

УДК 621.313.333.2

© Кривоносов В.Е.\*

**СТАТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ И ПИТАЮЩЕГО КАБЕЛЯ  
В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ**

*Локальная компенсация реактивной мощности эффективна, когда батареи конденсаторов включены параллельно обмоткам электродвигателя. Выбор мощности батарей определяет режим работы электродвигателя. При отключении двигателя от сети разряд конденсатора осуществляется в контуре индуктивность обмотки двигателя, комплексное сопротивление изоляции и ёмкости батареи конденсаторов. Скорость разряда конденсатора является критерием диагностики сопротивления изоляции обмоток двигателя, а при значении сопротивления изоляции 85 кОм двигатель блокируется для дальнейшей работы.*

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, батарея конденсаторов, скорость разряда, сопротивление изоляции, диагностика, моделирование.

**Кривоносов В.Е. Статичні джерела реактивної потужності при діагностиці стану ізоляції асинхронного двигуна і живлячого кабелю в умовах локальної компенсації.** Локальна компенсація реактивної потужності ефективна, коли батареї конденсаторів включені паралельно обмоткам електродвигуна. Вибір потужності батарей визначає режим роботи електродвигуна. При відключенні двигуна від мережі розряд конденсатора здійснюється в контурі індуктивність обмотки двигуна, комплексний опір ізоляції і ємності батареї конденсаторів. Швидкість розряду конденсатора є критерієм діагностики опору ізоляції обмоток двигуна, а при значенні опору ізоляції 85 кОм двигун блокується для подальшої роботи.

**Ключові слова:** компенсація реактивної потужності, батарея конденсаторів, швидкість розряду, опір ізоляції, діагностика, моделювання.

**V.E. Krivonosov. Reactive power static sources in the diagnosis of insulation condition of the induction motor and the power supply cable in terms of local compensation.** Reactive power compensation is particularly relevant for the industrial companies, major power consumers of which are asynchronous motors (AM). The most effective reactive power compensation is at placing the capacitor bank (CB) directly at the points of AM connection. The capacity of the CB and the method of controlling the power factor depend on the AM loading conditions. Under operating conditions ensuring AM reliable start-up after a technological pause is an important task. Reliable motor start-up is possible when the insulation resistance of the stator windings is equal to or above 0.5 megohms. The discharge of the capacitor bank at the moment of the AM disconnection from the network, makes it possible to use the power stored in the CB to diagnose insulation condition and suitability of the AM to a safe start. The speed of the CB discharge is the criterion showing that the AM winding insulation resistance is of critical value. The capacitors discharge simulation made it possible to develop a method to protect the AM and the power cable as well as to formulate an algorithm to identify one-, two-, three- and interphase short circuit when operating, and at the time of the AM disconnection from the network and to define the critical value of the insulation resistance according to the capacitor discharge speed.

**Keywords:** reactive power compensation, capacitor bank, discharge rate, insulation resistance, diagnostics, modelling.

\* канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [yahtverf@mail.ru](mailto:yahtverf@mail.ru)

**Постановка проблеми.** Эффективное использование энергоресурсов и, в первую очередь, электрической энергии является одним из приоритетных направлений развития современной мировой экономики и энергосберегающей политики Украины. В связи с постоянным удорожанием энергоресурсов в рамках программ энергосбережения, важную роль приобретает экономия потребляемой электроэнергии путем целенаправленного воздействия на баланс реактивной мощности в узлах электроэнергетической системы. Компенсация реактивной мощности особенно актуальна для промышленных предприятий, основными электроприёмниками которых являются асинхронные двигатели (АД), коэффициент мощности которых без принятия мер по компенсации составляет 0,7-0,75 [1].

Во многих отраслях промышленности используются электроприводы, созданные на основе применения АД с номинальным напряжением 220/380 В. По данным [2], в Украине ежегодно производится до одного миллиона единиц АД. Повсеместное применение АД обусловлено их высокой надежностью, сравнительно низкой стоимостью и приемлемыми эксплуатационными расходами. До 70% АД сосредоточено в энергоемких отраслях: горно-газодобывающей, металлургической и других. Известно, что наиболее эффективна компенсация реактивной мощности при размещении её источника непосредственно в точках подключения АД [3-5].

