

УДК 621.316.722.025

НОВЫЙ ТИП РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОММУТИРУЕМЫМ КВАЗИИМПЕДАНСОМ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И НАГРУЗКИ

А.В. Удовиченко*Новосибирский государственный технический университет*

Предлагается новый тип регуляторов переменного напряжения, основанный на коммутации квазиимпеданса источника питания и нагрузки. Рассмотренный конвертор может быть использован как кондиционер качества напряжения, устройство плавного пуска асинхронных двигателей, регулятор реактивной мощности, активный фильтр гармоник, компенсатор провалов в кривой напряжения, симметрирующее устройство в многофазных сетях. Приведены результаты математического моделирования и аналитический расчет действующих значений по первым гармоникам токов и напряжений.

Ключевые слова: стабилизация, квазиимпеданс, регулятор переменного напряжения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-63-73

Введение

Потребность стабилизации, регулирования переменного напряжения актуальна для всех сетей переменного тока и особенно для «умных» сетей. Традиционно эти задачи решаются использованием соответствующих преобразователей силовой электроники на базе автономных инверторов напряжения или инверторов тока. Но подобные конверторы требуют применения громоздких, дорогих реактивных элементов в виде электролитических конденсаторов или реакторов соответственно. Также наличие в устройстве внутреннего звена постоянного напряжения или тока обостряет проблемы с ликвидацией аварийных режимов в этих звеньях.

Известные альтернативные решения указанных проблем «умных» сетей основываются на других типах преобразователей, а именно регуляторах переменного напряжения, циклоконверторах, матричных преобразователях [1, 2]. Причем все эти конверторы являются однокаскадными и соответственно не содержат внутри себя звена постоянного тока с большими реактивными накопительными элементами.

Для успешного решения указанных задач необходимо наличие эффективных регуляторов переменного напряжения. Существующие тиристорные регуляторы с фазовым регулированием не подходят для решения этих задач из-за искаженных форм входных и выходных токов и задержки в регулировании, связанной со свойствами естественной коммутации. В середине 90-х годов прошлого века появились транзисторные регуляторы переменного напряжения, характеризующиеся практически синусоидальными формами входных и выходных токов и хорошей динамикой их регулирования при высоких частотах переключения транзисторов [3–4].

Стоит здесь отметить возможность повышения выходного напряжения по отношению к входному без использования трансформатора [3–5]. Семейство таких регуляторов переменного напряжения получается путем соответствующей адаптации известных схем повышающих и повышающе-понижающих *DC-DC* регуляторов к работе в цепях переменного тока [3–6].

1. Новый тип повышающе-понижающих регуляторов переменного напряжения с общим коммутатором

В работе предлагается и исследуется новый тип регуляторов переменного напряжения, основанный на коммутации квазиимпеданса источника питания и нагрузки с высокой частотой [7–9].

Рассматривается регулятор переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки. На рис. 1 представлена его схема. Векторная диаграмма, поясняющая принцип работы регулятора, показана на рис. 2. На рис. 3 приведены временные диаграммы токов и напряжений, где а) входной ток i_A и напряжение фазы Au_A предлагаемого регулятора переменного напряжения, б) импульсы, подаваемые на ключ трехфазного диодного моста в нуле источника, в) ток конденсатора и напряжение на конденсаторе, г) ток в индуктивности и напряжение на индуктивности, д) выходной ток i_{outA} и напряжение нагрузки u_{outA} предлагаемого регулятора переменного напряжения.

