

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-536-543

УДК 621.313.333.2

Диагностика состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации

В. Е. Кривоносов¹⁾

¹⁾Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Более 70 % нагрузки в металлургии, горно-, газодобывающих и других отраслях в СНГ составляют асинхронные двигатели. Актуальной задачей для всех предприятий является снижение потребления реактивной мощности в сети и обеспечение надежного пуска двигателя за счет контроля величины сопротивления его изоляции. Наиболее эффективное мероприятие по компенсации реактивной мощности – размещение конденсаторных батарей непосредственно в точках подключения асинхронного двигателя – локальная компенсация реактивной мощности. Целью исследований было снижение себестоимости выпускаемой продукции предприятия, что обеспечивает компенсация реактивной мощности, а в период технологической паузы использовать мощность, запасенную в батарее конденсаторов для контроля изменения величины сопротивления изоляции. После отключения двигателя от питающей сети и его остановки к обмоткам параллельно подключают батарею конденсаторов. Разряд конденсатора осуществляется в контуре состоящего из индуктивности обмотки двигателя, комплексного сопротивления изоляции и емкости батареи. Характер переходного процесса разряда конденсатора зависит от величины элементов схемы замещения. Переходный процесс может носить аperiodический и периодический характер. Старение изоляции обмотки двигателя приводит к уменьшению величины ее сопротивления. Достижение величиной сопротивления изоляции критического значения приводит к изменению характера процесса. Разработанное устройство осуществляет контроль состояния изоляции двигателя и питающего кабеля во время технологических пауз без низковольтного источника питания и дополнительных коммутаций.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, батарея конденсаторов, компенсация реактивной мощности, сопротивление изоляции, переходный процесс

Для цитирования: Кривоносов, В. Е. Диагностика состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации / В. Е. Кривоносов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 536–543. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-536-543

Адрес для переписки

Кривоносов Валерий Егорович
Приазовский государственный
технический университет
ул. Университетская, 7,
87500, г. Мариуполь, Украина
Тел.: (0629) 33-34-16
yhtverf@mail.ua

Address for correspondence

Krivosov Valerii E.
Priazov State
Technical University
7 University str.,
87500, Mariupol, Ukraine
Tel.: (0629) 33-34-16
yhtverf@mail.ua

Diagnostic of the Insulation State of the Asynchronous Motor and the Power Supply Cable under Conditions of Local Compensation

V. E. Krivonosov¹⁾

¹⁾Priazov State Technical University (Mariupol, Ukraine)

Abstract. More than 70 % of the load in metallurgy, mining, gas, and other industries of the CIS consist of asynchronous motors. A relevant objective for all enterprises is to reduce consumption of reactive power in the network and ensuring reliable start of the engine by controlling the resistance value of the insulation. The most effective measure for reactive power compensation is placing the capacitor batteries directly at the points of connection of the asynchronous motor i. e. local reactive power compensation. The aim of the present research was to reduce the cost of production of the enterprise (which provides reactive power compensation), and in the period of technological pause to use the power stored in the capacitor to batteries in order control the changes of resistance value of insulation. After disconnecting the motor from the mains and its stop, the windings is being connected in parallel to the capacitor bank. The discharge of the capacitor is performed in the circuit consisting of the inductance of the motor winding, the integrated insulation resistance and battery capacity. Characteristic features of the transitional discharge process of the capacitor depend on the size of the equivalent circuit elements. The transition process may be aperiodic and periodic in its nature. Aging of motor winding causes a decrease of its impedance. When the magnitude of the insulation resistance reaches a critical value, this causes a change of the nature of the process. The device that has been developed monitors the insulation condition of the motor and the power supply cable during technological pauses without the low voltage power source and additional switching.

Keywords: asynchronous motor, capacitor bank, reactive power compensation, insulation resistance, transition process

For citation: Krivonosov V. E. (2017) Diagnostic of the Insulation State of the Asynchronous Motor and the Power Supply Cable under Conditions of Local Compensation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 536–543. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-536-543 (in Russian)

На сегодняшний день актуальной задачей для всех предприятий является снижение потребления реактивной мощности в сети и обеспечение надежного пуска асинхронного двигателя (АД) за счет контроля величины сопротивления его изоляции.

