

УДК 621.313

ПСЕВДОПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Ю. В. Ромашихин, Н. А. Руденко, В. Ю. Мошковский

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: Romashihin_yuriy@mail.ru

В статье рассмотрен математический аппарат получения псевдополигармонических сигналов напряжения и тока при синусоидальном питании с использованием преобразования Фурье. Показаны различные способы получения псевдополигармонических сигналов напряжения, тока и мгновенной мощности. Доказано, что использование псевдополигармонических сигналов мощности в уравнениях баланса отвечает закону сохранения. Показана эффективность использования псевдополигармонических сигналов при идентификации электромагнитных параметров электрических машин.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электромагнитные параметры, сигналы напряжения и тока.

ПСЕВДОПОЛІГАРМОНІЧНІ СИГНАЛИ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Ю. В. Ромашихін, М. А. Руденко, В. Ю. Мошковський

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: Romashihin_yuriy@mail.ru

В статті розглянуто математичний апарат для отримання псевдополігармонічних сигналів напруги та струму при синусоїдному живленні з використанням перетворення Фур'є. Показано різні способи отримання псевдополігармонічних сигналів напруги, струму та миттєвої потужності. Доведено, що використання псевдополігармонічних сигналів потужності в рівняннях балансу відповідає закону збереження. Показано ефективність використання псевдополігармонічних сигналів при ідентифікації електромагнітних параметрів електричних машин.

Ключові слова: асинхронний двигун, електромагнітні параметри, сигнали напруги та струму.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные методы идентификации электромагнитных параметров (ЭМП) электрических машин (ЭМ) основываются на анализе сигналов напряжения и тока [1]. Например, одним из таких методов является энергетический метод, в основе которого лежит использование составляющих мгновенной мощности в уравнениях баланса [1-6]. Здесь следует отметить, что мгновенная мощность образуется в результате умножения сигналов напряжения и тока, а для получения гармоник в спектре мгновенной мощности необходимо наличие гармоник в исходных сигналах напряжения и тока. К тому же важным условием получения гармоник в настоящее время является то, что сигналы, формирующие сигнал мгновенной мощности, должны быть периодические [4, 5, 7].

Для получения приемлемых результатов при идентификации ЭМП ЭМ необходимо, чтобы компоненты гармоник сигналов напряжения и тока были весомыми, т.е. были соизмеримы с величиной основной гармоники.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В работах [4, 5, 9] обосновано использование уравнений баланса составляющих мгновенной мощности при идентификации электромагнитных параметров АД по выбранной схеме замещения. Процедура идентификации ЭМП АД проводится с использованием источника полигармонического напряжения, в качестве которого выступает тиристорный регулятор напряжения. В работах ряда авторов показана возможность идентификации ЭМП АД без использования специальных преобразовательных устройств, т.е. с помощью так называемых псевдополигармонических сигналов напряжения и тока [10].

Преобразование Фурье позволяет проводить разложение сигналов в тригонометрический ряд на лю-

бом интервале [8]. Это позволяет получить значительное количество значимых гармоник в сигналах напряжения и тока на рассматриваемом интервале разложения. Причем изменение интервала разложения приведет к изменению величин гармоник.

В классической теории электрических цепей и электрических машин все энергопроцессы рассматриваются на периоде повторения сигнала. Таким образом, рассматриваемые периодические величины повторяются через одно и то же значение, т.е. через период повторяемости T . К таким сигналам можно отнести сигналы напряжения и тока в установившихся режимах работы электропривода с частотой $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (рис. 1).

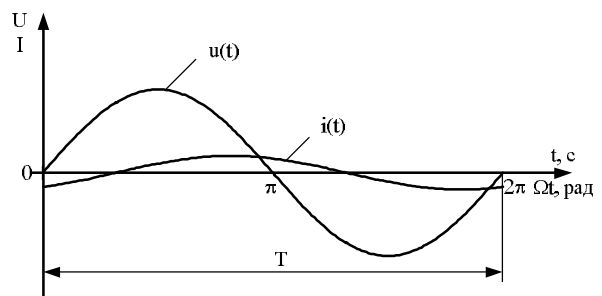


Рисунок 1 – Синусоидальные периодические сигналы напряжения и тока

Для рассматриваемых периодических сигналов применимо преобразование Фурье, в соответствии с которым для любого периодического сигнала можно выполнить разложение по косинусным и синусным составляющим при периоде повторяемости T :

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(\Omega t) d\Omega t; \\
 a_m &= \frac{2}{T} \int_0^T f(\Omega t) \cos(m\Omega t) d\Omega t; \\
 b_m &= \frac{2}{T} \int_0^T f(\Omega t) \sin(m\Omega t) d\Omega t,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ – номера коэффициентов разложения функции $f(\Omega t)$ в ряд Фурье.