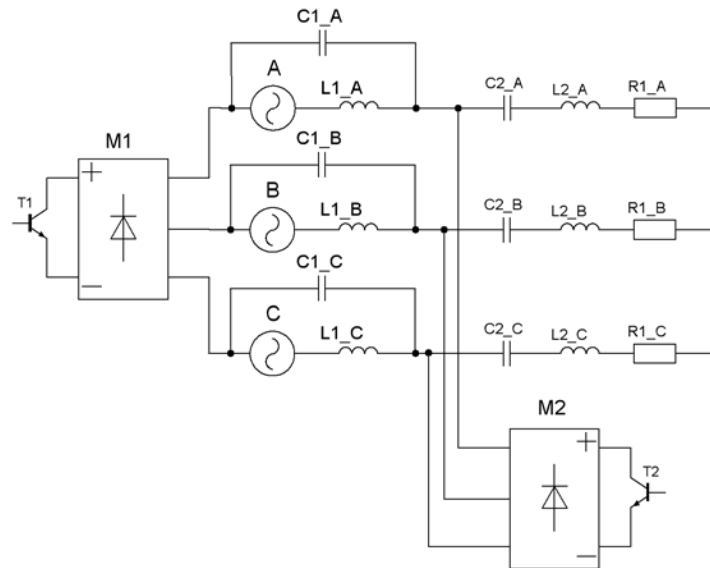


Рис. 1 – Регулятор переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки

Fig. 1 – An AC voltage regulator with a switch at a zero point of the power supply and the load circuit

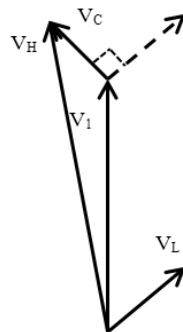


Рис. 2 – Векторная диаграмма

Fig. 2 – A phasor diagram

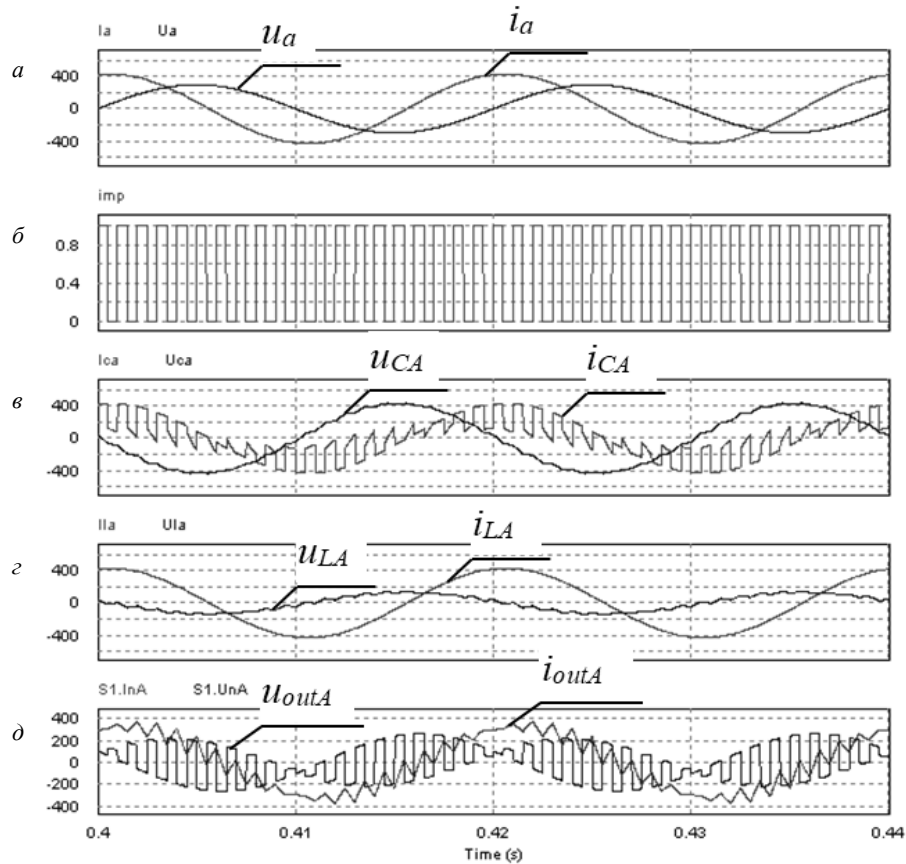


Рис. 3 – Временные диаграммы токов и напряжений регулятора переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки

Fig. 3 – Waveforms of the currents and voltages of an AC voltage regulator with a switch at a zero point of the power supply and the load circuit

Внешний емкостный (конденсаторный) импеданс добавляется к собственному индуктивному импедансу собственно источника питания. Известно, что фаза напряжения на емкости в последовательной цепи противоположна фазе напряжения на индуктивности, т. е. напряжение на конденсаторе добавляется к напряжению источника питания. Можно повышать, понижать и стабилизировать напряжение на нагрузке, если регулировать с высокой частотой относительные длительности подключения нагрузки к цепям с указанными различными импедансами.

По полученным данным в процессе моделирования в *PSIM* была построена регулировочная характеристика (рис. 4), семейство внешних характеристик (рис. 5), зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции (рис. 6) для рассматриваемой схемы. Также оценено качество выходного напряжения и входного тока, которое представлено в виде зависимостей их коэффициента гармоник напряжения от глубины модуляции (рис. 7) и коэффициента гармоник тока от глубины модуляции (рис. 8).

Из регулировочной характеристики следует, что схема имеет полный диапазон регулирования до нуля напряжения. Также она обеспечивает повышение выходного напряжения до уровня 1,4–1,5.

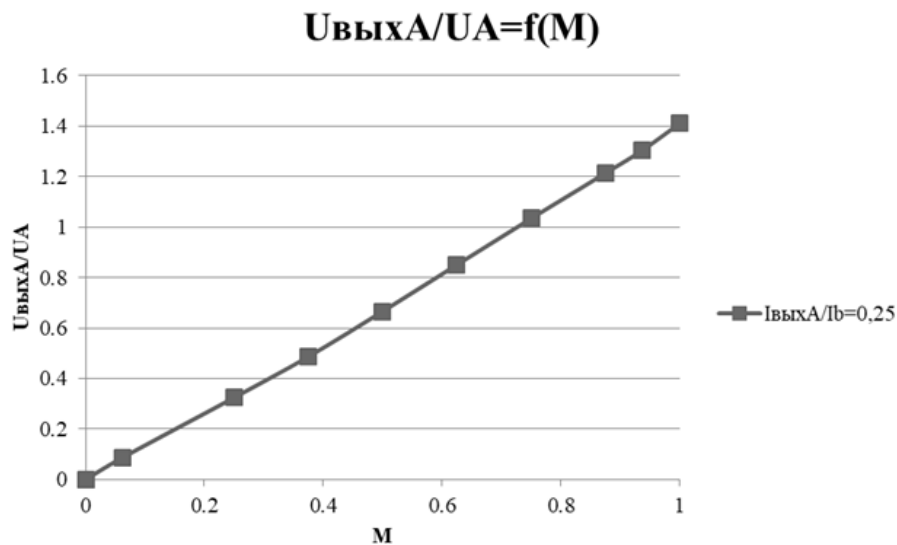


Рис. 4 – Регулировочная характеристика (где $I_b = \frac{U_A}{\omega L_A}$)

Fig. 4 – The control characteristic ($I_b = \frac{U_A}{\omega L_A}$)