Нарушение технологического цикла – важный фактор, влияющий на себестоимость выпускаемой продукции и экономических показателей любого предприятия. Более 70 % нагрузки в металлургии, горно-, газодобывающей и других отраслях СНГ составляют асинхронные двигатели [1], из которых 30–40 % работают с длительными, кратковременными технологическими паузами или в режиме горячего резерва [2]. АД, работающие в таких режимах, подвергаются воздействиям повышенной влажности, запыленности и других факторов агрессивной среды. Основным требованием, предъявляемым к АД, является надежный пуск, который обеспечивает исправная изоляция обмоток статора АД [3]. Пуск АД, когда величина сопротивления изоляции статорных обмоток ниже 0,5 МОм, запрещен. В большинстве случаев (85–90 %) отказы АД связаны с повреждением изоляции обмоток [4].

Асинхронные двигатели – самые массовые потребители реактивной электрической энергии. Наиболее эффективным мероприятием по компенсации реактивной мощности является размещение батарей конденсаторов (БК) непосредственно в точках подключения АД – локальная компенсация реактивной мощности [5, 6].

Для диагностики состояния изоляции АД в период технологических пауз разработаны способы и устройства [7, 8], позволяющие измерять величину сопротивления изоляции после отключения АД от сети, диагностировать ее состояние и выявлять причины снижения сопротивления. В известных устройствах для проведения контроля состояния изоляции имеются источник питания, коммутационная аппаратура, производится ряд переключений и несутся дополнительные энергетические затраты.

Актуальная задача – снижение себестоимости выпускаемой продукции предприятия, что обеспечивает компенсация реактивной мощности, а в период технологической паузы использовать мощность, запасенную в БК для контроля изменения величины сопротивления изоляции.

В данной работе рассмотрено использование энергии, запасенной в БК, включенной параллельно обмоткам АД, для диагностирования состояния изоляции обмоток асинхронного двигателя в момент его отключения от сети.

По правилам ПУЭ [3], при отключении БК от сети они замыкаются на разрядные сопротивления или лампы накаливания. Такие переключения позволяют преобразовать запасенную в БК электрическую энергию в тепловую.

Схема подключенной БК к обмоткам статора АД приведена на рис. 1, схема замещения после остановки АД – на рис. 2.

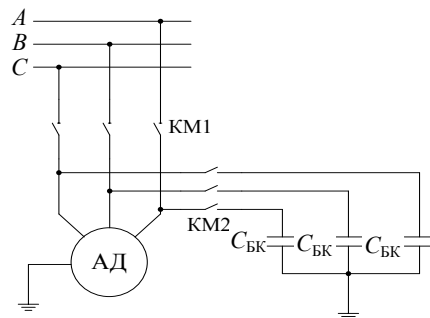


Рис. 1. Схема подключения батареи конденсатора: $C_{БК}$ – емкость батареи конденсатора с остаточным напряжением после ее отключения от сети

Fig. 1. Wiring diagram for battery capacitor: $C_{БК}$ – battery capacity of the capacitor with the residual voltage after disconnection from the network

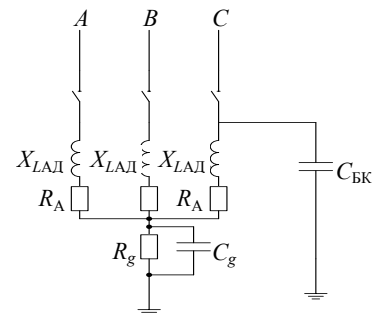


Рис. 2. Схема замещения после остановки асинхронного двигателя:

$X_{ЛАД}$, $R_{АД}$ – индуктивное и активное сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя; R_g , C_g – активная и емкостная составляющие сопротивления изоляции обмотки асинхронного двигателя

Fig. 2. Equivalent circuit after stopping the asynchronous motor: $X_{ЛАД}$, $R_{АД}$ – inductive and active resistance of the stator winding of the asynchronous motor; R_g , C_g – active and capacitive components of the insulation resistance of the winding of the asynchronous motor

Принимая для упрощения расчета сопротивление диэлектрика активным и не учитывая малое по величине активное сопротивление обмотки статора АД, схему замещения представим, как на рис. 3.