При эксплуатации АД важной задачей является обеспечение надежного пуска после технологической паузы. Надежный пуск возможен, когда величина сопротивления изоляции статорных обмоток равна или превышает 0,5 МОм [6].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Литературные исследования показали, что поставленная задача изучена недостаточно. Результаты известных работ [1-6] направлены на изучение компенсации реактивной мощности и способы её регулирования в больших энергосистемах и точках коммерческого учета предприятия. Локальная компенсация реактивной мощности в точках подключения АД к сети является актуальной задачей, позволяющей повысить эффективность работы предприятия. Известные способы контроля сопротивления изоляции в периоды технологических пауз требуют дополнительных источников питания и затрат электроэнергии. Использование энергии, запасенной в батареях конденсаторов (БК), для диагностирования состояния изоляции обмоток АД и питающего кабеля и защиты АД от пуска при значении величины сопротивления изоляции не изучены.

**Цель работы.** В настоящей работе рассмотрен вопрос локальной компенсации потребляемой мощности АД и использования энергии, запасенной в конденсаторной батарее, для диагностирования состояния изоляции обмоток АД в момент его отключения от сети.

**Изложение основного материала.** Выбор мощности и способ управления мощностью компенсирующими устройствами при их параллельной работе с АД зависит от нагрузки АД [7], которую различают непрерывная, повторно-кратковременная и случайная [8].

Для АД, работающих с непрерывным графиком нагрузки, мощность БК рассчитывается по паспортным данным двигателя и коэффициенту мощности, значения которого стремится к единице ( $\cos \alpha \approx 1$ ). Выбор мощности БК осуществляется следующим образом [7].

Мощность БК

$$Q_{БК} \leq Q_{АД} = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (1)$$

где  $S = \frac{P}{\cos \alpha_{АД}}$  – полная мощность АД.

Зависимость между мощностью конденсатора, кВар, и емкостью, мкФ

$$Q_{БК} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-9}, \quad (2)$$

$$C = \frac{Q_{БК} \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}, \quad (3)$$

где  $C$  – емкость конденсатора;  $Q_{БК}$  – мощность конденсатора;  $f$  – частота сети;  $U$  – напряжение сети.

В таблицах 1, 2 представлены параметры конденсатора, включенного параллельно к обмоткам статора АД (рис. 1). Величина максимального тока, протекающего через конденсатор, не превышает 90% тока холостого хода двигателя.

Таблица 1

Мощность АД и соответствующая мощность БК при параллельном включении

Максимальная мощность двигателя		Максимальная скорость вращения, об/мин		
		3000	1.500	1.000
л.с.	кВт	Максимальная мощность кВар		
11	8	2	2	3
15	11	3	4	5
20	15	4	5	6
25	18	5	7	7,5
30	22	6	8	9
40	30	7,5	10	11
50	37	9	11	12,5
60	45	11	13	14
100	75	17	22	25
150	110	24	29	33
180	132	31	36	38
218	160	35	41	44
274	200	43	47	53
340	250	52	57	63
380	280	57	63	70
482	355	67	76	86

Таблица 2

Мощность низковольтных АД и мощность БК

Мощность электродвигателя		Компенсирующий конденсатор					
		220 В		380 В		440 В	
кВт	л.с.	мкФ	кВар	мкФ	кВар	мкФ	кВар
0,2	1/4	15	0,27	-	-	-	-
0,4	1/2	20	0,36	-	-	-	-
0,75	1	30	0,55	-	-	-	-
1,5	2	50	0,91	10	0,544	10	0,730
2,2	3	75	1,37	15	0,817	15	1,095
3,7	5	100	1,82	20	1,089	20	1,460
5,5	7,5	175	3,19	50	2,722	40	2,919
7,5	10	200	3,65	75	4,083	40	2,919
11	15	300	5,47	100	5,444	75	5,474
15	20	400	7,30	100	5,444	75	5,474
22	30	500	9,12	150	8,166	100	7,299
30	40	800	14,60	200	10,888	175	12,772
37	50	900	16,42	250	13,609	200	14,597

Для АД, работающих в повторно-кратковременном режиме с заданным графиком нагрузки, компенсация реактивной мощности производится ступенчато [8, 9]. К неизменной мощности БК, определяемой из расчета холостого хода АД, подключают ступенчато необходимую мощность БК. Количество ступеней и их мощность зависит от графика нагрузки и потребляемой мощности. Регулирование коэффициента мощности осуществляется применением установок типа УКРМ-0,4 – это низковольтные регулируемые конденсаторные установки компенсации реактивной мощности. Ступенчатое регулирование мощности при помощи конденсаторных установок УКРМ позволяет использовать её в сетях с изменяющейся нагрузкой. Автоматическое подключение ступеней УКРМ осуществляется за счет обратной связи по току при помощи измерительных трансформаторов тока. Диапазон мощностей конденсаторных установок УКРМ-0,4 – от 10 кВар до 2500 кВар, шаг регулирования – от 5 кВар.

