

УДК 621.313.333.02

ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, СВЯЗАННЫХ С ЧАСТОТОЙ ПИТАНИЯ И ОБОРОТНОЙ ЧАСТОТОЙ

О. В. Браташ, А. П. Калинов

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Рассмотрена проблема разделения диагностических признаков дефектов, которые вызывают вибрацию на оборотной частоте и двойной частоте сети. Показано, что комплексная методика анализа вибросигнала с использованием различных режимов работы позволяет повысить достоверность диагностирования дефектов асинхронного двигателя, имеющих похожие диагностические признаки.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, диагностика, виброускорение, спектральный анализ.

ДІАГНОСТИКА ДЕФЕКТІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЧАСТОТОЮ ЖИВЛЕННЯ Й ОБОРОТНОЮ ЧАСТОТОЮ

О. В. Браташ, А. П. Калинов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Розглянуто проблему поділу діагностичних ознак дефектів, які викликають вібрацію на оборотній частоті й подвійній частоті мережі. Показано, що комплексна методика аналізу вибросигналу з використанням різних режимів роботи дозволяє підвищити вірогідність діагностування дефектів асинхронного двигуна, які мають схожі діагностичні ознаки.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностика, віброприскорення, спектральний аналіз.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На сегодняшний день одной из актуальных проблем является повышение надежности эксплуатации электромеханического оборудования на базе асинхронных двигателей (АД). Одним из наиболее эффективных способов диагностирования электрооборудования является вибрационная диагностика. Основным ее достоинством является возможность проведения диагностики без выведения агрегата из эксплуатации. Вибрационные сигналы являются одним из самых информативных источников данных о состоянии электрической машины. На основании их обработки получают разнообразные параметры вибрации, которые непосредственно используются как основные диагностические признаки в вибродиагностике.

Для детального исследования технического состояния оборудования используются методы спектрального анализа вибросигнала. Выявление повышенных амплитуд вибрации на частотах, которые совпадают с частотами возможных повреждений элементов, резонансными частотами деталей, на частотах рабочего процесса, позволяет выявить неисправность на разных стадиях ее развития [1–4].

Одними из наиболее распространенных дефектов электрических машин являются дефекты, которые определяются по возникновению и росту гармоник на частоте электромагнитных сил ($f_{em}=2f_1$, где $f_1=50$ Гц – частота питающей сети). Вызывать рост вибрации на данной частоте могут как дефекты электромагнитной природы, такие, как несимметрия обмоток статора и несимметрия питающего напряжения, так и дефекты механической природы, например, статический дисбаланс. Разделение диагностических признаков этих дефектов – достаточно сложная задача.

Ряд наиболее распространенных дефектов, появление которых сопровождается высоким уровнем вибрации, связан с частотой вращения ротора $f_{об}$ ($f_{об}=(f_1/p)(1-s)$, где s – скольжение, p – количество пар полюсов) и кратными ей составляющими. Присутствие оборотных гармоник в спектре вибросигнала свидетельствует о следующем [3, 5]:

- нарушение баланса ротора;
- нарушение соосности валов;
- ослабление крепления электрической машины.

До сегодняшнего времени не существует методики четкого разделения данных дефектов по причине того, что все они базируются на определении роста первой оборотной гармоники. Поэтому достоверность диагностики этих дефектов, диагностические признаки которых описаны во многих отечественных и зарубежных литературных источниках, остается низкой и нуждается в уточнении [1–10].

Учитывая вышесказанное, была сформулирована цель работы, заключающаяся в повышении достоверности диагностики дефектов, связанных с частотой питания и оборотной частотой и кратными им гармониками.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При проведении диагностики причин роста вибрации на частоте $f_{ем}$ возникает необходимость в описании диагностических признаков, которые могут вызвать эту вибрацию (табл. 1).

Таблица 1 – Диагностические признаки дефектов, связанных с частотой электромагнитных сил

	Характерные частоты
Дефекты обмоток статора	$f_{ем}, 1/2 f_{ем}, 3/2 f_{ем}, 5/2 f_{ем}$
Статический небаланс	$f_{ем}$
Несимметрия напряжения питания	$f_{ем}$

Для идентификации причин роста вибрации на частоте $f_{ем}$ необходимо использовать дополнительную информацию.

Основным признаком несимметрии обмоток статора, который отличает этот дефект от остальных, является расширенный спектр: кроме основной гармоники $f_{ем}$, в спектре присутствуют гармоники $1/2 f_{ем}, 3/2 f_{ем}, 5/2 f_{ем}$ [2–5].