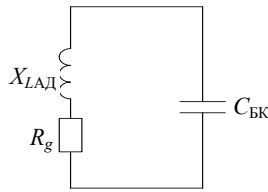


Рис. 3. Упрощенная схема замещения

Fig. 3. The simplified equivalent circuit

Под действием остаточного напряжения на конденсаторе $U_{БК}$ в цепи возникает ток и БК начинает разряжаться. Уравнение цепи, представленной на рис. 3, имеет вид

$$E = IR_g - U_{БК}, \quad (1)$$

где $E = -L_{AD} \frac{dI}{dt}$; L_{AD} – индуктивность обмотки; $U_{БК} = -\frac{1}{C_{БК}} \int Idt$.

После подстановки

$$-L_{AD} \frac{dI}{dt} - IR_g - \frac{1}{C_{БК}} \int Idt = 0. \quad (2)$$

Производная от левой и правой частей уравнения представляется дифференциальным уравнением второго порядка

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_g}{L_{AD}} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L_{AD} C_{AD}} = 0, \quad (3)$$

решение которого

$$i = \frac{U}{2L\gamma} e^{P_1 t} + \frac{U}{2L\gamma} e^{P_2 t}, \quad (4)$$

где $\gamma = \sqrt{\left(\frac{R_{AD}}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}$; $P_{1,2} = -\frac{R_{AD}}{2L} \mp \sqrt{\left(\frac{R_{AD}}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}$.

Характер переходного процесса в цепи зависит от соотношения параметров R_g , $C_{БК}$, L_{AD} . При соотношении $\frac{1}{C_{БК} L_{AD}} < \left(\frac{R_{AD}}{2L_{AD}}\right)^2$ переходной процесс в цепи носит аperiодический характер. Скорость изменения напряжения $U_{БК}$ зависит от величины R_g – активного сопротивления диэлектрика. Результаты математического моделирования разряда БК представлены на рис. 4. Для моделирования процесса приняты параметры: двигатели серии 4А; короткозамкнутый ротор А112М4У3 мощностью $P = 5,5$ кВт и напряжением 380 В; $\cos \alpha \approx 0,85$; число оборотов $n_{об} = 1480$ об/мин.

Результаты моделирования позволили разработать способ контроля изоляции АД и питающего кабеля [9].