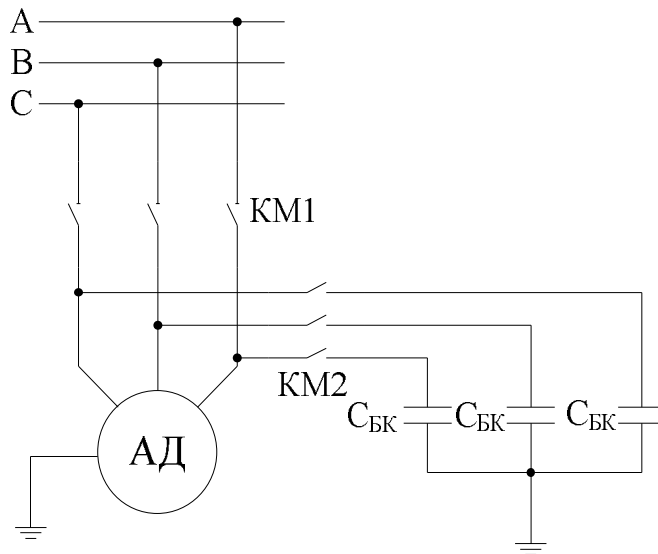


Рис. 1 – Схема включения АД и БК

Для АД, работающих при случайных нагрузках, регулирование коэффициента мощности производится, как правило, при установке части нерегулируемых БК, величина которых определена неизменной составляющей нагрузки и БК, подключаемых к сети посредством управляемых регуляторов [8, 10].

Согласно ПУЭ [6], при отключении БК от сети они замыкаются на разрядные сопротивления или лампы накаливания. Такие переключения позволяют преобразовать запасенную в БК электрическую энергию в тепловую. Запасенную в БК электрическую энергию, можно использовать для диагностирования естественного старения изоляции обмоток АД и питающего кабеля.

На рис. 2 показана схема замещения БК, подключенной к обмотками статора АД после его остановки. На рис. 2 обозначено:  $X_{ЛАД}$ ,  $R_{АД}$  – индуктивное и активное сопротивления обмотки статора АД,  $R_g$ ,  $X_g$  – активная и ёмкостная составляющие сопротивления изоляции обмотки АД,  $C_{БК}$  – емкость батареи конденсатора с остаточным напряжением после его отключения от сети.

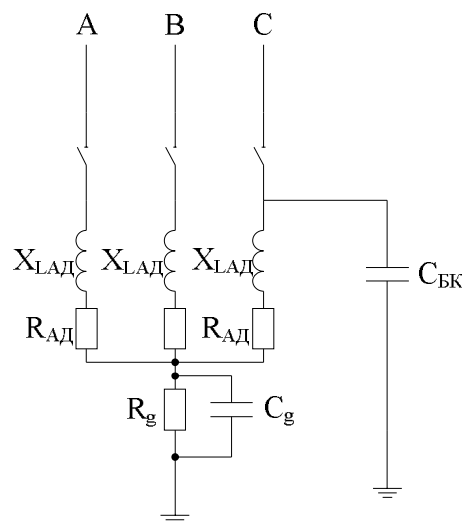


Рис. 2 – Схема замещения БК и двигателя

Принимая для упрощения расчета сопротивление диэлектрика активным и не учитывая малое по величине активное сопротивление обмотки статора АД, получим схему замещения (рис. 3).

