

УДК 621.313.120

DOI: 10.30838/P.СММ.2415.250918.247.161

ОСОБЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

КОЛОСЮК В. П.¹, *д.т.н., проф.*КОЛОСЮК А. В.², *к.т.н., доц.*ГУБАЧЕВ А.И.³, *к.пед.н., доц.*

¹ Кафедра охраны труда, гражданской и промышленной безопасности, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

² Кафедра прикладной экологии, химии и охраны труда, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Героев Небесной Сотни, 14, г. Краматорск, 84333 Украина. E-mail: wwhale@rambler.ru

³ Кафедра охраны труда, гражданской и промышленной безопасности, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

Цель. Обоснование структурной схемы системы импульсного питания с двухфазным выпрямлением переменного тока и раскрытие особенностей и закономерностей её работы. **Методика.** Анализ основных параметров системы при напряжении питания 400 В на основе метода индукции («шаг за шагом»). Получены формулы для определения среднего и действующего тока в цепях системы импульсного питания, определены расчетные и экспериментальные данные параметров нагрузки, в том числе и при использовании тяговых двигателей с последовательным возбуждением. **Результаты.** Показана эффективность системы импульсного питания. Если питать потребителя импульсным напряжением с длиной импульса в 2/3 периода и паузой в 1/3 периода, то снижается потребление тока от источника встречным действием ЭДС самоиндукции, а во время паузы питающую линию запирает вентильным заградителем и индуктивную нагрузку шунтировать другим вентилем, включенным встречно току источника, то запас магнитной энергии в индуктивности потребителя обеспечивает протекание тока потребителя, минуя источник и питающую линию. Этим обеспечивается снижение энергопотребления от источника и повышение активной мощности потребителя за счет полезного использования его реактивной энергии. **Научная новизна.** Структурное построение системы импульсного питания потребителя и обоснование методологии полезного использования его реактивной энергии. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов и внедрение импульсных систем питания потребителей электроэнергии обеспечивает снижение потерь электроэнергии и повышение полезной мощности потребителя за счет использования его реактивной энергии, а также создает условия для повышения безопасности применения электроэнергии в шахтах, опасных по газу.

Ключевые слова: система импульсного питания, пауза, сопротивление, индуктивность

ОСОБЛИВОСТІ І ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ІМПУЛЬСНОГО ЖИВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

КОЛОСЮК В.П.¹, *д.т.н., проф.*КОЛОСЮК А.В.², *к.т.н., доц.*ГУБАЧОВ О. І., *к.пед.н., доц.*

¹Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: bgd@kdu.edu.ua. ORCIDID: 0000-0002-2700-2458

² Кафедра прикладної екології, хімії і охорони праці, Донбаська академія будівництва та архітектури, вул. Героїв Небесної Сотні, 14, Краматорськ, 84333, Україна, E-mail: wwhale@rambler.ru. ORCIDID: 0000-0002-8647-3639

³ Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

Мета. Обґрунтування структурної схеми системи імпульсного живлення споживача з двофазним випрямленням змінного струму та розкриття особливостей і закономірностей її роботи. **Методика.** Аналіз основних параметрів системи при напрузі живлення 380 В на основі методу індукції («крок за кроком»). Отримані формули для визначення середнього і діючого струму у колах системи імпульсного живлення, визначені розрахункові та експериментальні дані параметрів навантаження, у тому числі при використанні тягових двигунів з послідовним збудженням. **Результати.** Показана ефективність системи імпульсного живлення. Якщо живити споживача імпульсною напругою з довжиною імпульсу у 2/3 періоду і паузою у 1/3 періоду, то знижується споживання струму від джерела зустрічною дією ЕРС індукції, а на період паузи живильну лінію запирає вентильним загороджувачем та індуктивне навантаження зашунтувати другим вентилем, що включений зустрічно струму джерела, то запас магнітної енергії в індуктивності споживача забезпечує протікання струму споживача, обминаючи джерело і живильну лінію. Цим забезпечується зниження енергоспоживання від джерела і підвищується активна

потужність споживача за рахунок корисного використання його реактивної енергії. **Наукова новизна.** Структурна побудова системи імпульсного живлення споживача і обґрунтування методології корисного використання його реактивної енергії. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів і впровадження імпульсних систем живлення споживачів електроенергії забезпечує зниження втрат електроенергії та підвищення корисної потужності споживача за рахунок використання його реактивної енергії, а також створює умови підвищення безпечності використання електроенергії у шахтах, небезпечних за газом.

