

УДК 621.311.001.51

Волков Игорь Владимирович, Каршенов Дмитрий Петрович
 Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина
 e-mail: ivolkov@ied.org.ua, d.p.karshenov@mail.ru

НОВЫЕ СХЕМЫ МНОГОПУЛЬСНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Получены малоискажающие многопульсные несимметричные трехфазные выпрямительные системы, в которых уменьшение искажения синусоидальности входного тока обеспечивается оптимальным заданием угла между каналами фазосдвигающего узла без увеличения количества каналов (мостов). Библ. 14, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: коэффициент искажения синусоидальности, высшие гармоники, нелинейный элемент, многопульсный выпрямитель.

Отримани малоспотворюючі багатопульсні несиметричні трифазні випрямні системи, в яких зниження коефіцієнта спотворення синусоїдальності вхідного струму забезпечується оптимальним значенням кута між каналами фазозсувного вузла без збільшення кількості каналів (мостів). Бібл. 14, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: коефіцієнт спотворення синусоїдальності, вищі гармоніки, нелінійний елемент, багатопульсний випрямляч.

Одним из наиболее известных средств уменьшения искажений тока, потребляемого из питающей сети, и подавления высших гармоник этого тока является использование многопульсных (**m**-пульсных) выпрямителей, из которых наиболее распространенными являются 12-пульсные. Такие системы, как известно, имеют то преимущество, что благодаря 30-градусному сдвигу фаз напряжений вторичных обмоток трансформатора («звезда» и «треугольник»), в его первичной обмотке отсутствуют пятая и седьмая гармоники тока, т.е. искажения синусоидальной формы тока значительно меньше. На практике, с целью уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и **ТНД** входного тока, особенно при средних и больших мощностях нагрузки (сотни - тысячи кВт), находили раньше и будут находить далее применение более сложные решения, которые характеризуются использованием мостовой схемы А.Н.Ларионова совместно с фазосдвигающими трансформаторами (автотрансформаторами).

Характерная особенность этих устройств такова: преобразование входного энергетического потока осуществляют по **L** равным частям (каналам) с фазовым сдвигом этих частей на угол $\delta = 2\pi/L$ эл. град. и с последующим суммированием их в выходной цепи. Искажения энергетического потока по входу и выходу уменьшаются с увеличением числа каналов **L**. Поэтому в настоящее время синтез выпрямителей с улучшенной электромагнитной совместимостью с сетью сводится, в основном, к увеличению числа каналов преобразования. Одновременно с увеличением числа каналов растет и стоимость таких выпрямительных устройств.

Новые варианты, которые предлагаются, предназначены для улучшения качества потребляемого из сети тока и уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения, что достигается без увеличения числа каналов преобразования энергии. Они базируются на анализе математического описания функции тока, потребляемого из сети, и использовании найденных авторами выражений для коэффициентов гармонических составляющих и коэффициентов несинусоидальности кривой этого тока для универсальных математических моделей **m**-пульсных выпрямителей сети в без нейтрального провода.

Коэффициент несинусоидальности кривой тока (коэффициент гармонического искажения кривой тока) для многопульсного выпрямителя зависит от величины коэффициента геометрического суммирования коммутационных функций фазы питающей сети.

В общем виде сумма векторов **L** для (2k+1)-ой гармоники коэффициента геометрического суммирования имеет вид:

$$K_{SL(2k+1)} = \frac{\sin\left[(2k+1)\frac{L\delta}{2}\right]}{L \sin\left[(2k+1)\frac{\delta}{2}\right]} \quad (1)$$

Формула (1) справедлива для любого количества каналов L и для любого угла δ . Таким образом, коэффициент несинусоидальности и коэффициент гармоничного искажения кривой тока, для сети без нейтрали и при заданных L и m как функция угла δ имеют вид:

$$K_{Ij(v)} = \frac{2 \sin \left[(mk \mp 1) \frac{L\delta}{2} \right] \cdot \cos \left[(mk \mp 1) \frac{\pi}{6} \right] \cdot \sin \left(\frac{\delta}{2} \right)}{\sqrt{3} (mk \mp 1) \cdot \sin \left[(mk \mp 1) \frac{\delta}{2} \right] \cdot \sin \left[\frac{L\delta}{2} \right]}, \quad (2)$$

$$THD_{Ij} = K_{Ij} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin \left(\frac{\delta}{2} \right)}{\sin \left(\frac{L\delta}{2} \right)} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \left((mk \mp 1) \frac{L\delta}{2} \right) \cdot \cos \left((mk \mp 1) \frac{\pi}{6} \right)}{(mk \mp 1) \sin \left((mk \mp 1) \frac{\delta}{2} \right)} \right)^2}. \quad (3)$$

