

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.В.Голубев, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

e-mail: [vigohome@mail.ru](mailto:vigohome@mail.ru)

В работе рассмотрены схемные и алгоритмические методы повышения качества входной и выходной энергии импульсных преобразователей переменного напряжения. Для преобразователей, работающих на активно-индуктивную нагрузку без входных и выходных фильтров, решающее значение приобретают качество входного и выходного токов. Приведены схемы и алгоритмы управления, позволяющие оптимально сочетать требования к качеству энергии и массогабаритным показателям преобразователя. Предложены способы одновременного изменения скважности и частоты управления для получения неизменного на заданном уровне или выше заданного качества выходного тока в широком диапазоне регулирования выходного напряжения. Усложненные алгоритмы управления при повышенных частотах регулирования позволяют сократить число коммутаций и потери на них без снижения качества входной и выходной энергий. Библ. 10, рис. 10.

**Ключевые слова:** переменное напряжение, импульсное регулирование, энергетические показатели.

Импульсное регулирование (стабилизация) величины переменного напряжения с помощью ключевых и трансформаторно-ключевых исполнительных структур одновременно с достижением высоких показателей точности, быстродействия регулирования, высокого КПД, хороших массогабаритных показателей преобразователя создает побочные эффекты в виде несинусоидальности потребляемого из сети тока и питающего нагрузку напряжения [1, 8]. Снижение влияния преобразователя на сеть и нагрузку в разумных пределах возможно с помощью входных и выходных электрических фильтров [2, 3], рационального построения преобразователей и параметров (глубины, частоты и фазы) регулирования переменного напряжения [4, 5, 7, 9].

Целью настоящей статьи является разработка оптимальных структур и алгоритмов управления преобразователями переменного напряжения, приобретающих особое значение при работе без фильтров на активно-индуктивную нагрузку.

**Широтно-импульсное регулирование.** При высокочастотном широтно-импульсном регулировании (ВЧ ШИР) фаза регулирования не влияет на фазы и величины основных гармоник, действующие значения напряжения и тока нагрузки и действующее значение тока сети, а, следовательно, и на показатели эффективности преобразования переменного напряжения. Коэффициенты мощности и гармоник выходного напряжения регулятора не зависят от относительной частоты регулирования, равной отношению круговой частоты регулирования к круговой частоте сети  $k=\Omega/\omega$ . Они могут быть улучшены только уменьшением глубины регулирования  $m=K_1-K_2$ , где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты передачи по напряжению на первом и втором интервалах. При этом возникает необходимость использования вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), автотрансформаторов или тех и других одновременно. В схеме с ВДТ (рис. 1) для расширения диапазона (глубины) регулирования требуется увеличить коэффициент трансформации ВДТ, в результате чего пропорционально увеличиваются масса и габариты преобразователя и ухудшается качество тока и напряжения на его выходе.

Если первичную обмотку трансформатора включить в противотоке с нагрузкой, то получим схему преобразователя, показанную на рис. 2, в которой, наоборот, с увеличением глубины регулирования масса и габариты пропорционально снижаются. Устранить противоречие между массогабаритными показателями и показателями качества при регулировании напряжения в широком диапазоне  $u_2=(0...1)u_1$  можно, совместив схемы рис. 1 и рис. 2 в одну – рис. 3. В преобразователе по

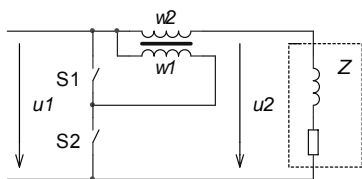


Рис. 1

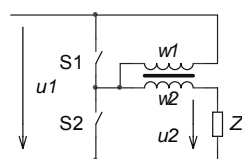


Рис. 2

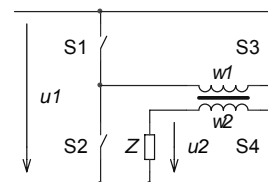


Рис. 3

этой схеме при соотношении витков  $W_2/W_1=m=K_2=0,5$  получим три уровня и две зоны ВЧ-регулирования. Наилучшие же массогабаритные показатели и показатели ка-

чества в преобразователе по схеме рис. 3 достигаются при соотношении витков  $W_2/W_1=1/3$ . На рис. 4 показаны диаграммы коммутационных функций  $\Phi_1-\Phi_4$  ключей  $S1-S4$  и выходного напряжения  $\bar{u}_2$  преобразователя по схеме рис. 3. Схема обеспечивает четыре уровня дискретного и три зоны ВЧ-регулирувания.