Ключові слова: система імпульсного живлення, пауза, опір, індуктивність, самоіндукція

FEATURES AND EFFICIENCY OF THE PULSED POWER SUPPLY SYSTEM OF ELECTRIC POWER CONSUMERS

KOLOSIIUK V. P.¹, *D.Sc. (Tech), prof.*

KOLOSIIUKA. V.², *Ph.D., Assoc. Prof.*

GUBACHOVO. I.³, *Ph.D., Assoc. Prof.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Industrial Safety, KremenchukMykhailoOstohradskyi National University, 20, Pershotravnava Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: bgd@kdu.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-2700-2458

² Department of Applied Ecology, Chemistry and Labor Protection, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, 14, GeroevNebesnojSotni Street, г.Краматорск, 84333, Ukraine. E-mail: wwhale@rambler.ru. ORCID ID: 0000-0002-8647-3639

³ Department of Labor Protection, Civil and Industrial Safety, KremenchukMykhailoOstohradskyi National University, 20, Pershotravnava Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: bgd@kdu.edu.ua. ORCID ID 0000-0002-159X

Purpose. Substantiation of the structural scheme of a pulse supply system with a two-phase rectification of an alternating current and the disclosure of features and regularities of its operation. **Methodology.** Analysis of the main parameters of the system at 380 V supply voltage based on the induction method ("step by step"). Equations are obtained for determining the average and effective current in the circuit of the pulsed power supply system; the calculated and experimental data of the load parameters, including when using traction motors with in-series excitation, are determined. **Results.** The efficiency of the pulsed power system is shown. If the consumer is supplied with a pulse voltage with a pulse length of 2/3 of the period and a pause of 1/3 of the period, then the current consumption from the source is reduced by the opposite action of the self-induced EMF of the source current, then the reserve of magnetic energy in the inductance of the consumer ensures the flow of current of the consumer, bypassing the source and supply line. This ensures a reduction in energy consumption from the source and an increase in the active power of the consumer due to the beneficial use of its reactive power. **Scientific novelty.** Structural construction of the system of pulsed power supply of the consumer and justification of the methodology for the beneficial use of its reactive power. **Practical significance.** Using these results and the establishment of the pulse power system which provides reduce power losses and increase the efficiency of the consumer through the use of its reactive power, as well as create conditions for improving the security of electricity use in the mines with hazardous gases.

Keywords: pulse power supply system, pause, resistance, inductance, self-induction.

Постановка проблемы

В настоящее время импульсное питание широко используется для регулирования различных электроприводов. Такое регулирование предусматривает изменение времени паузы, вследствие чего изменяется среднее значение напряжения, подаваемого на электродвигатель, а следовательно, и его электрохимические характеристики: скорость вращения и момент на валу [1,2]. Вместе с тем при этом приходится считаться с влиянием реактивной энергии потребителя, проявляющейся в том, что при каждом импульсе тока возникает ЭДС самоиндукции, встречно направленной напряжению источника.

Это приводит к излишним потерям энергии и требует принятия мер по снижению вредного влияния реактивной энергии на работу потребителей.

Анализ последних исследований и публикаций.

Известные примеры использования импульсного питания в Голландии для мощного контактного

электровоза (мощность 165 кВт, ток 240А), для рудничных аккумуляторных и контактных электровозов в бывшем СССР [3,4], Известно применение емкостных компенсаторов для компенсации влияния индуктивности на показатели системы электроснабжения [5]. Батарея статических конденсаторов подключается к сети таким образом чтобы создать противофазный ток индуктивному току. Однако такое усложнение системы электроснабжения снижает ее надежность и, главное, не может обеспечить полную компенсацию индуктивности, т.к. индуктивный ток «начинается» с нуля, а емкостной -- с максимального тока заряда конденсаторов батареи.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Высокую эффективность системы электроснабжения при импульсном питании можно обеспечить, если вместо компенсации реактивной энергии создать условия для ее полезного использования.

