D. Diss.] Kiselev, Mikhail Gennadevich. Moscow, 2017.
3. Efimov A. A., Schreiner R. T. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [Active converters in regulated AC drives]. Novouralsk: Publishing house of the Novouralsk state technological University, 2001. 250 p. (In Russian)
4. Schreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg: URO RAS, 2000. 654 p. (In Russian)
5. Pronin M. V. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet)* [Power fully controlled semi-conductor converters (modeling and calculation)]. St. Petersburg: Electrosila, 2003, 172 p. (In Russian)
6. Schreiner R. T., Kostylev A.V., Shilin S. I. Alternating current electric drive with the two-section voltage source inverter. *Vserossiyskaya konferentsiya po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2012* [All-Russian conference on automated electric drive AEP-2012]. Pp. 345-350. (In Russian)

Математическая модель активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом / И.С. Иоффе, А.М. Зюзов, А.В. Костылев, К.Е. Нестеров // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-41-46)

Ioffe I.S., Ziuzev A.M., Kostylev A.V., Nesterov K.E. Mathematical Model of an Active Front-end voltage rectifier with a Neutral Wire. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 41-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-41-46)