В соответствии с выражением (1) применительно к электрическим сигналам могут использоваться сигналы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Однако, следует заметить, что заданная функция в рассматриваемом промежутке должна быть интегрируема.

Важно отметить, что подобные разложения часто оказываются полезными и при исследовании функций, заданных или определенных только в определенном конечном промежутке и не имеющих явно выраженного периода повторяемости.

Применительно к выражению (1) можно брать не период повторяемости, а любой промежуток и считать, что функция за границами этого промежутка повторяется (рис. 2). Т.е. если функция $f(\Omega t)$ (или, например, $u(t)$ и $i(t)$) существует только на I участке, то для того, чтобы разложить ее в ряд Фурье необходимо представить, что время T является периодом повторяемости рассматриваемой функции. Так, на II участке функция $f(\Omega t)$ будет иметь такой же вид, как и на I участке. Тогда к такой функции применимо разложение в ряд Фурье и могут быть получены коэффициенты разложения в соответствии с выражением (1).

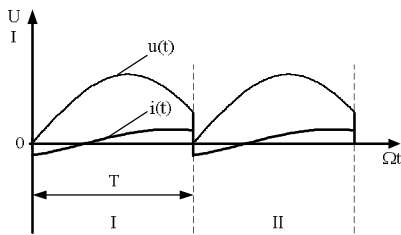


Рисунок 2 – Непериодические сигналы напряжения и тока

Это возможно, исходя из предположения, что заданная функция определена для всех вещественных значений Ωt и имеет период T . Для того, чтобы применить теорию рядов Фурье, необходимо ввести некоторую функцию $f'(\Omega t)$, которая на искомом промежутке T равна искомой функции $f'(\Omega t) = f(\Omega t)$, а на остальных вещественных значениях распространяется функция $f'(\Omega t)$ по закону периодичности.

Для полученной функции $f'(\Omega t)$ будет выполняться условие Дирихле и для нее можно применить разложение в ряд Фурье. Но этот вид разложения

будет справедлив только для искомой функции $f(\Omega t)$, заданной на интервале T .

Однако при использовании предложенного подхода следует иметь в виду, что особого внимания требует исследование поведения функции на концах отрезка. Это связано с тем, что исходная функция $f(\Omega t)$ на конце отрезка имеет одно значение, в то время как функция $f'(\Omega t)$ в начале следующего отрезка будет иметь другое значение. Таким образом, возникает неопределенность функции на краях отрезков. Т.е. если заданная функция $f(\Omega t)$ даже непрерывна на интервале T , но не имеет периода повторяемости, то для такой функции разложение может иметь место только на интервале T в виду того, что он всюду сходится. Но вне этого интервала функция $f(\Omega t)$ может иметь разрывы.

Следует отметить также, что вместо промежутка $[0, T]$ можно выбрать произвольный промежуток $[\alpha, \alpha + T]$ с интервалом T .

В случае, если рассмотреть разложения в ряды Фурье функции $f(\Omega t)$ только по косинусам или только по синусам, то необходимо дополнить исходный сигнал, как показано на рис. 3.

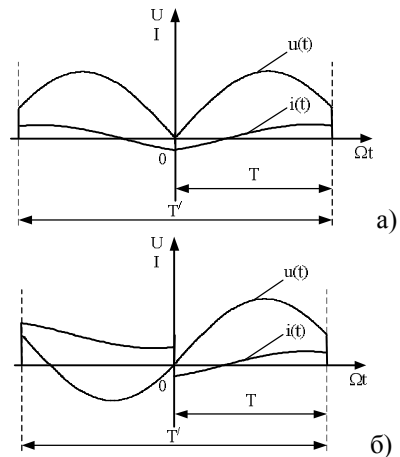


Рисунок 3 – Сигналы напряжения и тока при разложении по косинусам (а) и по синусам (б)

При этом за исходный сигнал необходимо выбирать уже не функцию $f(\Omega t)$, а функцию $f(\Omega' t)$, где $\Omega' = f(T')$. Функция на рис. 3, а является четной, поэтому в ее разложении будут участвовать только члены ряда с косинусами. Соответственно функция на рис. 3, б является нечетной, поэтому в ее разложении будут участвовать только члены ряда с синусами. Таким образом, заданную функцию оказывается возможным разлагать как в ряд по косинусам, так и в ряд по синусам. Но при этом следует иметь в виду, что внутри функции будет неопределенность при $\Omega t = 0$.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о возможности разложения в

тригонометрический ряд произвольной функции на произвольно заданном промежутке во всей области определения функции.