Формирование цели статьи

Целью статьи является создание структуры системы импульсного питания, обеспечивающей возможность полезного использования реактивной энергии потребителя с активно-индуктивным сопротивлением своей схемы, и обоснование ее параметров с учетом того, что индуктивность способна быть накопителем энергии [6].

Изложение основного материала

Структура системы импульсного питания с двухфазным выпрямлением тока [6] разработана для питания рудничных контактных электровозов, имеющих в своем приводе электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. В этой системе в качестве источника используется трехфазный трансформатор с соединением вторичных обмоток звездой или треугольником (рис. 1).

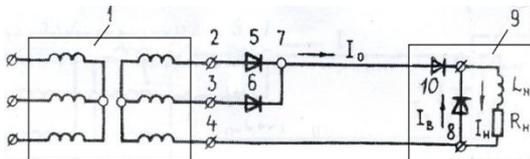


Рис. 1 Схема системы импульсного питания с двухфазным выпрямлением тока / Schematic diagram of a pulsed power supply system with two-phase current rectification

Ее особенностью является использование для выпрямления не фазного, а линейного напряжения трансформатора, а также то, что в форме мгновенного выпрямленного напряжения имеется пауза: после каждого сдвоенного синусоидального импульса выпрямленного напряжения с шириной (длительностью) импульса, равной $2/3$ периода T следует пауза шириной (длительностью) $1/3$ периода.

Одну треть периода к нагрузке приложено линейное напряжение, действующее между фазами (2) и (4) и выпрямленное вентилем (5), вторую треть периода к нагрузке приложено также линейное напряжение, действующее между фазами (3) и (4) и выпрямленное вентилем (6). Поэтому в течение двух третей периода через нагрузку протекает ток I_n , обусловленный указанными напряжениями. В оставшуюся треть периода к нагрузке приложено линейное напряжение, действующее поочередно между фазами (4) и (2) и (4) и (3), однако для этого времени вентили (5) и (6) заперты, так как напряжение на их катодах выше напряжений на анодах. Ток в указанную часть периода в питающей линии отсутствует, а ток в нагрузке обусловлен разрядом запасенной в индуктивности L_n реактивной энергии через шунтирующий вентиль (8). Вентиль (10) обеспечивает надежное запираение линии, по которой поступает ток I_o . Таким образом ежепериодно действует импульс выпрямленного напряжения U_v шириной $t_u = (2/3) \times T$ и пауза – $t_n = (1/3) \times T$. Максимальное значение

выпрямленного напряжения равно амплитуде линейного напряжения U_m вторичной обмотки трансформатора.

Среднее напряжение определяется выражением [7]:

$$U_C = \frac{1,5}{\pi} \times U_M = 0,67U. \quad (1)$$

Действующее напряжение [7]:

$$U_{\text{D}} = 0,634U_M = 0,890U. \quad (2)$$

При питании двухфазной схемы выпрямления напряжением 380В на выходе схемы получается среднее выпрямленное напряжение 283В (табл. 1).

Таблица 1

Выпрямленное напряжение импульсной системы

Напряжение вторичной обмотки трансформатора, В		Выпрямленное напряжение системы, В	
Действующее	Амплитудное	Среднее	Действующее
127	187	89	112
220	324	155	205
380	594	283	376
660	1020	488	645

В работе показано, что в установившемся режиме ток в течении импульса выражается зависимостью:

$$i_u = I_M \times \left[\sin(\varphi) \times \frac{1 + e^{-\delta \times \tau_z}}{1 - e^{-\delta \times T}} \times e^{-\delta \times t} + \sin(\omega \times t - \varphi) \right] \quad (3)$$