Для несимметрии питания характерно наличие только первой гармоники на частоте электромагнитных сил при отсутствии других дефектов. В качестве дополнительного признака для разделения несимметрии напряжения питания и несимметрии обмоток можно использовать коэффициент несимметрии напряжений обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U^{(2)}}{U^{(1)}}, \text{ где } U^{(1)} \text{ – напряжение прямой последовательности, } U^{(2)} \text{ – напряжение}$$

обратной последовательности [6]. Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений обратной последовательности равны 2,0 и 4,0 % соответственно. Таким образом, если в спектре вибросигнала присутствует лишь первая гармоника на частоте $f_{ем}$ и при этом значение коэффициента несимметрии больше предельно допустимого значения, то речь идет о несимметрии напряжения питания. Если же спектр содержит дробные нечетные гармоники частоты $f_{ем}$, а K_{2U} не выходит за пределы, установленные ГОСТ 13109-97, и спектр содержит дробные нечетные гармоники частоты $f_{ем}$, то это свидетельствует о несимметрии обмоток статора. Таким образом, спектральный

анализ с учетом дополнительного параметра K_{2U} дает возможность разделить диагностические признаки дефектов, которые вызывают вибрацию на частоте f_{em} .

Основной признак того, что дефект имеет электромагнитную природу – мгновенное исчезновение его признаков в спектре вибрации после отключения электрической машины от сети. Изменение уровня вибрации по отношению к исходному значению говорит о вкладе электромагнитных и механических дефектов в общую величину вибрации. Для разделения дефектов механической и электромагнитной природы необходимо проанализировать вибропараметры до и после отключения АД от сети.

Вибрация на оборотной частоте может быть вызвана различными дефектами механической природы. В табл. 2 приведены основные дефекты АД, которые вызывают вибрацию на оборотной частоте.

Таблица 2 – Диагностические признаки механических дефектов, связанных с оборотной частотой ротора

	Характерные частоты
Несоосность	$f_{об}, 2 f_{об}$ ($2 f_{об}$ преобладает над $f_{об}$ в радиальном направлении и, наоборот, в осевом)
Динамический небаланс	$f_{об}, 2 f_{об}, f_{эм} \pm k f_{об}$
Дефекты креплений ЭМ	$k f_{об}, k=1-10$

Статический и динамический эксцентриситеты являются источниками радиальных электромагнитных колебательных сил с частотами $2f_1$ и $f_{об}$ соответственно, а их взаимодействие с током ротора и статора дает дополнительные тангенциальные электродинамические силы на частотах f_{em} и $f_{em} \pm k f_{об}$ [2, 4]. И если неоднозначность на частоте f_{em} можно исключить, исследуя сигнал виброускорения при отключении АД от сети (спектр сигнала вибрации после отключения содержит гармоники, которые вызваны дефектами механической природы), то причина роста вибрации на частоте $f_{об}$ нуждается в уточнении.

Зачастую диагностика несоосности основана на преобладании амплитуды на частоте $2f_{об}$ над амплитудой $f_{об}$ радиальной вибрации и на существовании сильных пиков $f_{об}$, преобладающих над пиками $2f_{об}$ в осевой вибрации.

При ослаблении креплений ЭМ временной сигнал виброускорения имеет нестационарный, импульсный характер. В спектре присутствует достаточно большое количество целых и кратных составляющих $f_{об}$, а также субгармоники. Будет присутствовать также одна характерная гармоника с частотой, равной половине оборотной частоты ротора [2–5].

Все описанные дефекты вызывают рост вибрации на оборотной частоте, поэтому возникает необходимость разделения диагностических признаков этих дефектов.

Разделить диагностические признаки несоосности и дисбаланса возможно, *если скорость машины непостоянна. В этом случае уровень вибрации, вызванной дисбалансом, будет изменяться пропорционально квадрату скорости. В то же время уровень вибрации, вызванной несоосностью, не изменится* [5]. Для изменения скорости машины зачастую используется преобразователь частоты (ПЧ).