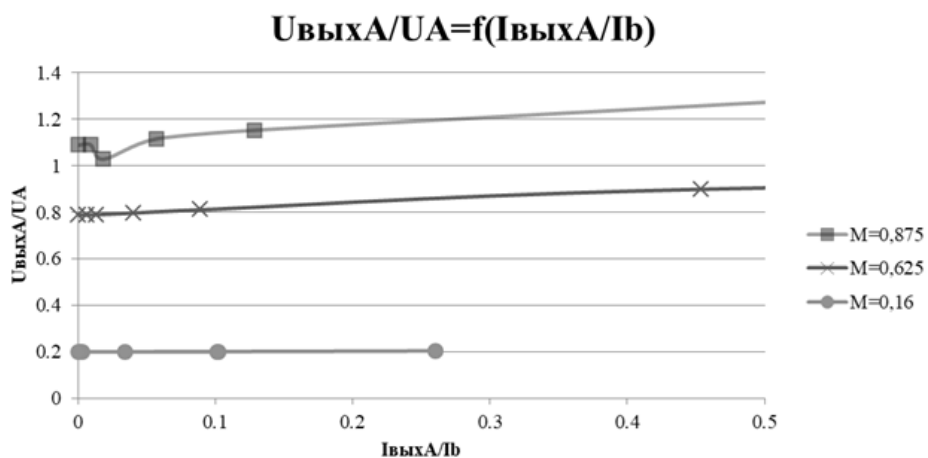


Рис. 5 – Семейство внешних характеристик

Fig. 5 – Load characteristics

Представлены внешние характеристики регулятора для разных глубин модуляции. Схема имеет нарастающие характеристики (при $M = 0.875$ и $M = 0.625$), а также «жесткую» внешнюю характеристику (при $M = 0.16$).

Качество выходного напряжения и входного тока остается высоким в рабочем диапазоне, при этом оно ухудшается с ростом тока нагрузки.

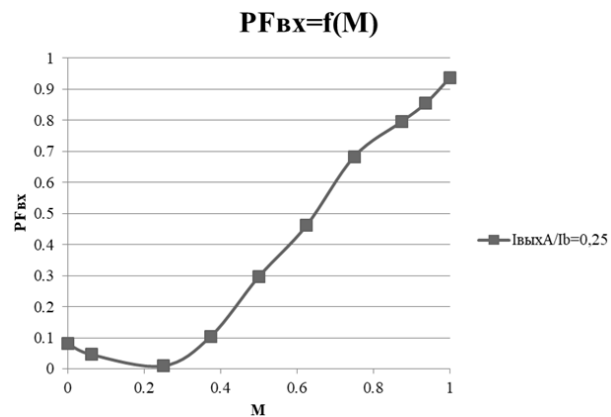


Рис. 6 – Зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции

Fig. 6 – The dependence of the input power factor on the modulation index

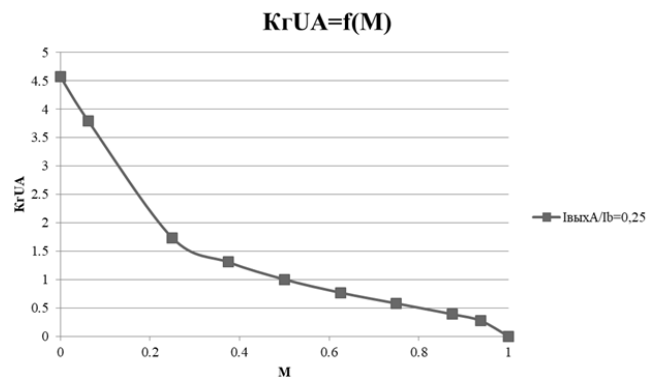


Рис. 7 – Коэффициент гармоник выходного напряжения

Fig. 7 – The dependence of the total output voltage harmonic distortion on the modulation index

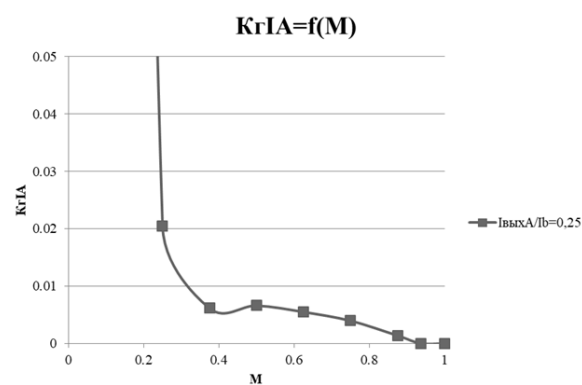


Рис. 8 – Коэффициент гармоник входного тока

Fig. 8 – The dependence of the total input current harmonic distortion on the modulation index

2. Аналитический расчет и результаты

Для построения математической модели регулятора по гладкой составляющей (первой гармонике) воспользуемся прямым методом расчета АДУ2 [2].