а ток паузы:

$$i_n = I_M \times \sin(\varphi) \times \frac{1 + e^{-\delta \times \tau_z}}{1 - e^{-\delta \times T}} \times e^{-\delta \times t} \quad (4)$$

В этих зависимостях t – координата времени для тока импульса от 0 до $2/3T$ и от 0 до $1/3T$ для тока паузы $t_1 = t_{11} = 2/3T$, $t_2 = t_n = 1/3T$, $T = 0,02c$;

$$\varphi = \arctg \frac{X_H}{R_H}; \delta = \frac{R_H}{L_H}; X_H = \omega \times L_H; \omega = 2\pi f; f = 50 \text{Гц}.$$

Изображения мгновенных токов в линии (тока в течении импульса i_u), тока в цепи шунтирующего вентиля (тока в течении паузы i_n) и тока в цепи нагрузки i_n характеризуется диаграммами (рис. 2), построенными при параметрах: $U_C = 265 \text{В}$; $R_H = 1,226 \text{Ом}$; $L_H = 0,0077 \text{Гн}$, соответствующих данным экспериментальной установки импульсного питания и электродвигателя типа ЭТ – 46, применяемого в приводе шахтных контактных электровозов.

Диаграммы подтвердили непрерывность тока в цепи нагрузки при наличии паузы в токе, поступающем по линии от источника, что обеспечивается за счет реактивного тока, обусловленного ЭДС самоиндукции в цепи шунтирующего вентиля.

На этих диаграммах показаны значения средних токов в цепях системы: ток в линии $I_{\text{л}} = 151 \text{А}$, ток в цепи шунтирующего вентиля $I_{\text{в}} = 53 \text{А}$ и ток в цепи нагрузки $I_{\text{н}} = 204 \text{А}$. Заметим, что средний ток в нагрузке равен сумме средних токов в линии и в цепи шунтирующего вентиля, т.е. подтверждает достоверность метода наложения.

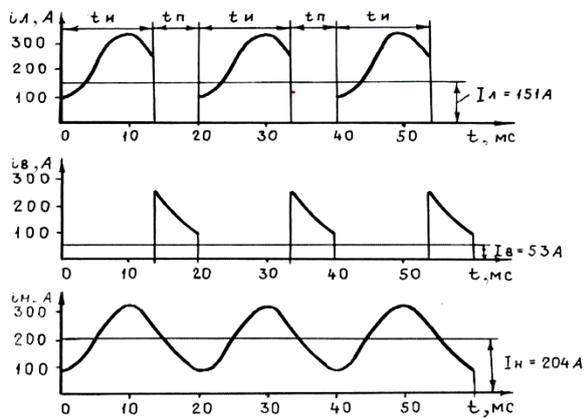


Рис. 2 Графическое представление токов в системе импульсного питания: i_L – ток в линии (ток в течение импульса); i_B – ток в цепи шунтирующего вентиля (ток в течение паузы); i_H – ток нагрузки; I_L, I_B, I_H – средние токи в линии, в шунтирующей цепи и в нагрузке / Graphics of instantaneous currents in the pulsed power supply system: i_L – line current (current during the pulse); i_B – current in the circuit of the shunt valve (current during the pause); i_H – load circuit current; I_L, I_B, I_H – average currents in the line, in the shunt circuit and in the load

Средние за период T значения токов выражаются полученными зависимостями [7]:

$$I_H = 1,04 \times \frac{U_\phi}{R_H}; I_L = 1,04 \times \frac{U_\phi}{R_H(1+m^2)} \times \left(\frac{m^2}{2} \times K_1 + 1 \right); I_B = 1,04 \times \frac{U_\phi}{R_H} \times \frac{m^2}{2(1+m^2)} \quad (5)$$

В последних формулах:

$$K_1 = \frac{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{m}}\right) \times \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2m}}\right)}{1 - e^{-\frac{3\pi}{2m}}}; K_2 = \frac{\left(1 + e^{-\frac{\pi}{m}}\right) \times \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2m}}\right)}{1 - e^{-\frac{3\pi}{2m}}};$$

U_ϕ – фазное эффективное напряжение вторичной обмотки трансформатора; $m = \frac{X_H}{R_H}$.