Графики зависимости коэффициента несинусоидальности тока от угла δ для трехфазной сети без нейтрального провода для 6-, 12-, 18-, 24-, и 36- пульсного выпрямителя приведены на Рис.1. Анализ этих графиков показывает, что функция THD имеет несколько экстремальных (минимальных) значений. Так, для количества каналов выпрямителя $L=2$ количество минимумов функции THD равно двум; для $L=3$; $L=4$; $L=6$ – соответственно 4; 8; 18. Наименьшие из этих минимальных значений имеют место при таких углах δ , которые назовем оптимальными, $\delta_{opt}=\pi/12=0.262$ –для $L=2$; $\pi/27=0.126$ – для $L=3$; $\pi/48=0.065$ – для $L=4$; $\pi/108=0.029$ – для $L=6$. Эти оптимальные углы определяются формулой: $\delta_{opt} = \pi/3L^2$, в чем можно убедиться как непосредственно из графика, так и исследуя функцию THD на минимум.

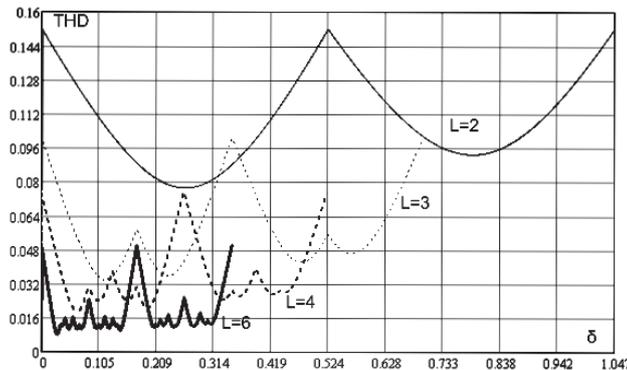


Рис.1

Значения коэффициента несинусоидальности тока THD при этих (оптимальных) углах для схем, которые предлагаются, приведены в табл. 1. Там же в скобках приведены показатели для традиционных схем, которые приведены в [7], для которых фазосдвигающий угол определяется по формуле

$$\delta_{opt} = \pi/3L, \quad (4)$$

Таблица 1

Выпрямительная система	Угол фазосдвигающего узла δ , рад	Угол фазосдвигающего узла δ , град	Коэффициент несинусоидальности тока : THD
12-пульсная (число каналов $L=2$)	$\pi/12$ ($\pi/6$)	15 (30)	0,077 (0,152)
18-пульсная (число каналов $L=3$)	$\pi/27$ ($\pi/9$)	6,7 (20)	0,034 (0,101)
24-пульсна (число каналов $L=4$)	$\pi/48$ ($\pi/12$)	3,8 (15)	0,019 (0,075)
36-пульсная (число каналов $L=6$)	$\pi/108$ ($\pi/18$)	1,7 (10)	0,008 (0,05)

Как видно из последнего столбца таблицы, коэффициент несинусоидальности для предлагаемых схем значительно меньше.

В традиционных многопульсных выпрямительных системах векторы напряжения (тока) всех каналов сдвинуты один относительно другого на равный угол и образуют правильную многолучевую звезду, поэтому их можно считать **симметричными**. Типовым примером симметричной системы

является 12-пульсная система на рис.2,а, векторная диаграмма которой приведена на рис.2,б. Как видно, векторы напряжения обоих каналов сдвинуты один относительно другого на равный угол 30 эл. градусов та образуют правильную (с одинаковыми лучами $OA=OA_1= \dots$) многолучевую звезду.