Схема замещения одной фазы регулятора показана на рис. 9.

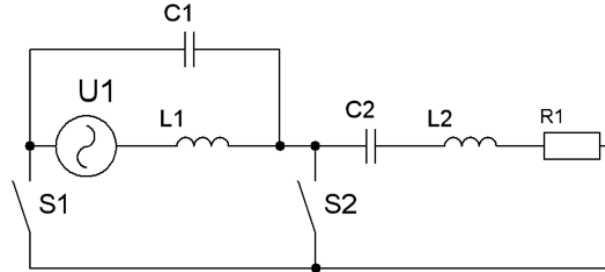


Рис. 9 – Схема замещения одной фазы регулятора переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки

Fig. 9 – An equivalent circuit of one phase of an AC voltage regulator with a switch at a zero point of the power supply and the load circuit

Дифференциальные уравнения схемы для обоих ее состояний имеют вид:

$$L_1(1-\psi) \frac{di_1}{dt} + u_{C2} + R_1 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = u_1(1-\psi); \quad (1)$$

$$u_{C1} - L_1 \frac{di_1}{dt} = -u_1; \quad (2)$$

$$-C_1 \frac{du_{C1}}{dt} - i_1 + C_2(1-\psi) \frac{du_{C2}}{dt} = 0; \quad (3)$$

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + i_1 - i_2 = 0. \quad (4)$$

Здесь ψ – коммутационная функция, равная единице при включенном ключе S_2 и нулю при включенном состоянии ключа S_1 .

Спектр коммутационной функции выглядит следующим образом:

$$\psi = M_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\pi n} \sin(2\pi n M_1) \cos(2\pi n f t) - \frac{1}{\pi n} (\cos(2\pi n M_1) - 1) \sin(2\pi n f t) \right), \quad (5)$$

где f – частота переключения ключей; $M_1 = 1 - M$; M – глубина модуляции. При $n = 1$ расчет произведен по первой гармонике. Таким образом,

$$\psi_{(1)} = M_1 + \frac{1}{\pi} \sin(2\pi M_1) \cos(2\pi f t) - \frac{1}{\pi} (\cos(2\pi M_1) - 1) \sin(2\pi f t). \quad (6)$$

В результате алгебраизации этой системы уравнений по методу АДУ2 получим следующую систему алгебраических уравнений для синусных и косинусных

составляющих первых гармоник переменных, подготовленных к записи в матричной форме:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & R_1 & 0 & 1 & \omega L_1 \psi_{\sin} & \omega L_2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & -\omega L_1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega C_1 & \omega C_2 \psi_{\sin} \\ \hline 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_1 & 0 \\ \hline \omega L_1 \psi_{\cos} & \omega L_2 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & 0 & -1 \\ \hline -\omega L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -\omega C_1 & \omega C_2 \psi_{\cos} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \omega C_1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \times$$

$$\begin{array}{|c|} \hline I_{1(1)a} \\ \hline I_{2(1)a} \\ \hline U_{C1(1)a} \\ \hline U_{C2(1)a} \\ \hline I_{1(1)r} \\ \hline I_{2(1)r} \\ \hline U_{C1(1)r} \\ \hline U_{C2(1)r} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_{1(1)a} \psi_{\sin} \\ \hline -U_{1(1)a} \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \psi_{\sin} = & 1 - \frac{1-M}{2} - \frac{\sin[2\pi(1-M)]8\pi^2 \sin[T\omega_1]}{\pi T \omega_1 (16\pi^2 - T^2 \omega_1^2)} + \\ & + \frac{[\cos[2\pi(1-M)]-1]16\pi^2 \left[\cos\left[\frac{T\omega_1}{2}\right]^2 - 1 \right]}{\pi T (T^2 \omega_1^3 - 16\pi^2 \omega_1)} \end{aligned} \quad (8)$$