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

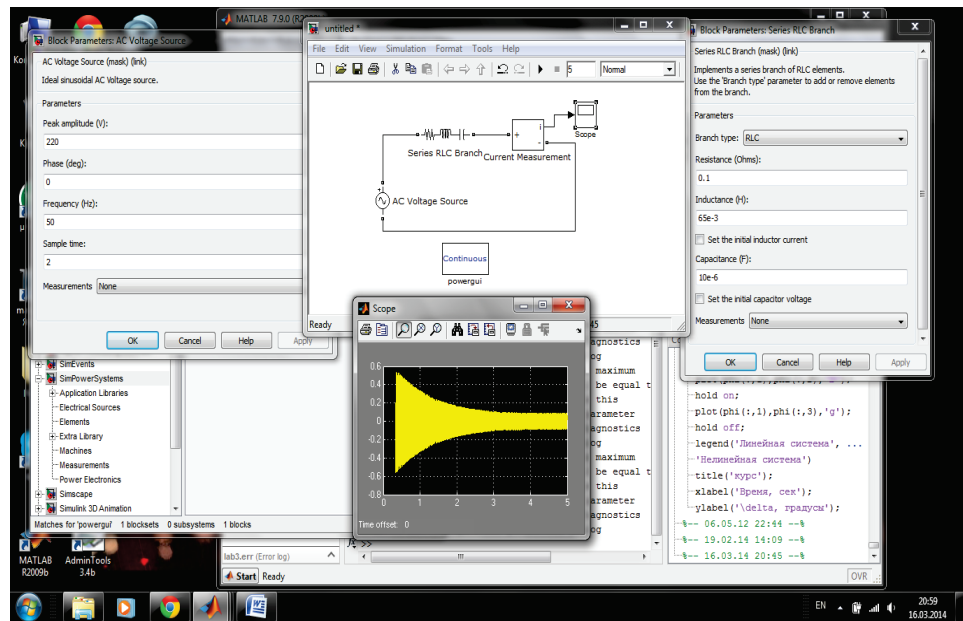


Рис. 4. Результат моделирования аperiodического процесса

Fig. 4. The result of a simulation of aperiodic process

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

Во время работы АД необратимые процессы старения изоляции обмоток АД и кабеля протекают значительно интенсивнее, чем у конденсатора, сопротивление изоляции уменьшается. Когда сопротивления изоляции обмоток АД и кабеля станут меньше допустимой величины 0,5 МОм, будет выполняться неравенство

$$Z_{гАД} \ll Z_{гБК}.$$

Скорость падения напряжения на конденсаторе будет в 50 и более раз интенсивнее, чем при значении новой изоляции.

При $\frac{1}{C_{БК}L_{АД}} > \left(\frac{R_{АД}}{2L_{АД}}\right)^2$ корни характеристического выражения оказы-

ваются комплексными, коэффициент $\gamma = \sqrt{\frac{1}{C_{БК}L_{АД}} - \left(\frac{R_{АД}}{2L_{АД}}\right)^2}$.

Характер переходного процесса становится периодическим. Периодический затухающий процесс разряда конденсатора представлен на рис. 5.

Моделирование переходных процессов позволило разработать структуру устройства защиты АД и алгоритм его работы [10].

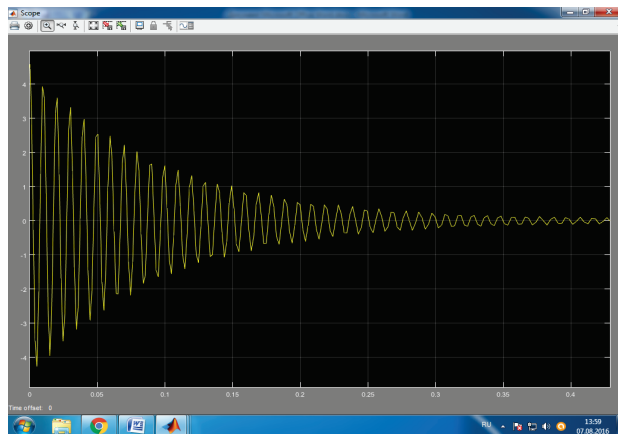
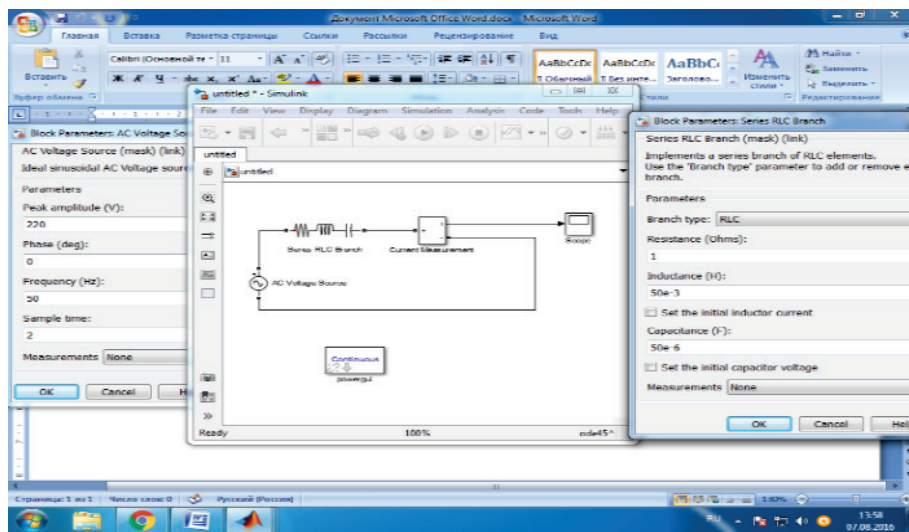


Рис. 5. Результат моделирования периодического процесса

Fig. 5. The result of a simulation of the periodic process

Блок-схема устройства контроля и защиты АД и питающего кабеля представлена на рис. 6.