Для проверки рассмотренных диагностических признаков использовались данные, полученные на АД типа АИР80В4У2: $P_n=1,5$ кВт, $n_n=1395$ об/мин при работе от симметричного ($K_{2U} = 1,13 \%$) и несимметричного ($K_{2U} = 7,1 \%$) источников питания и при

параметрической несимметрии обмоток статора 14 % ($K_{2U} = 1,18 \%$), а также при питании от ПЧ ($f_1=50$ Гц и $f_1=60$ Гц). Анализ сигналов виброускорения проводится по трем пространственными осям (X, Y – радиальное направление, Z – осевое направление). На рис. 1 приведен сигнал виброускорения в радиальном направлении на небольшом отрезке времени до и после отключения АД от сети. Анализ спектров для указанных опытов в режиме холостого хода показал, что несимметрия обмоток статора вызывает в спектре виброускорения появление гармоник на частотах: $1/2f_{\text{EM}}$, f_{EM} , $2f_{\text{EM}}$, $3/2f_{\text{EM}}$ (рис. 2, 3), амплитуда гармоник возрастает с ростом уровня несимметрии. В то же время в спектре виброускорения при несимметрии питания (рис. 4) присутствуют лишь две значимые гармоники – f_{EM} , $3f_{\text{EM}}$. При этом гармоника на частоте $3f_{\text{EM}}$ появляется в результате искажения формы питающего напряжения.

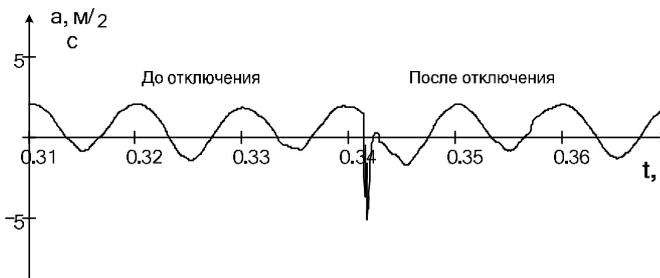


Рисунок 1 – Сигнал виброускорения

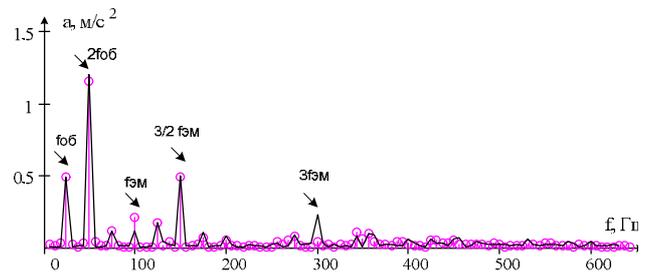


Рисунок 2 – Спектр виброускорения при несимметрии обмоток статора 0,3 %

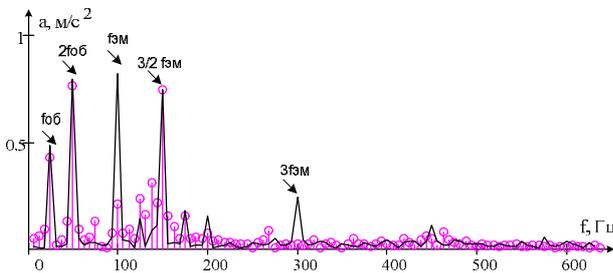


Рисунок 3 – Спектр виброускорения при несимметрии обмоток статора 14 %

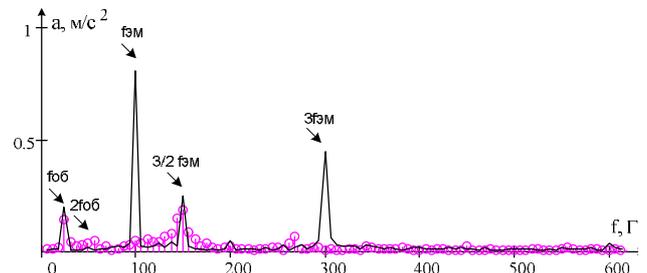


Рисунок 4 – Спектр виброускорения при несимметрии напряжения питания

— – режим холостого хода, – режим выбега

В табл. 3–5 приведены амплитуды отдельных гармоник виброускорения в режиме холостого хода и режиме отключения от сети для двигателя с несимметрией обмоток статора 0,3 и 14 % соответственно и при несимметрии питающего напряжения.

Таблица 3 – Амплитуды отдельных гармоник сигнала виброускорения до и после отключения АД от сети при несимметрии обмоток статора 0,3 %

0,3 % рабочий режим							
	25	50	75	100	150	356,25	300
x	0,103	0,3631	0,1418	0,5388	0,2145	0,3531	0,0472
y	0,4954	1,2034	0,1161	0,1168	0,5015		0,2270
z	0,0486	0,2358	0,0462	0,6405	0,0657	0,0322	

	25	50	75	100	150	356,25	300
0,3 % режим выбега							
x	0,074	0,3293	0,1288	0,4049	0,1323	0,2597	0,0519
y	0,4922	1,1602	0,1144	0,214	0,4967		
z	0,0483	0,2267	0,0389	0,522	0,0477		