при $T = \frac{1}{f}$, $\omega_1 = 2\pi f$;

$$\begin{aligned} \psi_{\cos} = & 1 - \frac{1-M}{2} - \frac{\sin[2\pi(1-M)]\sin[T\omega_1](8\pi^2 - T^2 \omega_1^2)}{\pi T \omega_1 (16\pi^2 - T^2 \omega_1^2)} + \\ & + \frac{[\cos[2\pi(1-M)]-1] \cdot 2 \cdot \sin\left[\frac{T\omega_1}{2}\right]^2 (8\pi^2 - T^2 \omega_1^2)}{\pi T \omega_1 (16\pi^2 - T^2 \omega_1^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Построено семейство регулировочных характеристик (рис. 10), семейство внешних характеристик (рис. 11), регулятора переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки и зависимость его входного коэффици-

ента мощности от глубины модуляции (рис. 12) приведенные совместно с соответствующими характеристиками, полученными в модели программы *PSIM*.

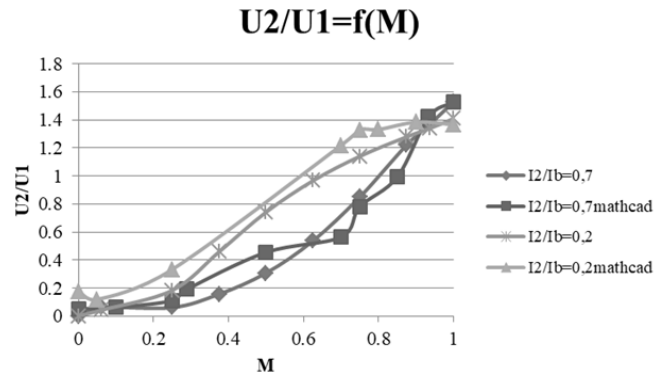


Рис. 10 – Семейство регулировочных характеристик

Fig. 10 – Control characteristics

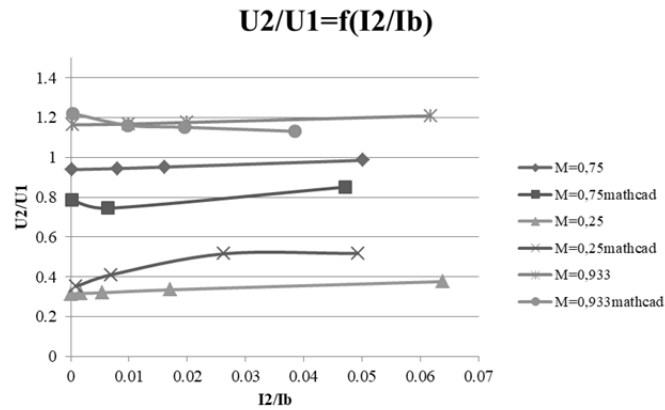


Рис. 11 – Семейство внешних характеристик

Fig. 11 – Load characteristics

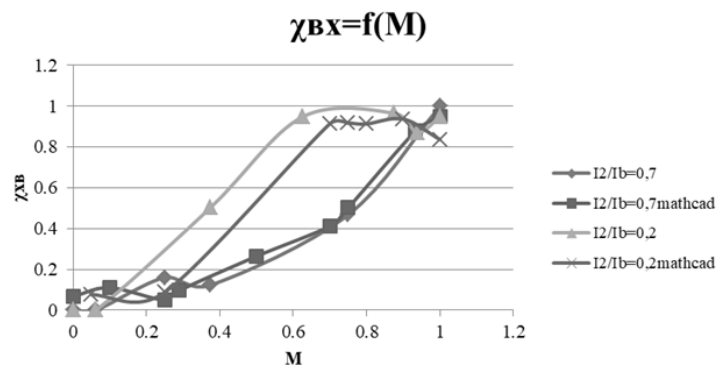


Рис. 12 – Входной коэффициент мощности

Fig. 12 – The dependencies of the input power factor on the modulation index

Как видно из характеристик, рабочий диапазон повышения напряжения находится в пределах $0,5 < M < 1$, при этом максимальное значение выходного напряжения до 1,6 раза больше входного при достаточно высоком качестве.