Теория рядов, как уже отмечалось, указывает на то, что любой сигнал может быть разложен в ряд Фурье на любом промежутке, в частности – на частях периода сетевого напряжения [8]. В таком случае при синусоидальном питании можно выполнить разложение в ряд Фурье на части периода сетевого напряжения и получить тригонометрическую зависимость указанного сигнала на заданном интервале. Такие сигналы предложено называть псевдополигармоническими. Этот прием устраняет препятствие, связанное с невозможностью качественной идентификации при отсутствии существенных уровней гармоник тока и напряжения. Отмечено, что непременным условием применения предложенного метода является безусловное соблюдение закона сохранения [9, 10].

Рассмотрим способы получения псевдополигармонических сигналов напряжения и тока, а также эффективность их применения в энергетическом методе при идентификации ЭМП АД (рис. 4).

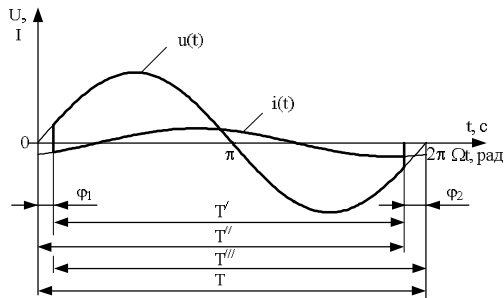


Рисунок 4 – Варианты получения псевдополигармонических сигналов напряжения и тока

Можно выделить следующие варианты получения псевдополигармонических сигналов (ППС) напряжения и тока:

- вариант 1 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданный угол слева или справа от границ периода (рис. 4, сигналы с периодом T''' или T'' соответственно);
- вариант 2 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные симметричные углы слева и справа от границ периода (рис. 4, сигналы с периодом T' при $\varphi_1 = \varphi_2$);
- вариант 3 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные несимметричные углы слева и справа от границ периода (рис. 4, сигналы с периодом T' при $\varphi_1 \neq \varphi_2$);
- вариант 4 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданный угол слева или справа от границ периода и проведение симметрии полученного сигнала;
- вариант 5 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные симметричные углы слева и справа от границ периода и проведение симметрии полученного сигнала;

– вариант 6 – усечение синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные несимметричные углы слева и справа от границ периода и проведение симметрии полученного сигнала.

Следует отметить, что в зависимости от угла усечения неизбежно могут возникать ошибки в уравнениях баланса за счет изменения значений реактивных сопротивлений схемы замещения – индуктивностей и емкостей. Это вытекает из анализируемого периода ППС напряжения и тока. Так, например, для варианта 2 (рис. 4) можно выделить два различных участка, которые отличаются частотой сигнала. При этом при периоде T' частота ППС незначительно отличается от сетевой и погрешность определения ЭМП в таком случае будет минимальной. При периоде анализируемых сигналов напряжения и тока, рис. 5, частота ППС в значительной степени меньше частоты сетевого напряжения. Это вызовет значительные ошибки определения ЭМП.

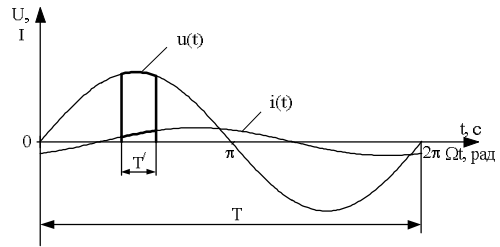


Рисунок 5 – Псевдополигармонические сигналы напряжения и тока

Анализ результатов использования ППС напряжения и тока, приведенный в [10], показал, что при этом возникают погрешности идентификации ЭМП АД. Это связано с тем, что усечение сигналов напряжения и тока приводит к нарушению равенства в уравнениях баланса составляющих мгновенной мощности на источнике питания и на элементах схемы замещения. Здесь накапливается погрешность в индуктивностях цепей за счет изменения частоты при усечении сигналов. Поэтому для устранения этой погрешности предложено усекавать не сигналы напряжения и тока, а сигналы мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения.