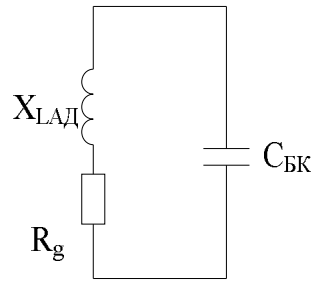


Рис. 3 – Упрощенная схема замещения БК и двигателя

Под действием остаточного напряжения на конденсаторе  $U_{БК}$  в цепи возникает ток и БК начинает разряжаться. Уравнение цепи для схемы, приведенной на рис. 3, составлено по второму закону Кирхгофа:

$$E = I \cdot R_g - U_{БК}. \quad (4)$$

Выразив ЭДС самоиндукции обмотки АД  $E = -L_{АД} \cdot \frac{dI}{dt}$  через ток и индуктивность обмотки  $L_{АД}$ , а  $U_{БК}$  – через ток и емкость  $U_{БК} = -\frac{1}{C_{БК}} \cdot \int Idt$ , получаем:

$$-L_{АД} \cdot \frac{dI}{dt} - I \cdot R_g - \frac{1}{C_{БК}} \cdot \int Idt = 0. \quad (5)$$

Взяв производную от левой и правой частей уравнения, получаем дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_g}{L_{АД}} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L_{АД} \cdot C_{БК}} = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения известно и приведено в [11].

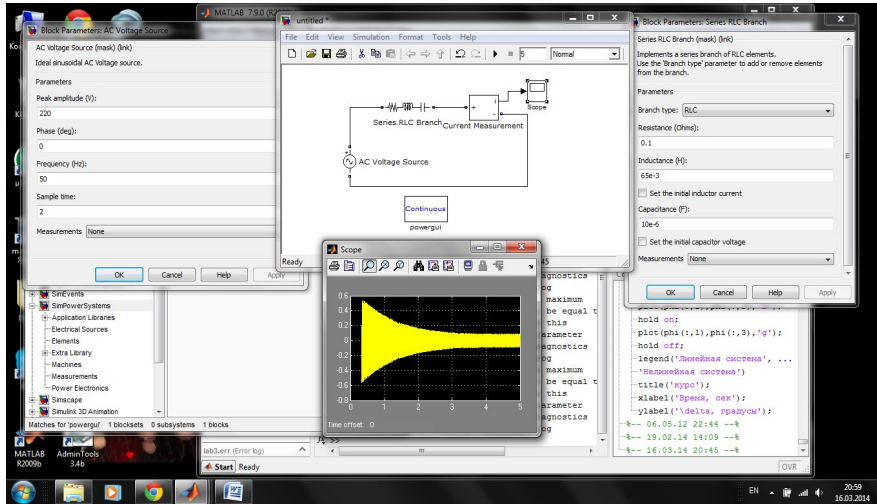
Характер переходного процесса, протекающего в цепи, зависит от соотношения параметров  $R_g$ ,  $C_{БК}$ ,  $L_{АД}$ . При  $\frac{1}{C_{БК} \cdot L_{АД}} < \left(\frac{R_{АД}}{2 \cdot L_{АД}}\right)^2$  переходный процесс в цепи носит аperiодический характер. Скорость изменения напряжения  $U_{БК}$  зависит от величины  $R_g$ . На рис. 4 представлены результаты математического моделирования разряда БК. Для моделирования процесса значения элементов схемы замещения соответствуют параметрам двигателя серии 4А, тип – 4А112М4У3,  $P=5,5$  кВт, напряжением  $U=380$  В,  $\cos \alpha \approx 0,85$ , число оборотов  $n_{об} = 1480 \frac{об}{мин}$ .

Результаты исследования позволили разработать способ контроля изоляции АД и питающего кабеля.

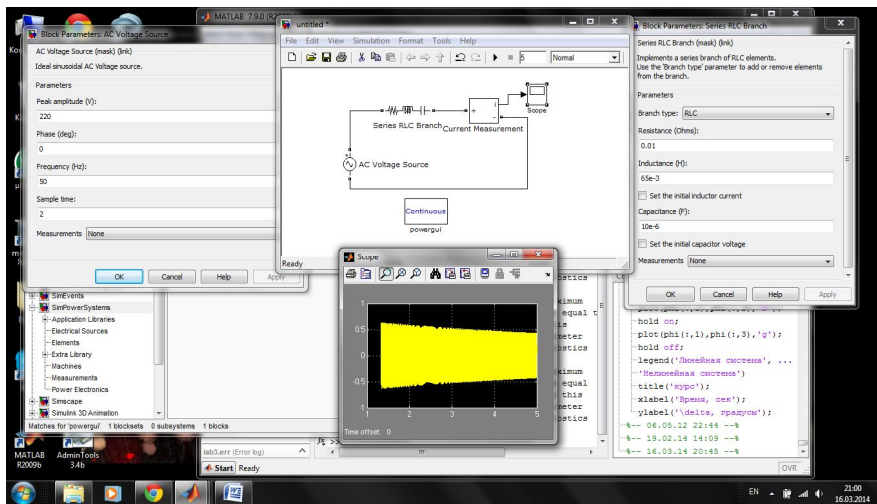
В рабочем режиме двигателя БК подключена параллельно обмоткам статора, осуществляется компенсация реактивной мощности. Непрерывно измеряется скорость изменения напряжения на конденсаторах БК. По изменению значений скорости напряжения определяют межфазное, одно-, двух-, трехфазное короткое замыкание в сети и неполнофазные режимы работы АД, с последующей сигнализацией о возникшем режиме и отключением двигателя от сети.