Повышенное выходное напряжение достигается в диапазоне глубины модуляции $0,8 < M < 1$, на всех уровнях глубины модуляции можно получить стабилизированное напряжение.

Входной коэффициент мощности имеет высокое значение ($> 0,8 - 1$) в диапазоне $0,6 < M < 1$ при малых токах нагрузки.

Был собран экспериментальный макет одной фазы преобразователя (см. рис. 9). Фотография и результаты моделирования представлены на рис. 13. Стоит отметить, что готовится к запуску трехфазный вариант, который будет исследован и будут получены регулировочная и внешняя характеристики.

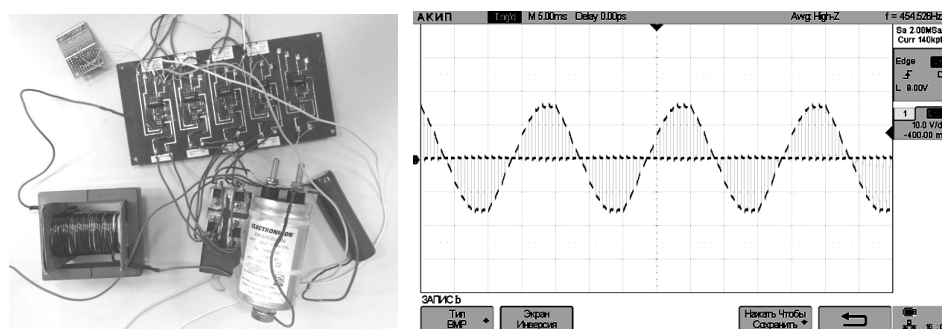


Рис. 13 – Экспериментальный макет регулятора переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки

Fig. 13 – An experimental prototype of an AC voltage regulator with a switch at a zero point of the source and the load circuit

Заключение

1. Представлен новый тип повышающе-понижающих регуляторов переменного напряжения с практически синусоидальными входными и выходными токами.

2. Приведены внешняя, регулировочная характеристики регулятора переменного напряжения с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки, зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции для рассматриваемой схемы. Также оценено качество выходного напряжения и входного тока, которое представлено в виде зависимостей их коэффициента гармоник напряжения от глубины модуляции.

3. Рассмотренный конвертор может быть использован как кондиционер качества напряжения, устройство плавного пуска асинхронных двигателей, регулятор реактивной мощности, активный фильтр гармоник, компенсатор провалов в кривой напряжения, симметрирующее устройство в многофазных сетях.

4. Таким образом, построено расширение прямого метода расчета энергетических показателей конвертора на его модели с переменными параметрами, приводящее к дифференциальным уравнениям с периодическими разрывными коэффициентами. Учет первых членов в разложении переменных коэффициентов в ряд Фурье позволил получить аналитические решения в замкнутой форме для первых гармоник всех переменных состояния и выходных переменных. Это, в свою очередь, привело к аналитическим выражениям для всех основных характеристик регулятора: внешних, регулировочных, энергетических.