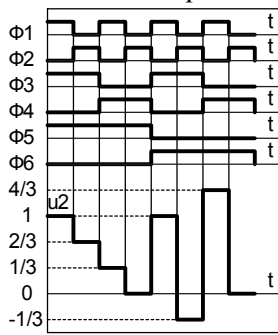


Рис. 4

Еще больший диапазон регулирования ( $-1/3...+4/3$ ), дополнительно два уровня и две зоны ВЧ-регулирувания (рис. 4) при тех же показателях может обеспечить схема рис. 5 с дополнительными реверсирующими ключами  $S5$  и  $S6$ .

*Эффективность и качество преобразования переменного напряжения при работе на активно-индуктивную нагрузку могут быть оценены частотнозависимыми характеристиками: коэффициентом несинусоидальности тока сети (входного тока)  $K_d = I_{1(1)}/I_1$  и коэффициентом гармоник тока нагрузки (выходного тока)  $K_{gi} = \sqrt{I_2^2 - I_{2(1)}^2}/I_{2(1)}$ , где  $I_1, I_2$  – действующие значения и  $I_{1(1)}, I_{2(1)}$  – основные гармоники входного и выходного токов преобразователя. На рис. 6 показаны кривые коэффициента искажений входного тока  $K_d$  и коэффициента гармоник выходного тока  $K_{gi}$  при  $\cos\phi=0,5$  и  $\cos\phi=0,9$  и при постоянных частоте регулирования  $k=10$  и глубине регулирования  $m$  относительно входного напряжения. Если же ступени трансформатора рассчитать так, чтобы глубина регулирования оставалась неизменной относительно рабочей части обмотки при переходе из зоны в зону, тогда максимумы упомянутых*

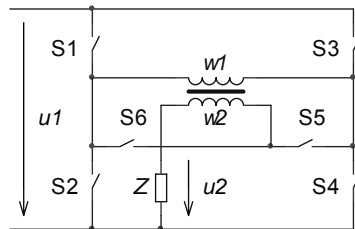


Рис. 5

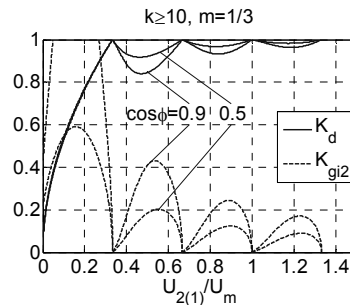


Рис. 6

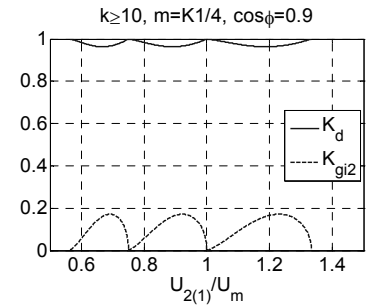


Рис. 7

выше показателей останутся на одном уровне, как это показано на рис. 7.

Поскольку трансформаторы в приведенных схемах могут работать как на основной, так и на повышенной частотах, то предложенные решения во многих практических случаях могут дать существенный эффект по сравнению с известными принципами построения многозонных импульсных преобразователей по КПД и массогабаритным показателям.

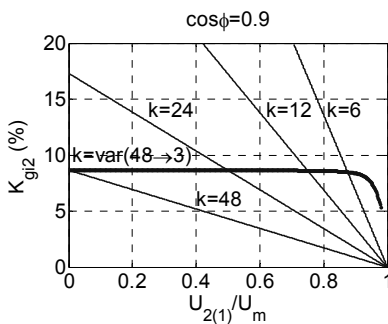


Рис. 8

На рис. 8 и рис. 9 показаны графики зависимостей коэффициента гармоник тока нагрузки от основной гармоники выходного напряжения  $U_{2(1)}$  при глубоком ( $m=1$ ) и узкодиапазонном ( $m=0,5$ ) регулировании с постоянной относительной частотой регулирования  $k$ . Из них видно, что при активно-индуктивной нагрузке  $K_{gi}$  снижается практически пропорционально повышению  $k$ . Это свойство широко используется при ВЧ ШИР переменного напряжения.