При отключении АД и БК от питающей сети, режим технологической паузы, напряжение  $U_{БК}$  на одном из конденсаторов  $C_{БК}$  остается. Величина напряжения  $U_{БК} = U_{\phi}$  (или  $\frac{1}{3}U_{\phi}$ ), конденсатор разряжается на сопротивление обмотки статора и изоляции АД.

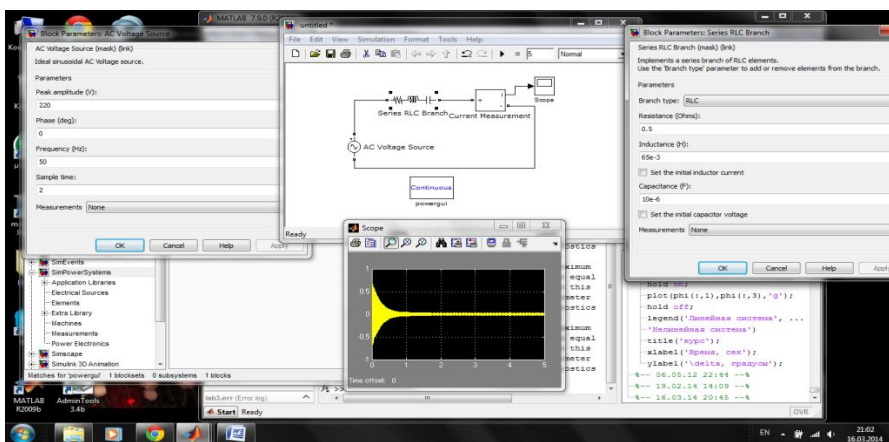
Если сопротивление изоляции обмоток измеряется при температуре  $75^{\circ}\text{C}$ , то при снижении температуры обмотки на каждые  $18^{\circ}\text{C}$  ее сопротивление увеличивается в двое. Так, при снижении температуры с  $75^{\circ}\text{C}$  до  $25^{\circ}\text{C}$ , т. е. температуры окружающей среды, коэффициент перевода равен 6.



a)



б)



в)

Рис. 4 – Результаты моделирования: а – скорость разряда  $0,1 \frac{B}{c}$ ; б – скорость разряда  $0,01 \frac{B}{c}$ ; в – скорость разряда  $0,5 \frac{B}{c}$

Изоляции обмотки АД и кабеля во время отключения от сети предельно нагреты: эквива-

лентное значение комплексного сопротивления изоляции  $Z_{гАД}$  стремится к бесконечности, наблюдается выполнения неравенства

$$Z_{гАД} \gg Z_{гБК},$$

где  $Z_{гБК}$  – комплексное сопротивление конденсатора, определяющее его саморазряд.

Изменение напряжения на клеммах конденсатора обусловлено естественным разрядом конденсатора. Изменение падения напряжения на клеммах конденсатора (рис. 4, позиция б).

Во время работы АД необратимые процессы старения изоляции обмоток АД и кабеля протекают значительно интенсивней, чем у конденсатора. Сопротивление изоляции уменьшается при выполнении равенства

$$Z_{гАД} \cong Z_{гБК}.$$

Интенсивность разряда конденсатора и скорость изменения напряжения на клеммах конденсатора возрастают (пример – рис. 4, позиция а).

При снижении величины эквивалентного сопротивления изоляций обмоток АД и кабеля ниже допустимого значения 0,5 МОм, будет выполняться неравенство

$$Z_{гАД} \ll Z_{гБК}.$$

Скорость изменения напряжения на клеммах конденсатора будет в 50 и более раз больше скорости изменения напряжения при новой изоляции (пример – рис. 4, позиция в).