Таблица 4 – Амплитуды отдельных гармоник сигнала виброускорения до и после отключения АД от сети при несимметрии обмоток статора 14 %

14 % рабочий режим							
	25	50	100	150	175	200	300
x	0,08841	0,51829	1,2571	0,25687	0,0705	0,034	
y	0,47385	0,80206	0,83156	0,73698	0,1754	0,156	0,2374
z	0,05995	0,31414	1,5097	0,09954	0,0320	0,098	
14 % режим выбега							
x	0,11333	0,41743	0,6796	0,20467	0,0536		
y	0,4992	0,73664	0,23358	0,87196			
z	0,03122	0,2794	0,78524	0,0498	0,0302		

Таблица 5 – Амплитуды отдельных гармоник сигнала виброускорения до и после отключения АД от сети при несимметрии напряжения питания

250 В рабочий режим							
	25	50	100	150	200	300	
x	0,1039	0,33356	0,89697	0,0804			
y	0,19865	0,014298	0,80751	0,24525	0,047017	0,44838	
z	0,04574	0,22313	1,0916	0,0501	0,04649	0,01327	
250 В режим выбега							
x	0,081859	0,35042	0,33356	0,055204			
y	0,14952	0,013	0,06217	0,23773	0,024962		
z	0,026196	0,2046	0,44453				

Експериментальні дослідження АД для спроб з несимметриєю обмоток статора 0,3 і 0,14 % відповідно і несимметриєю живлячого напруги після відключення від мережі (рис. 2–4) показали, що в спектрах вібросигналів присутні гармоніки $f_{об}$, $2 f_{об}$, $6f_{об}$. При цьому амплітуда $f_{об}$, $2 f_{об}$ порівняно з режимом холостого ходу знизилася на 30 %, рівень гармоніки на частоті $6f_{об}$ не змінився, відповідно, причина появи цих гармонік має, в основному, механічну природу. Гармоніка на частоті $f_{ем}$ знизилася до 75 %, а значить, причина її появи має електромагнітну природу. Для всіх трьох експериментів характерно присутність в спектрі гармонік кратних оберотної частоті, причому їх амплітуда порівняно з робочим режимом змінюється незначально. Така спектральна картина може бути викликана як дисбалансом, так і несоосністю валів або ослабленням кріплень електричної машини в рівній ступені.

Ослаблення кріплень електричної машини можна діагностувати по великому числу гармонік, кратних оберотної (табл. 2). В спектрах вібрацій, отриманих

экспериментально, отсутствуют диагностические признаки этого дефекта. Для разделения диагностических признаков дисбаланса и несоосности валов были проведены эксперименты при работе АД от преобразователя частоты.

На рис. 5 приведены спектры виброускорения при питании АД от преобразователя частоты. При частоте питания $f_1=50$ Гц, $f_{o61}=24,98$ Гц амплитуда этой гармоники составляет $0,32$ м/с², частоте питания $f_1=60$ Гц, $f_{o62}=28,88$ Гц амплитуда этой гармоники составляет $0,819$ м/с². Очевидно, что амплитуда оборотной гармоники возрастает с увеличением скорости вращения, следовательно, ее появление, а также появление кратных ей гармоник вызвано дисбалансом.

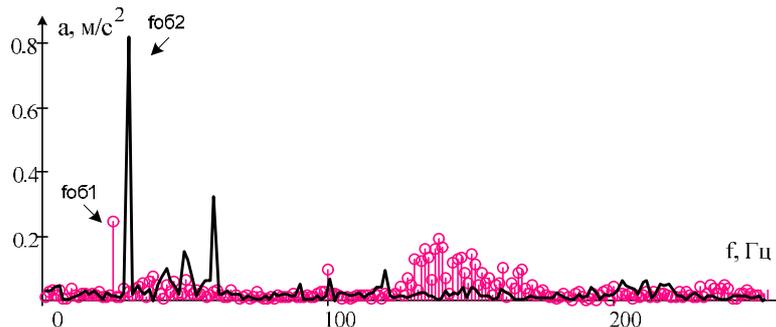


Рисунок 5 – Спектры виброускорения при частоте напряжения питания $f_1 = \text{var}$
— частота сети $f_1=50$ Гц, $\color{pink}\uparrow$ – частота сети $f_1=60$ Гц