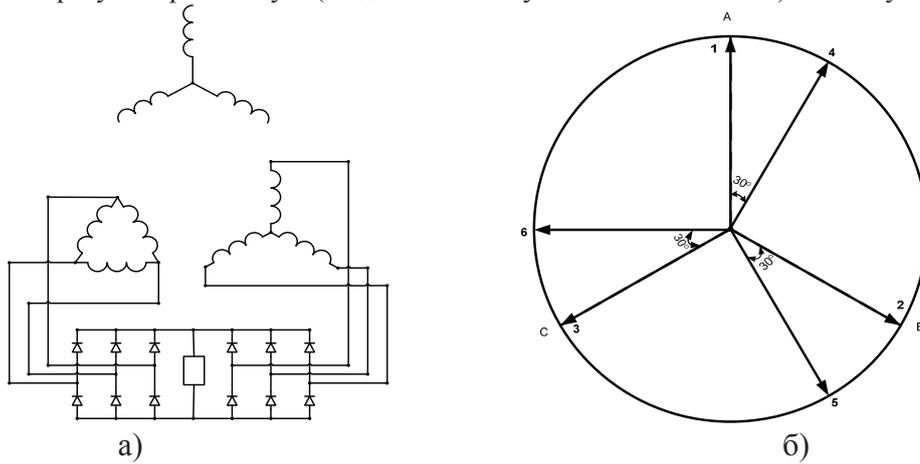


Рис. 2

В новых системах, векторы напряжения (тока) сдвинуты один относительно другого на одинаковый угол только между каналами, которые образуются одной фазой питающей сети и образуют неправильную (с неодинаковыми модулями векторов) многолучевую звезду, поэтому их назовем **несимметричными**. Такие системы можно создать, если ввести определенным образом размещенные дополнительные вторичные обмотки трансформатора.

Несимметричная двенадцатипульсовая выпрямительная система с углами фазосдвигающего узла $\pi/12$ (вместо традиционного $\pi/6$) представлена на рис. 3 а), а ее векторная диаграмма – на рис. 3 б). Угол фазосдвигающего узла зависит от модуля векторов напряжения в основной и дополнительных обмотках, то есть от соотношения числа витков этих обмоток. Для схемы Рис. 3 это соотношение для основной обмотки А – В и дополнительных равно $1/ \sin (\pi/24) = 7.7$.

В отличие от классической 12-пульсовой системы Рис. 2, которая имеет 2 основных вторичных обмотки («треугольник» и «звезду»), система Рис. 3 имеет одну основную вторичную («треугольник» АВ-ВС-СА) с двумя дополнительными обмотками 1-4, 2-5, и 3-6 соответственно в узлах А, В, и С, что обеспечивает в два раза меньший коэффициент несинусоидальности тока (0,077 вместо 0,152). Необходимый для этого фазовый сдвиг угла выходного напряжения $\delta_{\text{опт}} = \pi/3L^2 = \pi/12$ достигается благодаря размещению дополнительных обмоток 1-4 на том же самом стержне трехфазного магнитного стержня что и обмотка ВС (то есть все эти три обмотки находятся под действием одного магнитного потока), аналогично размещены обмотки 2-5 вместе с СА, и 3-6 вместе с АВ

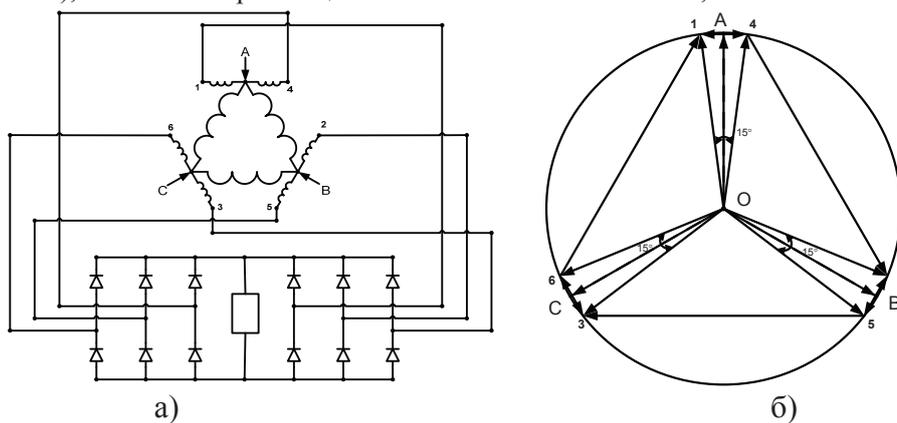


Рис. 3

Несимметричная 18-пульсовая выпрямительная система представлена на Рис. 4, где оптимальный угол фазосдвигающего узла $\delta_{\text{опт}} = \pi/27$ достигается применением четырех дополнительных обмоток, размещенных с каждой основной на одном и том же стержне сердечника трансформатора. Благодаря этому достигается уменьшение коэффициента несинусоидальности тока втрое (0,034 вместо 0,101 в традиционной схеме).