Для подтверждения вышеизложенного рассмотрим простейшую схему замещения, которая включает последовательно включенные активное сопротивление и индуктивность. Питание схемы осуществляется от источника синусоидального напряжения. Параметры анализируемой схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры схемы

R, Ом	L, Гн	U_m , В	Ω , рад/с
10	0,05	1	314

Мощности на источнике питания и на элементах схемы замещения при синусоидальном напряжении определяются в соответствии с выражениями (рис. 6):

$$p_{ist}(t) = u(t)i(t); \quad p_R(t) = i^2(t)R;$$

$$p_L(t) = Li(t)\frac{di(t)}{dt}.$$

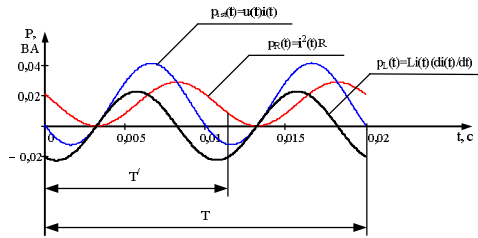


Рисунок 6 – Сигналы мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения

Напряжение и ток при синусоидальном питании схемы, которая содержит последовательно включенные активное сопротивление и индуктивность, можно описать в виде:

$$u(t) = U_m \cos(\Omega t);$$

$$i(t) = I_m \cos(\Omega t - \varphi) = I_m \cos(\varphi) \cos(\Omega t) + I_m \sin(\varphi) \sin(\Omega t) = I_{ma} \cos(\Omega t) + I_{mb} \sin(\Omega t),$$

где U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и тока; Ω – частота сетевого напряжения; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

С учетом вышеизложенных зависимостей, составляющие мощности на источнике и на элементах схемы замещения имеют вид:

$$p_{ist}(t) = \frac{1}{2}(U_m I_{ma} + U_m I_{ma} \cos(2\Omega t) + U_m I_{ma} \sin(2\Omega t));$$

$$p_R(t) = \frac{1}{2}R(I_{ma}^2 + I_{mb}^2 + (I_{ma}^2 - I_{mb}^2)\cos(2\Omega t) + 2I_{ma}I_{mb}\sin(2\Omega t));$$

$$p_L(t) = \frac{1}{2}L\Omega(2I_{ma}I_{mb}\cos(2\Omega t) + (-I_{ma}^2 + I_{mb}^2)\sin(2\Omega t)).$$

Для оценки эффективности предложенного подхода покажем, что выполняется закон сохранения энергии при разложении сигналов мощности на любом участке. Рассмотрим как выполняется баланс составляющих мгновенной мощности при рассмотрении сигналов на периоде, меньшем от периода сетевого напряжения, например, на периоде $T' = 0,012$ с. Составляющие мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения приведены в табл. 2. Из анализа приведенных данных видно, что погрешности определения составляющих мощности при этом не превышают 0,5 %.

Аналогичные результаты можно получить и при использовании более сложной схемы замещения, например, асинхронного двигателя. Для этого в простейшем случае можно рассмотреть Т-образную схему замещения, которая состоит из статорной цепи, цепи намагничивания и роторной цепи (рис. 7). Для анализа рассмотрим АД типа 4АП100Л4У3 с

номинальной мощностью 4 кВт (табл. 3). Составляющие мгновенной мощности на источнике и активных сопротивлениях и индуктивностях, полученные при номинальном напряжении питания АД, сведены в табл. 4.

Таблица 2 – Составляющие мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения

№ гармоника	P _{ist} , ВА		P _R + P _L , ВА	
	косинусная	синусная	косинусная	синусная
0	0,011		0,011	
1	-0,013	0,00457	-0,013	0,004585
2	0,002122	-0,001529	0,002123	-0,001535
3	0,000724	-0,0007788	0,000724	-0,0007814
4	0,000378	-0,0005396	0,000378	-0,0005413
5	0,000236	-0,0004169	0,000236	-0,0004183

Таблица 3 – Параметры АД типа 4АП100Л4У3

R ₁ , Ом	R ₂ ' , Ом	X ₁ , Ом	X ₂ ' , Ом	X _μ , Ом
1,35	1,38	2,123	2,129	77,24

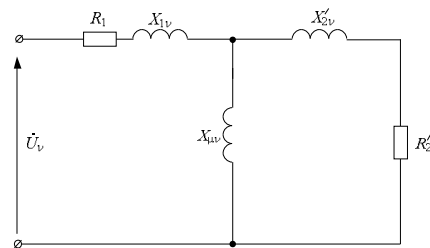


Рисунок 7 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Таблица 4 – Составляющие мгновенной мощности на источнике и элементах СЗ (рис. 7)

№ гармоника	P _{ist} , ВА		P _{Sz} , ВА	
	косинусная	синусная	косинусная	синусная
0	22,381		22,3815	
1	236,836	609,243	236,843	609,2474
2	447,479	598,013	447,478	598,0125
3	254,433	325,074	254,433	325,077
4	11,623	237,539	11,627	237,537
5	-5,982	204,595	-5,9825	204,592

ВЫВОДЫ. Таким образом, анализ полученных результатов свидетельствует о целесообразности использования ППС напряжения и тока при идентификации ЭМП АД. Очевидно, что при использовании ППС можно получить систему идентификационных уравнений для определения ЭМП АД, методы решения которых хорошо известны. При использовании ППС напряжения и тока погрешность идентификации параметров зависит от выбранного периода сигнала и периода разложения.