**Частотное регулирование.** Наряду с улучшением качества выходного напряжения при работе с фильтрами и улучшения их массогабаритных показателей с ростом частоты регулирования, постоянной в течение всего процесса регулирования, возрастают коммутационные потери и сужается диапазон регулирования выходного напряжения из-за частотных ограничений ключей переменного тока. Снижения потерь на коммутацию при высоких точности и качестве выходного напряжения или выходного тока при работе на активно-индуктивную нагрузку (например, двигатель) можно достичь при частотно-импульсном регулировании (ЧИР) переменного напряжения.

При глубоком регулировании напряжения на активно-индуктивной нагрузке с изменением  $k$  от 3 до 48 (рис. 8) и постоянной шириной пауз ( $\beta_1 = 2\pi - \pi k/24$ ) коэффициент гармоник  $K_{gi2}$  тока нагрузки поддерживается постоянным (8,75%). При таком способе регулирования верхняя граница диапазона регулирования ограничивается одной паузой, а нижняя – 48-ю импульсами. При постоянной ширине

импульсов и переменной частоте, наоборот, снижается верхняя граница диапазона. Этот недостаток особенно недопустим при узкодиапазонном (или многозонном) ЧИР выходного напряжения. Для его устранения диапазон делят на две необязательно равные по выходному напряжению области [7, 10].

*Первая область* – регулирование с постоянной шириной импульсов ( $PW$ ) или интервалов первой ступени регулирования  $PW = \beta_1 \operatorname{ctg} \vartheta_1 / 2\pi k_1 = \operatorname{const}$ , где  $\beta_1$  – суммарная за период ширина первой ступени, изменяющаяся линейно и пропорционально частоте, коэффициенту заполнения и основной гармонике выходного напряжения  $U_{2(1)}$ ;  $\theta_1$  – постоянный в этом режиме угол наклона характеристики, определяющей закон изменения частоты регулирования

$$k_1 = f(\bar{U}_{2(1)}) = f(\gamma) = \beta_1 \operatorname{ctg} \vartheta_1 / 2\pi PW, \quad k_1 = 1 \dots k_{\max}.$$

*Вторая область* – аналогично, регулирование с постоянной шириной пауз ( $WP$ ) при глубоком регулировании или импульсов второй ступени при узкодиапазонном регулировании  $WP = \beta_2 \operatorname{ctg} \vartheta_2 / 2\pi k_2 = \operatorname{const}$ , откуда  $k_2 = f(\bar{U}_{2(1)}) = f(\gamma) = \beta_2 \operatorname{ctg} \vartheta_2 / 2\pi PW, \quad k_2 = k_{\max} \dots 1$ .

На верхней диаграмме рис. 9 показаны графики *a* и *c* (*b* и *d*) изменения частоты регулирования от основной гармоники выходного напряжения для  $k_{\max}=12$  и  $k_{\max}=24$  и глубине регулирования  $m=0,5$ , на средней – кривые изменения коэффициента гармоник выходного тока регулятора для постоянных (жирные линии) и переменных (тонкие линии) частот регулирования, на нижней – графики зависимости  $PW$  и  $WP$  от  $U_{2(1)}$  в отн. ед. для рассмотренных случаев регулирования. На них видно, что ширины импульсов и пауз не опускаются ниже установленных заранее значений, а коэффициенты гармоник не выше требуемого уровня.

Точка перехода из одной области регулирования в другую выбирается так, чтобы максимумы правых и левых кривых коэффициента гармоник были примерно одинаковыми. Если же эту точку сдвинуть к середине диапазона регулирования, то левые кривые на средней диаграмме конгруэнтно сдвинутся вверх, а правые вниз, что ухудшит равномерность изменения выходных характеристик.

В общем случае, задаваясь законом изменения частоты  $k$  и угла  $\beta$  регулирования, можно получить любую зависимость  $K_{gi}=f(U_{2(1)})$ . В частности, при более сложном управлении, когда одновременно изменяются ширина пауз (импульсов) и частота регулирования, можно получить коэффициент гармоник неизменным во всем диапазоне регулирования, т.е.  $K_{gi2}(\bar{U}_{2(1)}) \approx \operatorname{const}$ .