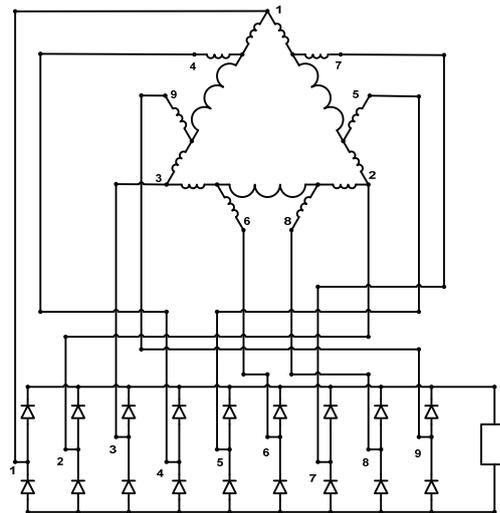


Рис.4

Несимметричная 24-пульсная выпрямительная система представлена на рис. 5, где оптимальный угол фазосдвигающего узла $\delta_{\text{опт}} = \pi/48$. В ней применяется два комплекта основных вторичных обмоток («треугольник» и «звезда»), каждая из которых имеет по две дополнительные обмотки, размещенных на соответствующем стержне сердечника трансформатора. Благодаря этому достигается уменьшение коэффициента несинусоидальности тока вчетверо (0,019 вместо 0,075)

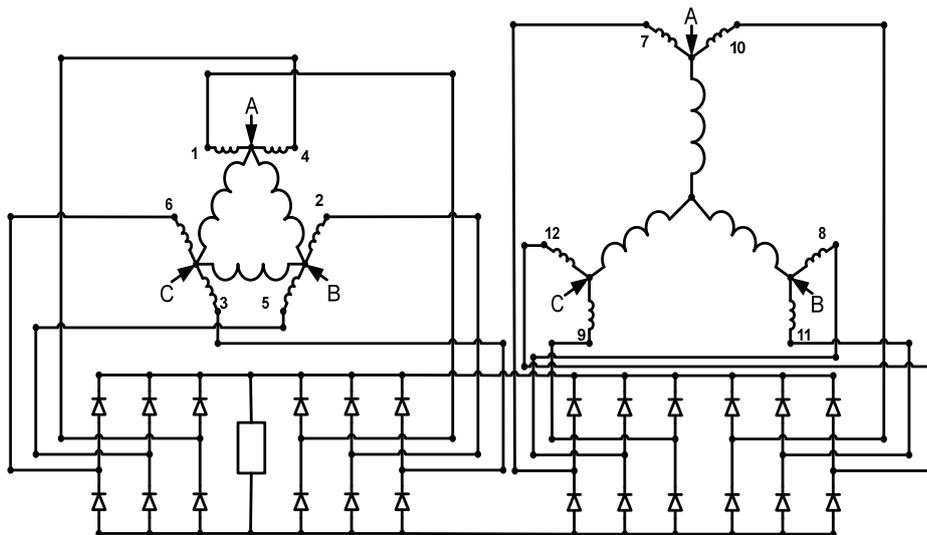


Рис. 5

Несимметричная 36-пульсная выпрямительная система с углами фазосдвигающего узла $\pi/108$ представлена на фиг.6. В ней также применено 2 комплекта основных вторичных обмоток («треугольник» и «звезда»), но каждая из них имеет по три дополнительные обмотки размещенные на соответствующих стержнях сердечника трансформатора. Это дало возможность уменьшить более чем в 6 раз коэффициент несинусоидальности тока (0,008 вместо 0,05).

Таким образом, новые схемы многопульсных выпрямителей с трехфазным трансформатором имеют для каждой фазы одну первичную и несколько (N) вторичных обмоток, часть которых является основными, а остальные - дополнительными, и несколько выпрямительных 6-диодных мостов, подключенных по входам к вторичным обмоткам трансформатора, а по выходу – параллельно друг к другу и к нагрузке.