Средний ток нагрузки не зависит от ее индуктивности и определяется как для безиндуктивной цепи. Ток в линии во время паузы напряжения отсутствует, а во время импульса ограничивается индуктивностью нагрузки. Эти особенности обеспечивают снижение интенсивности искрения и дугообразования при коммутационных процессах в проводах линии.

Анализ показывает, что средний ток в цепи нагрузки (I_H) больше среднего тока, потребляемого от источника (I_L), на величину среднего тока (I_B), протекающего от действия ЭДС самоиндукции в цепи вентиля (8), шунтирующего цепь нагрузки. При прочих равных условиях токи (I_L) и (I_B) зависят от параметров цепи (активного сопротивления, индуктивности), однако ток нагрузки (I_H) не зависит от

индуктивности цепи (табл.2).

С увеличением отношения X_H/R_H действующие в линии и в нагрузке токи снижаются, что объясняется уменьшением амплитудных значений тока, а действующий ток в линии по мере увеличения отношения X_H/R_H становится меньше тока нагрузки, что объясняется уменьшением мгновенного тока, в то же время действующий ток в цепи шунтирующего вентиля увеличивается, что объясняется увеличением реактивной энергии магнитного поля при увеличении индуктивности нагрузки (табл.2).

Активная мощность в системе импульсного питания определяется как произведение среднего тока на среднее значения напряжения, а эффективная – как произведение эффективного тока на эффективное значение напряжения.

Расчетные значения средней и эффективной мощности в линии, цепях нагрузки и шунтирующего вентиля приведены в табл.2.

Как следует из таблицы 2, в системе импульсного питания с увеличением отношения X_H/R_H величина среднего и действующего тока, потребляемого из сети, и тока нагрузки уменьшается, а величина реактивного тока, обеспечиваемого за счет ЭДС самоиндукции – увеличивается, т.е. в рассматриваемой системе обеспечивается полезное использование энергии магнитного поля самой нагрузки для увеличения ее полезной мощности.

Выводы.

1. Обоснованная система обеспечивает импульсное питание потребителей от источника переменного тока напряжением 380В сдвоенными гармоническими (синусоидальными) импульсами выпрямленного тока шириной 2/3 периода рабочей частоты с паузой в 1/3 периода, в течении которой питающая линия заперта и ток в линии отсутствует, а питание потребителя осуществляется собственной ЭДС самоиндукции, вследствие чего повышается полезная мощность потребителя.

2. Выполненные исследования и натурные эксперименты показали, что эффективность системы импульсного питания зависит от отношения индуктивного и активного сопротивления потребителя и увеличивается с увеличением указанного отношения. Так при отношении $m = 1$ для двигателя типа ЭТ – 46 порядка 10% тока нагрузки и активной мощности обеспечивается за счет ЭДС самоиндукции, а при работе этого двигателя с номинальным числом оборотов за счет использования реактивной энергии потребителя обеспечивается 26% тока нагрузки и 20% его активной мощности, что свидетельствует о перспективе энергосбережения при импульсном питании индуктивных потребителей. Эксперименты на нагрузочных стендах показали увеличение на 5% вращающего момента двигателя ЭДР – 25 и на 5-8% КПД электровоза КР-10 с таким двигателем при питании от системы импульсного питания по сравнению с питанием от обычной системы постоянного тока, что также подтверждает эффективность систе-

мы импульсного питания.