На рис. 10 показаны графики изменения частоты (верхняя диаграмма), коэффициента гармоник (средняя диаграмма) и ширины импульса (паузы) (нижняя диаграмма) для  $m=0,5$  при изменении частоты и угла регулирования на основании принципа функциональной взаимности и по аналогии с принципом

взаимности в линейных электрических цепях, известным из теоретической электротехники [6].

**Принцип функциональной взаимности** состоит в том, что закон изменения функции  $k=f(k_0)$ , будучи использованным в качестве ее аргумента, дает закон изменения аргумента, т.е.  $k_0=f(k)$ . Из анализа графиков рис. 10 видно, что если в качестве закона изменения частоты  $k$  взять значения коэффициента гармоник, полученные при неизменных частотах, например,  $k_0=[6; 12; 24]$ , то получим неизменные значения коэффициента гармоник той же величины. Принцип соблюдается при  $\cos\varphi \leq 0,95$  и частотах регулирования  $k_{\max} \geq 10$ .

Усложненные алгоритмы управления при повышенных частотах регулирования позволяют сократить число коммутаций и потери на них без снижения качества входной и выходной энергии.

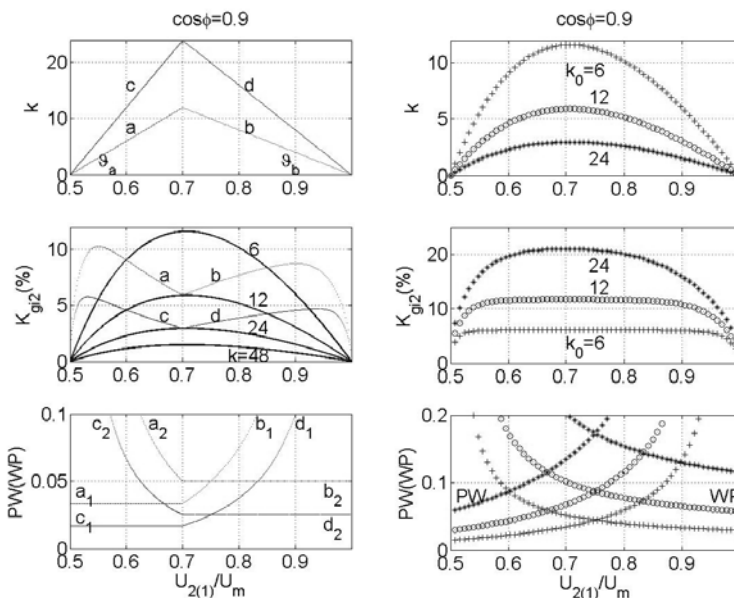


Рис. 9

Рис. 10

**Выводы.** Достижение требуемых технико-экономических показателей импульсных преобразователей переменного напряжения возможно при знании и оптимальном сочетании методов и средств повышения эффективности регулирования. Выбор методов зависит от ранжирования пара-

метров и условий эксплуатации оборудования, но повышение качества входной и выходной энергии его необходимо в любых условиях.

1. Голубев В.В. Гармонический анализ выходного напряжения широтно-импульсного регулятора напряжения переменного тока // Пробл. техн. электродинамики. – 1979. – Вып. 70. – С. 6–10.
2. Голубев В.В. Расчет и оптимизация выходного LC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения // Техн. электродинамика. – 2012. – №1. – С. 33–37.
3. Голубев В.В. Расчет и оптимизация входного RLC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения // Праці Ін-ту электродинаміки НАН України. – 2012. – Вип. 33. – С. 92–99.
4. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
5. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.
6. Теоретические основы электротехники / Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1975. – 752 с.
7. Golubiev V., Lipkowskij K., Mućko J., Strzelecki R. Środki zwiększania efektywności regulatorów impulsowych napięcia przemiennego / Zeszyty naukowe NR191, Elektrotechnika / Akad. techn.-rol. Bydgoszczy. – 1995. – № 11.
8. Kuroe Ysuaki, Haneda Hiromasa, Maruhashi Toru. A new computer-aided method of distortion sensitivity-analysis and its elimination. Scheme for power electronic circuits // IEEE Trans. Power Electron. – 1986. – № 4. – Pp. 200–209.
9. Tonkal V.E., Lipkovskii K.A., Golubev V.V. Means of improving electromagnetic compatibility of alternating voltage regulators with network and load // 5th Power Electronics Conf., Budapest. – 1985. – Vol. 3. – Pp. 255–264.
10. А.с. 1594662 СССР. Способ регулирования переменного напряжения / В.В.Голубев, К.А.Липковский, С.В.Петрусенко, И.Ю.Беспалая, И.В.Иванов // Б.И. – 1990. – № 35.

#### МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

**В.В.Голубєв**, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,**

**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: [vigohome@mail.ru](mailto:vigohome@mail.ru)**

*У роботі розглянуто схемні і алгоритмічні методи підвищення якості вхідної та вихідної енергій імпульсних перетворювачів змінної напруги. Для перетворювачів, що працюють на активно-індуктивне навантаження без вхідних і вихідних фільтрів, вирішальне значення набувають якість вхідного і вихідного струмів. Наведено схеми і алгоритми керування, що дозволяють оптимально поєднувати вимоги до якості енергії і масогабаритних показників перетворювачів. Запропоновано способи одночасної зміни ширинності і частоти регулювання для отримання незмінного на заданому рівні або вищій якості вихідного струму в широкому діапазоні регулювання вихідної напруги. Ускладнені алгоритми керування при підвищених частотах регулювання дозволяють скоротити число комутацій і втрат на них без зниження якості вхідної та вихідної енергій. Бібл. 10, рис. 10.*

**Ключові слова:** змінна напруга, імпульсне регулювання, енергетичні показники.

#### METHODS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF ALTERNATING CURRENT PULSE REGULATION

**V.V.Golubev**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: [vigohome@mail.ru](mailto:vigohome@mail.ru)**

*In work the schematic and algorithmic methods of improvement of quality of entrance and output energy of pulse converters of alternating current are considered. For converters, workings on the active-inductive loading without entrance and output filters, crucial importance get quality of entrance and output currents. The schematics and the algorithms of control allowing it is optimum to combine requirements to quality of energy and to the weight-overall indexes are resulted. The methods of simultaneous change of duty cycle and frequency of regulation for a receipt unchanging at set level or higher quality of output current in a wide range of regulation of a output voltage are received. The complicated algorithms of management at the increased frequencies of regulation allow to reduce number switchings and losses to them without decrease in quality of entrance and output energy. References 10, figures 10.*

**Key words:** alternating voltage, pulse-width regulation, power indexes.

1. Golubev V.V. Harmonic analysis of output voltage of pulse-width alternating current regulator // Problemy tekhnicheskoi elektrodinamiki. – 1979. – Vypusk 70. – Pp. 6–10. (Rus)
2. Golubev V.V. Calculation and optimization of output LC-filter of the pulse converter of a AC voltage // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №1. – Pp. 33–37. (Rus)
3. Golubev V.V. Calculation and optimization of entrance RLC-filter of the pulse converter of a AC voltage // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2012. – Vyp. 33. – Pp. 92–99. (Rus)
4. Kobzev A.V. Pulse-multizone modulation. A theory and application is in the systems of transformation of parameters of electric energy. – Novosibirsk: Nauka, 1979. – 304 p. (Rus)
5. Lipkovskii K.A. Transformer-switch executive structures of convertor of alternating current. – Kyiv: Naukova dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
6. Theoretical bases of the electrical engineering / Pod redakciei P.A.Ionkina. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1975. – 752 p. (Rus)
7. Golubiev V., Lipkowsky K., Mutsko J., Strzelecki R. Facilities of increase of efficiency of alternating current pulse regulator // Zeshity naukowe NR191, Elektrotechnika. – Akad. techn.-rol. Bydgoszch. – 1995. – №11.
8. Kuroe Ysuaki, Haneda Hiromasa, Maruhashi Toru. A new computer-aided method of distortion sensitivity-analysis and its elimination. Scheme for power electronic circuits // IEEE Trans. Power Electron. – 1986. – Vol.1. – № 4. – Pp. 200–209. (Jap)
9. Lipkovskii K.A., Tonkal V.E., Golubev V.V. Means of improwing elektromagnetic compatibiliti of alternating voltage regulators with network and load // 5th Power Electronics Conf., Budapest. – 1985. – Vol.3. – Pp. 255–264. (Rus)
10. Avtorskoe svidetelstvo 1594662 SSSR. Method of regulation of alternating voltage / V.V.Golubev, K.A.Lipkovsky,