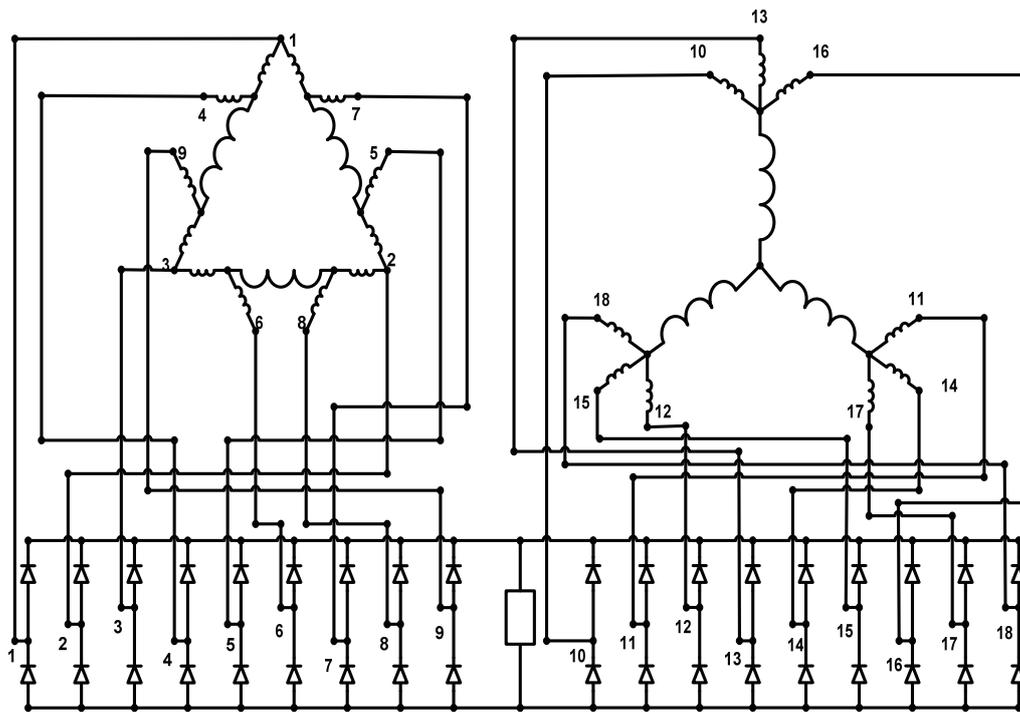


Рис.6

Они отличаются тем, что с целью уменьшения искажения синусоидальности формы тока, потребляемого из трехфазной сети, дополнительные вторичные обмотки каждой фазы размещаются на стержнях магнитопровода трансформатора, соседних с этой фазой фаз, а соотношение числа витков основных и дополнительных вторичных обмоток выбирается таким, что векторы напряжения на выходе этих обмоток образуют N-лучевую несимметричную звезду с оптимальным расчетным углом между векторами $\delta_{\text{опт}} = \pi/3L^2$. Эти схемы обеспечивают существенное улучшение характеристик многопульсных выпрямительных систем.

Список литературы

1. Волков И. В. Каршенов Д. П. Универсальные математические модели m-пульсных выпрямителей со смешанной RLC-нагрузкой в цепи постоянного тока // Техническая электродинамика. – 2012. – № 4.
2. Волков И. В. Каршенов Д. П. Математические модели и схемы замещения m-пульсных регулируемых выпрямителей. // Вестник НТУ «ХПИ», Тем. выпуск «Энергетика: надежность и энергоэффективность» – № 23. – 2012. – 189 с.
3. Галкин В. И. Промышленная электроника: Учеб. пособие. – Мн.: Выш.шк., 1989. – 336 с.
4. Гумен М. Б. та ін. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн.// М. Б.Гумен, А. М. Гуржій, В. М. Співак, Ю. Г. Савченко; За ред. М. Б. Гумена. – К.: Вища шк., 2004. – 391 с.
5. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
6. Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш.школа, 1982 – 496 с.
7. Каршенов Д. П. Малоискажающие многопульсные несимметричные трехфазные выпрямительные системы // Труды Института электродинамики. – 2013. – № 34.
8. Levin M., Волков И. В., Пентегов И. В., Рымар С. В., Ларченко Б. Б. Улучшение качества электроэнергии в электросетях с мощными 12-пульсными выпрямителями с помощью гексагональных автотрансформаторных устройств. // Техническая электродинамика, Тем. выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 1. – К.: ИЭД НАНУ, 2002. – С. 23–27.
9. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
10. Мерабишвили П. Ф., Ярошенко Е. М. Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями. – Кишнев: Штиинца, 1980. – 208 с.
11. Пентегов И. В., Волков И. В., Levin M. Устройства подавления высших гармоник тока. // Техническая электродинамика, Тем. вып. «Проблемы современной электродинамики», Ч.1., К. – 2002, С. 13–22.