ЛИТЕРАТУРА

1. Power electronics in smart electrical energy networks / R. Strzelecki, G. Benysek., eds. – London: Springer, 2008. – 414 p.
2. **Зиновьев Г.С.** Силовая электроника. – 5-е изд. – М.: Юрайт, 2012. – 667 с.
3. Патент 2124263 Российская Федерация. Вентильный преобразователь / Г.С. Зиновьев. – № 97100833/09; заявл.: 21.01.1997; опубл. 27.12.1998, Бюл № 36.
4. **Зиновьев Г.С., Обухов А.Е.** Повышающие широтно-импульсные регуляторы переменного напряжения // Научный вестник НГТУ. – 1997. – № 3. – С. 111–120.
5. Buck-boost AC-AC voltage controllers / G.S. Zinoviev, A.E. Obuchov, V.A. Otchenash, V.I. Popov // Proceedings EPE-PEMC'2000. – Košice, Slovak Republic, 2000. – P. 2-194–2-197.
6. **Prasai A., Divan D.** Dynamic capacitor-VAR and harmonic compensation without inverters // Proceedings EPE 2011. – Birmingham, England, 2011. – 1 CD-Rom (file 831).
7. Патент 2479102 Российская Федерация. Регулятор переменного напряжения / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко. – № 2011146812/07; заявл. 17.11.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл № 10.
8. **Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В.** Бестрансформаторные повышающие регуляторы переменного напряжения с синусоидальными входным и выходным токами // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 69–70.
9. **Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В.** Бестрансформаторные повышающие регуляторы переменного напряжения с синусоидальными токами для устройств плавного пуска асинхронных двигателей // Электроприводы переменного тока: ЭППТ: труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – С. 55–58.

A NEW TYPE OF AC VOLTAGE REGULATORS WITH SWITCHED QUASI-IMPEDANCE OF POWER SUPPLY AND LOAD

Udovichenko A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

A new type of AC voltage regulator based on switching the quasi-impedance of the power supply and load is proposed. The converter under consideration can be used as a voltage quality conditioner, an asynchronous motor soft starter, a reactive power regulator, an active harmonic filter, a compensator for dips in the voltage curve, a balancing device in multiphase networks. The results of mathematical modeling and analytical calculation of the effective values by the first harmonics of currents and voltages are presented.

Keywords: stabilization, quasi-impedance, AC voltage regulator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-63-73

REFERENCES

1. Strzelecki R., Benysek G., eds. *Power electronics in smart electrical energy networks*. London, Springer, 2008. 414 p.
2. Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 5th ed. Moscow, Yurait Publ., 2012. 667 p.
3. Zinov'ev G.S. *Ventil'nyi preobrazovatel'* [Valve-type converter]. Patent RF, no. 2124263, 1998.
4. Zinov'ev G.S., Obukhov A.E. Povyshayushchie shirotno-impul'snye regulatory peremennogo napryazheniya [Step-up PWM AC regulators]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1997, no. 3, pp. 111–120.
5. Zinoviev G.S., Obuhov A.E., Otchenash V.A., Popov V.I. Buck-boost AC-AC voltage controllers. *Proceedings EPE-PEMC'2000*, Košice, Slovak Republic, pp. 2-194–2-197.

6. Prasai A., Divan D. Dynamic capacitor –VAR and harmonic compensation without inverters. *Proceedings EPE 2011*, Birmingham, England, 2011.
7. Zinov'ev G.S., Udovichenko A.V. *Regulyator peremennogo napryazheniya* [AC voltage controller]. Patent RF, no. 2479102, 2013.
8. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. Beztransformatornye povyshayushchie regulatory peremennogo napryazheniya s sinusoidal'nymi vkhodnym i vykhodnym tokami [Transformerless step-up regulators of the alternating voltage with sinusoidal input and output currents]. *Tekhnichna Elektrodinamika – Technical Electrodynamics*, 2012, no. 3, pp. 69–70. (In Russian).
9. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. [Transformless step-up regulators of alternating voltage for soft-starting of induction motors]. *Elektroprivody peremennogo toka: EPPT* [Proceeding of the fifteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"], Ekaterinburg, Russia, 2012, pp. 55–58. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Удовиченко Алексей Вячеславович – родился в 1987 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Опубликовано 44 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Udovichenko Aleksey Vyacheslavovich (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), an associate professor at the Electronics and Electrical Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of 44 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Статья поступила 17 октября 2019
Received October 17, 2019

To Reference:

Udovichenko A.V. Novyi tip regulyatorov peremennogo napryazheniya s kommutiruемым kvazi-impedansom istochnika pitaniya i nagruzki [A new type of ac voltage regulators with switched quasi-impedance of power supply and load]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 4 (45), pp. 63–73. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-4-63-73.