ВЫВОДЫ. В работе рассмотрена проблема разделения диагностических признаков дефектов, которые вызывают вибрацию на частоте сети и оборотной частоте при проведении спектрального анализа вибросигнала. Использование режима отключения АД позволяет исключить из анализа гармонические составляющие, вызванные причинами электромагнитной природы. Сигнал вибрации в режиме отключения может использоваться для идентификации математической модели вибрации, что позволит выделить и оценить вибрацию электромагнитной природы в АД непосредственно. Изменение частоты оборотов электрической машины позволяет выделить диагностические признаки дисбаланса на фоне других дефектов, связанных с частотой вращения ротора и кратными к ней гармоническими составляющими. Спектральный анализ вибрации при питании от ПЧ может также использоваться для разделения диагностических признаков дефектов механической и электромагнитной природы для двигателей, в которых оборотная частота почти равна частоте питающей сети. Комплексная методика анализа вибросигнала с использованием различных режимов работы позволяет повысить достоверность диагностирования дефектов АД, которые имеют похожие диагностические признаки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.
2. Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Труды Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США. – СПб., 1999. – Вып. 9.
3. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь, 1996. – 176 с.

4. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учебное пособие. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. – 152 с.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учебное пособие. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 108 с.
6. ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999–01–01. ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 32 с.
7. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
8. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие / Под ред. Н.В. Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с.
9. Iorgulescu M., Beloiu R., Popescu M.O. Vibration monitoring for diagnosis of electrical equipment's faults / 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010 IEEE. – Romania, Bucharest, 2010.
10. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman, Howard Sedding. – United Kingdom, London: the Institution of Engineering and Technology, 2008.
11. Калінов А.П., Мамчур Д.Г., Браташ О.В., Простак О.І. Оцінювання впливу неякісності напруги живлення на віброхарактеристики асинхронних двигунів // Вісник КДПУ. – Вип. 4/2009 (57), част. 1. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – С. 78–81.

DIAGNOSTICS DEFECTS OF INDUCTION MOTORS, RELATED WITH ROTATING AND SUPPLY FREQUENCIES

O. Bratash, A. Kalinov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

The article deals with the problem of the division of diagnostic signs of defects that cause the vibration on the rotational frequency and a double supply frequency. It is shown that the complex method of analysis using different vibration modes can improve the accuracy of the diagnosis of defects in blood pressure, which have similar diagnostic features.

Key words: induction motor, diagnosis, acceleration, spectral analysis.

REFERENCES

1. Shearman A.R., Solovyov A.B. *Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment. Bibliogr.* – М., 1996. – 276 p. [in Russian]
2. Barkov A.V., Barkov N.A. Intelligent monitoring and diagnostics of machines for vibration // *Proceedings of the St. Petersburg Institute Energy of professional development Ministry of Energy of the Russian Federation and the United States Institute of vibration.* – SPb., 1999. – Iss. 9. [in Russian]
3. Russov V.A. Spectral vibration diagnostics. – Perm, 1996. – 176 p. [in Russian]
4. Barkov A.V., Barkov N.A. *Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: Manual.* – SPb.: Publishing Center SPbSMTU, 2004. – 152 p. [in Russian]
5. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Practical basis vibroacoustic diagnostics of machinery: the Manual.* – Омск: ОмSTU, 2002. – 108 p. [in Russian]
6. GOST 13109–97. *Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility standards of quality electric power supply systems in general. Introduced 1999 – 01 – 01.* IPK Publishing House of the standards, 1999. – 32 p. [in Russian]
7. Goldin A. *Mibration of rotating machines.* – М.: Mashinostoyeniye, 1999. – 344 p.

8. *Vibration power machines. A Reference Guide.* / Ed. N.V. Grigoriev. – L.: Mashinostroyeniye, 1974. – 464 p. [in Russian]

9. Iorgulescu M., Beloiu R., Popescu M.O. Vibration monitoring for diagnosis of electrical equipment's faults / 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010 IEEE. – Romania, Bucharest, 2010.

10. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman, Howard Sedding. – United Kingdom, London: the Institution of Engineering and Technology, 2008.

11. Kalinov A.P., Mamchur D.G., Bratash O.V., Prostack O.I. Estimation of influence low-quality power to the vibration characteristics of induction motor // *Transaction KSPU. Scientific papers KSPU.* – Kremenchuk: KSPU, 2009. – Iss. 4/2009 (57). – PP. 78–81. [in Ukrainian]



Браташ Оксана Вікторівна,
аспірант каф. «Системи автоматического управління и електропривод»
КрНУ,

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,
Тел. (05366) 3-11-47

E-mail: scenter@kdu.edu.ua



Калинов Андрей Петрович,

к.т.н., доц. каф. «Системи автоматического управления и электропривод»
КрНУ,

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина,
Тел. (05366) 3-11-47

E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Стаття надійшла 17.01.2013

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