12. *Пентегов И. В., Волков И. В., Левин М.* Схемы подавления высших гармоник тока с расщеплением фаз на три составляющие и методы их расчета. // Техническая электродинамика, Тем. випуск. Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 1. – К.: ИЭД НАНУ, 2002. – С 71–78.
13. *Paice D. A.* Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power. – NY: IEEE PRESS, 1995. – 202 p.
14. *Шидловский А. К., Жаркин А. Ф.* Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005. – 207 с.

NEW VARIANTS MULTI-PULSE RECTIFIERS

I.V. Volkov, D.P. Karshenov
 Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
 Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine
 e-mail: ivolkov@ied.org.ua, d.p.karshenov@mail.ru

It is gained a little distorting multi-pulse asymmetrical three-phase systems of rectifiers in which lowering of Total Harmonics Distortion (THD) of input current is provided with optimum value of the angle between the channels of phase-shifting knots without increase in quantity of channels (bridges). References 14, tables 1, figures 8.

Keywords: Total Harmonics Distortion (THD), harmonics, a nonlinear element, the multi-pulse rectifier.

1. *Volkov I. V. Karshenov D. P.* The universal models of noncontrollable valve inverters with the RLC-mixed loading in a direct current circuit // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2012. – 4. (Rus.)
2. *Volkov I. V. Karshenov D. P.* Universal mathematical models of m-pulse of controllable valve inverters with the RLC-mixed loading in a direct current circuit // *Vestnik NTU «HPI», Tem. випуск «Energetika: nadegnost i energoefektivnost»* – № 23. – 2012. – 189 p. (Rus.)
3. *Galkin V. I.* Industrial electronics: Studies manual. Mn.: Vysshaya shkola., 1989. – 336 p. (Rus.)
4. *Gumen M. B. but other.* Bases of theory of electrical circles: In 3 book. // M. B. Gumena, A. M. Gurzhiy, V. M. Singer, Yu. G. Savchenko; For editor M. B. Gumena. – K.: Vyshcha shkola., 2004. – 391 p. (Ukr.)
5. *Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L.* Quality of electric power on industrial enterprises. It is a 4th publ., processed and complemented. – M.: Energoatomizdat, 2005. – 261 p. (Rus.)
6. *Zabrodin Yu.S.* Industrial electronics: Textbook for the institutes of higher. – M.: Vyssh.shkola, 1982 – 496 p. (Rus.)
7. *Karshenov D. P.* A little distorting many-pulse asymmetrical three-phase systems of rectifiers // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2013. – 34. (Rus.)
8. *Levin M., Volkov I. V., Pentegov I. V., Rymar S. V., Larchenko B. B.* Improvement of quality of electric power in the electric systems with powerful 12-puls rectifiers by hexagonal autotransformer devices. // *Technical electrodynamics, Tem. випуск. Silovaya elektronika i energoefektivnost. Ch. 1.* – K.: IED NANU, 2002. – P 23–27. (Rus.)
9. *Maevskiy O. A.* The Power indexes of valve transformers. – M.: Energiya, 1978. – 320 p. (Rus.)
10. *Merabishvili P. F., Yaroshenko E. M.* Electromagnetic transients in the systems with valves. – Kishenev: Shtiinca, 1980. – 208 p. (Rus.)
11. *Pentegov I. V., Volkov I. V., Levin M.* Devices of suppression of ultraharmonics of current. // *Technical electrodynamics, Tem. випуск. Silovaya elektronika i energoefektivnost. Ch. 1.* – K.: IED NANU, 2002, P. 13–22. (Rus.)
12. *Pentegov I. V., Volkov I. V., Levin M.* Charts of suppression of ultraharmonics of current with breaking up of phases on three constituents and methods of their calculation. // *Technical electrodynamics, Tem. випуск. Silovaya elektronika i energoefektivnost. Ch. 1.* – K.: IED NANU, 2002. – P 71–78. (Rus.)
13. *Paice D. A.* Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power.- NY: IEEE PRESS, 1995.-202 p.
14. *Shidlovskiy A.K., Zharkin A.F.* Ultraharmonics in low-voltage electrical networks. – K.: Naukova dumka, 2005. – 207 p. (Rus.)