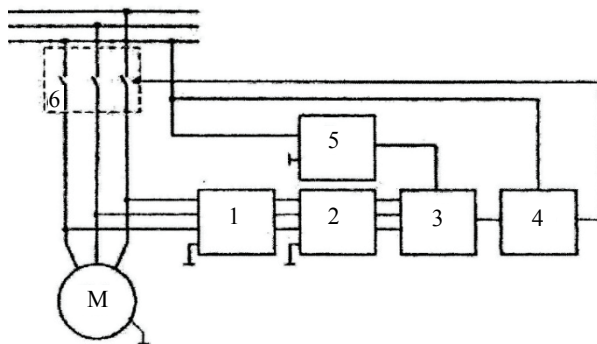


Рис. 6. Блок-схема устройства защиты асинхронного двигателя и питающего кабеля

Fig. 6. A block diagram of the protection device of the asynchronous motor and power cable

Устройство на рис. 6 состоит из блока конденсаторов 1, блока высокоомных делителей 2, микропроцессорного блока 3, коммутационного блока 4, блока питания 5 и пускателя 6.

При отключении электродвигателя от питающей сети на каждом из конденсаторов сохраняется остаточное напряжение. По факту исчезновения переменной составляющей и появления постоянной составляющей на конденсаторах (блока 1) программным блоком 3 делается вывод о технологической паузе.

При отключении электродвигателя от сети пускателем напряжения заряда конденсатора блока 1 будут повторять величину, форму и фазовый угол мгновенных значений напряжения каждой фазы питающей сети. Через высокоомные резисторы блока 2 происходит разряд конденсаторов и тем самым формируется сигнал для микроконтроллера микропроцессорного блока.

Программное обеспечение микроконтроллера выбирает максимальное мгновенное значение напряжения, поступающего из блока 2, вычисляет производную изменения напряжения во времени на максимально заряженном конденсаторе, т. е. скорость разряда конденсатора на свой высокоомный делитель. По величине скорости изменения напряжений определяется сопротивление изоляции обмотки электродвигателя, а также кабеля, питающего электродвигатель. Это возможно, так как во время технологической паузы эквивалентное сопротивление изоляции двигателя плюс сопротивление изоляции кабеля включены параллельно блоку 2 высокоомных делителей.

При хорошем состоянии изоляции обмоток двигателя и питающего кабеля их сопротивление стремится к бесконечности, а скорость разряда конденсатора обусловлена током разряда, величина которого определена значением сопротивлений высокоомного делителя.

При наличии дефекта или естественного старения изоляции ее сопротивление стремится к нулю, ток разряда конденсатора – к бесконечности, скорость падения напряжения максимальная. Переходный процесс разряда конденсатора переходит из апериодического в периодический, такой переход является моментом определения предельной величины сопротивления изоляции.

Таким образом, предложенное устройство осуществляет контроль состояния изоляции двигателя и питающего кабеля во время технологических пауз без низковольтного источника питания и дополнительных коммутаций.

ВЫВОДЫ

1. Использование батареи конденсаторов для локальной компенсации реактивной мощности позволяет снизить потери электроэнергии в трансформаторах, питающих линиях, коммутационной аппаратуре.

2. Энергия, запасенная в батарее конденсаторов при компенсации реактивной мощности, дает возможность без дополнительных источников питания производить непрерывный контроль состояния изоляции – как обмоток асинхронного двигателя, так и питающей кабельной линии.

3. Характеристики разряда конденсаторов в периоды работы асинхронного двигателя можно использовать для защиты от между-, одно-, двух-, трехфазных коротких замыканий и обрыва фаз.