Анализ полученных результатов показал, что более эффективно выполнять разложение в ряд Фурье на части периода сетевого напряжения не сигналов напряжения и тока, а сигналов мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д. И., Калинов А. П., Ромашихин Ю. В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды Международной четырнадцатой НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», 2007. – С. 273–278.
2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. – Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. – 379 p.
3. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.П., Шинка Я.К. *Мощность переменного тока*. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
4. Родькин Д. И. Особенности применения энергетического метода идентификации двигателей переменного тока при псевдополигармонических сиг-

налах // *Электромеханичні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – Вип. 1 (5)/2009. – С. 7–20.

5. Родькин Д. И. О балансе мощности в задачах диагностики электромеханических систем // Проблемы автоматизированного электропривода. Вестник ХПИ. – Харьков, 2004. – Вып. 43. – С. 166–169.

6. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др. *Баланс энергий в силовых цепях*. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.

7. Родькин Д. И. Терминологические понятия при использовании аппарата мгновенной мощности // Труды Луганского отделения Международной Академии информации. – Луганск, 2005. – № 1 (10). – С. 145–154.

8. Фихтенгольц Г.М. *Курс дифференциального и интегрального исчисления*. – М.: Наука, 1969. – Т. 3. – 656 с.

9. Ромашихин Ю. В., Родькин Д. И., Калинов А. П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // *Вісник КДПУ*. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). – С. 130–136.

PSEVDOPOLIGARMONICAL POWER SIGNALS FOR PROBLEMS OF THE IDENTIFICATIONS ELECTROMAGNETIC PARAMETER ELECTRIC MOTORS

Yu. Romashykhin, N. Rudenko, V. Moshkovskiy

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: Romashihin_yuriy@mail.ru.

Mathematical device of the psevdopoligarmonical signal of the voltage and current reception is considered in the paper at sinusoidal feeding with use the transformation Furie. They are shown different ways of the reception psevdopoligarmonical signal of the voltage, current and instant power. It is proved that use psevdopoligarmonical signal to powers in equations of the balance answers the law of the conservation. Efficiency of the use psevdopoligarmonical signal is shown at identifications electromagnetic parameter electric machines.

Key words: electrical motors, electromagnetic parameters, signals of the voltage and current.

REFERENCES

1. Rodkin D., Kalinov A., Romashykhin Yu. Efficiency of the method energy diagnostics parameters of the induction motors // *Electric drive variable current: Works International XIV NTK*. – Ekaterinburg: GOU VPO "Uraliskiy state technical university – UPI", 2007. – PP. 273–278. [in Russian]
2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. – Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. – 379 p.
3. Krogeris A., Rashevic K., Treymanis E., Shinka Ya. *The Power variable current*. – Riga: Fiz.-energ. in-t Latv. AN, 1993. – 294 p. [in Russian]
4. Rodkin D. Particularities of the using the energy method to identifications of induction motors at psevdopoligarmonical signal // *Electromechanical and energysaving systems*. – Kremenchuk: KDPU, 2009. – Iss. 1(5)/2009. – PP. 7–20. [in Russian]
5. Rodkin D. About powers balance in problem of the diagnostics of the electromechanic systems // *Problem of automated electric. Bulletin KhPI*. – Khar'kov, 2004. – Iss. 43. – PP. 166–169. [in Russian]

6. Tonkal V., Novoselcev A., Denisyuk S. and others. *Balance energy in power current*. – K.: Scientific thought, 1992. – 312 p. [in Russian]

7. Rodkin D. Terminological notions when use the device to instant power // *Works of of Lugansk division of the International Academy of Information*. – № 1 (10)/2005. – Lugansk. – PP. 145–154. [in Russian]

8. Fihtengolc G. *Course differential and integral ischisleniya*. – M.: Nauka, 1969. – V. 3. – 656 p. [in Russian]

9. Romashykhin Yu., Rodkin D., Kalinov A. Energy method to identifications parameter induction motors // *Bulletin of KDPU*. – Iss. 3 (44)/2007. – Kremenchuk: KDPU, 2007. – PP. 130–136. [in Russian]

Стаття надійшла 22.08.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й