#### Выводы:

1. Использование БК для локальной компенсации реактивной мощности позволяет снизить потери электроэнергии в трансформаторах, питающих линиях и коммутационной аппаратуре.
2. Режим нагрузки работы АД определяет способы и средства управления коэффициентом мощности при локальной компенсации.
3. Использование энергии, запасенной в БК, при компенсации реактивной мощности позволяет без дополнительных источников питания производить непрерывный контроль и диагностирование состояния изоляции обмоток АД и кабельной линии.
4. Скоростные характеристики разряда конденсаторов в периоды работы АД можно использовать для защиты от межфазных, одно-, двух-, трехфазных коротких замыканий и обрыва фаз.
5. Измерение сопротивления изоляции сразу после отключения АД от сети позволяет определять величину сопротивления изоляции обмоток АД с учетом её старения.

#### Список использованных источников:

1. Электроэнергетика Украины [Электронный ресурс] / Консалтинговая группа Success Brand Management (SBM). – 2012. – 50 с. – (<http://marketing.rbc.ua/publication/03.06.2015/7526>).
2. Лесникова М.Н. Двигательная активность / М.Н. Лесникова // Бизнес. – 2003. – № 39. – С. 28-31.
3. Prophi® power factor controller [Электронный ресурс]. – (<http://www.janitza.com/prophi-power-factor-controller.html>).
4. Паули В.К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии / В.К. Паули, Р.А. Воротников // Энергоэксперт. – 2007. – № 2. – С. 16-22.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Утв. 2006-07-25. – К. : Министерство топлива и энергетики, 2007. – 288 с.
6. Глушков В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / В.М. Глушков, В.П. Грибин. – М. : Энергия, 1975. – 103 с.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. – М. : Энергия, 1984. – 240 с.
8. Ercos. TDK Europe [Электронный ресурс]. – (<https://en.tdk.eu/>).
9. Пат. 106564 Україна, МПК G 05 F 1/70, H 02 J 3/18. Спосіб комутації конденсаторів у складі батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков; ДВНЗ «ПДТУ». – № а201310826; заявл. 09.09.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 17. – 4 с.

10. Борисов Ю.М. Электротехника / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
11. Пат. 98353 Україна, МПК Н 02 К 15/12, G 01 R 31/34. Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю / В.Є. Кривоносов; ДВНЗ «ПДТУ». – № а201005384; заявл. 05.05.10; опубл. 10.05.12, Бюл. № 9. – 4 с.

**References:**

1. Consulting Group Success Brand Management (SBM). *Elektroenergetika Ukrainy* [Ukrainian Electricity] Available at: <http://marketing.rbc.ua/publication/03.06.2015/7526> (accessed 15 January 2016).
2. Lesnikova M.N. Dvigatel'naia aktivnost' [Physical activity]. *Biznes – Business*, 2003, no. 39, pp. 28-31. (Rus.)
3. Prophi® power factor controller Available at: <http://www.janitza.com/prophi-power-factor-controller.html> (Accessed 30 January 2016).
4. Pauli V.K. Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti kak effektivnoe sredstvo ratsional'nogo ispol'zovaniia elektroenergii [Reactive power compensation as an effective means of rational use of electricity]. *Energoekspert – Energoekspert*, 2007, no. 2, pp. 16-22. (Rus.)
5. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelei* [Rules of technical operation of electrical consumers]. Kyiv, The Ministry of Fuel and Energy, 2007. 288 p. (Rus.)
6. Glushkov V.M. *Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriiatii* [Reactive power compensation in industrial electrical installation]. Moscow, Energy Publ., 1975. 103 p. (Rus.)
7. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy roboti asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energy Publ., 1984. 240 p. (Rus.)
8. Epcos. TDK Europe Available at: <https://en.tdk.eu> (accessed 05 February 2016).
9. Burlaka V.V., Hulakov S.V. *Sposib komutatsii kondensatoriv u skladi batarei kondensatoriv dlia kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti* [The method of switching capacitors composed of capacitor banks for reactive power compensation]. Patent UA, no. 106564, 2014. (Ukr.)
10. Borisov Y.M. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1985. 552 p. (Rus.)
11. Krivonosov V.E. *Sposib kontroliu zmini oporu izoliatsii elektrodviguna i zhivil'nogo kabeliu* [The method of monitoring changes in insulation resistance and electric cord]. Patent UA, no. 98353, 2012. (Ukr.)

Рецензент: И.В. Жежеленко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.08.2016