4. Изменение характера переходного процесса разряда батареи конденсаторов служит критерием, определяющим предельное значение величины сопротивления изоляции.

5. Измерение сопротивления изоляции после отключения асинхронного двигателя от сети позволяет контролировать ее истинное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отраслевой обзор «Электроэнергетика Украины»; артикул 12686002491, 10.12.2012. 41 с.
2. Лесникова, М. Н. Двигательная активность / М. Н. Лесникова // Бизнес. 2003. № 39. С. 28–31.
3. Правила устройства электроустановок потребителей. Харьков: Форт, 2009. 704 с.
4. Закладний, О. О. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електроприводу / О. О. Закладний // О. О. Закладний // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Гірництво. Київ: КПІ, 2010. Вип. 19. С. 140–148.
5. Reactive Power Controller Prophi. Operating Instructions. Janitza Electronics GmbH. Dok Nr 1.020.009.a Serie II. Germany, 2003. 56 p.
6. Паули, В. К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии / В. К. Паули, Р. А. Воротников // Энергоэксперт. 2007. № 2. С. 16–22.
7. Устройство защиты изоляции обмоток электродвигателей от увлажнения: а. с. № 1367106 СССР МПК H02K15/12 / И. В. Жежеленко, А. М. Липский, В. Е. Кривоносов; опубл. в 1988 г.
8. Способ контроля изоляции обмоток низковольтных электродвигателей: а. с. № 1371233 СССР. МПК G01R31/34 / А. М. Липский, В. Е. Кривоносов, В. И. Мякотин; опубл. в 1985 г.
9. Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю: пат. 98353 Україна, МПК H02K15/12 (2006.01) / В. Є. Кривоносов; патентообладатель ДВНЗ «ПДТУ». № а201005384, опубл. 10.05.2012, бюл. № 9.
10. Пристрій контролю і захисту електроустаткування: пат. 98721 Україна, МПК H02K15/12 (2006.01) / В. Є. Кривоносов; патентообладатель ДВНЗ «ПДТУ». № а201101572, опубл. 11.06.2012, бюл. № 11.

Поступила 05.10.2016 Подписана в печать 07.12.2016 Опубликовано онлайн 28.11.2017

REFERENCES

1. Marketing Group Success Brand Management (2012) *Industry Overview "Power Industry of Ukraine"*. 41 (in Russian).
2. Lesnikova M. N. (2003) Motor Activity. *Business*, (39), 28–31 (in Russian).
3. *Rules for Arrangement of Electrical Installations of Consumers* (2009) Kharkov, Fort Publ. 704 (in Russian).
4. Zakladnii O. O. (2010) Estimation of Residual Resource of the Asynchronous Electric Drive. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnicnii Institut". Seriya Girnitsvo = Herald of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. Series of Mining, 19, 140–148 (in Ukrainian).
5. Janitza Electronics GmbH. (2003) *Reactive Power Controller Prophi. Operating Instructions. Dok Nr 1.020.009.a Serie II. Germany*. 56.
6. Pauli V. K., Vorotnikov R. A. (2007) Reactive Power Compensation as an Effective Means of Rational Use of Electric Power. *Energoekspert* [Expert in Power Industry], (2), 16–22 (in Russian).
7. Zhezhenko I. V., Lipsky A. M., Krivososov V. E. (1988) *Protection Device for Motor Winding Insulation from Moisture*. Certificate of Authorship No 1367106 (USSR) (in Russian).
8. Lipsky A. M., Krivososov V. E., Myakotin V. I. (1985) A Method of Winding Insulation Monitoring of Low-Voltage Motors. Certificate of Authorship No 1371233 (USSR) (in Russian).
9. Krivososov V. E. (2012) *Method of Monitoring the Change of Insulation Resistance of Motor and Power Cable*. Ukraine Patent No 98353 (in Ukrainian).
10. Krivososov V.E. (2012) *Device for Control and Protection of Electrical Equipment*. Ukraine Patent No 98721 (in Ukrainian).

Received: 5 October 2016 Accepted: 7 December 2016 Published online: 28 November 2017