Таблица 2

Показатели системы импульсного питания

Наименование показателей системы		Значения показателей при $m = X_H/R_H$				
		0	1,0	2,0	3,0	6,0
Среднее напряжение, В.		283	283	283	283	283
Максимальное напряжение, В.		593	593	593	593	593
Действующее напряжение, В.		376	376	376	376	376
Средний ток, А.	В нагрузке	204	204	204	204	204
	В линии	204	185	162	145	138
	В шунтирующей цепи	0	20	43	60	67
Действующий ток, А.	В нагрузке	280	235	216	213	207
	В линии	280	220	188	177	170
	В шунтирующей цепи	0	81	106	113	117
Средняя (Активная) мощность, кВт×А	В нагрузке	96,0	75,5	71,0	70,3	69,4
	В линии	96,0	67,5	57,0	54,3	52,5
	В шунтирующей цепи	0,0	8,0	14,0	16,0	16,9
Эффективная (Пол-Полная) мощность, кВт×А	В нагрузке	114,0	98,0	91,0	89,0	88,0
	В линии	114,0	90,0	76,0	72,0	69,0
	В шунтирующей цепи	0,0	8,0	14,0	16,0	17,0

3. Снижение при импульсном питании потребляемого тока от источника обеспечивает уменьшение потерь энергии в питающей линии и снижает интенсивность электрического дугообразования и искрения при коммутациях в проводах линии, что благоприятно для повышения безопасности применения электроэнергии в шахтах, опасных по газу или пыли.

4. Рекомендуемой областью применения системы импульсного питания являются системы с индуктивным сопротивлением, превышающем не менее чем в 1,3 раза её активное сопротивление.

Преимуществом преимущественно электрифицированного транспорта, а также систем связи, сигнализации и управления, которые должны нормально функционировать под напряжением в загазированной среде и поэтому должны быть искробезопасными. Для них рекомендуется применять импульсное питание с однофазным выпрямлением переменного тока, а загряздающий и шунтирующий диоды системы питания оформлять как искрозащитные элементы [3].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вейцман Л. Электропривод с импульсным регулированием тока тяговых двигателей / Л. Вейцман // Электрохимическая промышленность. – Вып. 321. – М. : 1970. – 92 с.
2. Борст Д. В. Регулирование напряжения при помощи силовых тиристоров / Д. В. Борст, Е. Ж. Диболт, Ф. В. Париш // Электротехническая промышленность за рубежом. Отделение ВНИИЭМ по научно-технической информации, стандартизации и нормализации в электротехнике. – М. : 1966. – 80 с.
3. Колосюк В. П. Импульсное питание электроустановок: Энергосбережение и безопасность / В. П. Колосюк, В. В. Дорюфенко, А. В. Колосюк. – Донецк : ВИК, 2002. – 259 с.
4. Бут Д. А. Индуктивные накопители энергии / Д. А. Бут // Электричество. – 1987. – № 10. – С. 14 – 20.
5. Патент UA 39146C2 «Система для перетворення змінного струму у постійний для живлення навантаження». – Бюл. – № 5. – 2001. – С. 1 – 4.
6. Колосюк В. П. Импульсное питание транспортных средств с электроприводом / В. П. Колосюк, А. В. Колосюк // Новини енергетики. – 2008. – № 11. – С. 23 – 28.

REFERENCES

1. Weizman L. and others. Electric drive with pulse current control for traction motors // Electrotechnical industry №321. – 1970. – 92 p.
2. Borst D.V. Voltage regulation using power thyristors/ D.V. Borst, E.ZH. Dibolt, F.V. Parish // Electrical industry abroad. VNIEM Department for Scientific and Technical Information, Standardization and Normalization in Electrical Engineering. – 1966, 80 p.
3. Kolosiuk V.P. Switching power of electrical installations: Energy saving and safety / V.P. Kolosiuk, V.V., Dorofienko, A.V. Kolosiuk//VIK, Donetsk, 2002. – 259 p.
4. But D.A. Inductive energy storage. Magazine "Electricity", №-10, 1987. – pp. 14–20.
5. Patent UA 39146C2 "System for converting AC into a constant supply load" №-5, 2001. – pp. 1–4.
6. Kolosiuk V.P. Pulsed power supply of vehicles with electric drive/ V.P. Kolosiuk, A.V. Kolosiuk// – Magazine «Novini energetiki», №-11, 2008. – pp. 23–28.

Надійшла до редколегії 07.10.2018 р.