

УДК 658.562.4: 621.317.4

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕССЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Широков К.М., Гречихин В.В.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: konstantin-shirokov@mail.ru

Рассмотрена система управления производством электромагнитов. Показано, что применение бессенсорных устройств для определения вебер-амперных характеристик изделий позволяет повысить ее эффективность. Однако для этих устройств характерна погрешность определения потокоцепления, вызванная изменением активной составляющей сопротивления обмотки электромагнита в процессе испытания. Проведены исследования работы бессенсорных устройств в системе схемотехнического моделирования и получены зависимости изменения приведенной погрешности измерения потокоцепления. Установлено, что погрешности изменяются как по абсолютному значению, так и по знаку и отличаются вследствие разного характера изменения сопротивления обмотки. Разработан алгоритм оценки погрешности измерения потокоцепления. Приведены результаты экспериментального исследования алгоритма с компенсацией погрешности измерения активной составляющей сопротивления обмотки, на основании которых можно сделать вывод, что его применение позволяет создавать оптимальные по точности и производительности бессенсорные устройства.

Ключевые слова: система управления, электромагнит, вебер-амперная характеристика, потокоцепление

RESEARCHING OF SENSORLESS DEVICES FOR DETERMINING THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNET PRODUCTION MANAGEMENT

Shirokov K.M., Grechikhin V.V.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional University «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: konstantin-shirokov@mail.ru

Considered the system of electromagnet production management. It is shown that the use of sensorless devices for determining flux-current characteristics of products allows to improve its effectiveness. However, these devices are characterized by error in determining the flux caused by a change in the active component of the electromagnet coil resistance during the test. Studies have been conducted of sensorless devices in the circuit simulation system and were obtained dependences of change of reduced error of flux measurement. It was found that the error are different because of different nature of winding resistance change. The algorithm of error estimation of flux measurement was developed. Presented the results of an experimental study of the algorithm with measurement error compensation of active component of winding resistance. Based on these results it can be concluded that its use allows to create optimal for precision and performance sensorless device.

Keywords: regulation system, electromagnet, weber-ampere characteristic, magnetic linkage

Сложность конструкций электротехнических изделий (ЭТИ), тенденции миниатюризации и снижения материалоемкости предъявляют все более высокие требования к качеству комплектующих деталей и ЭТИ в целом. Для увеличения выхода годных изделий, как правило, используются системы управления производством ЭТИ с применением межоперационного технологического контроля магнитных, геометрических и др. характеристик и параметров комплектующих деталей. Недостатком такого контроля являются значительные экономические и временные затраты на его организацию. В то же время технические характеристики целого ряда ЭТИ, к которым относятся пропорциональные электромагниты, электрические машины, трансформаторы и др., во многом зависят от взаимного влияния свойств комплектующих деталей. Как правило, выявить бракованные изделия в этом случае удается лишь после испытаний готовых изделий. Перспективным направлением таких испыта-

ний является определение наиболее информативных характеристик изделий, по которым можно судить о характере неисправности и диагностировать бракованные комплектующие изделия. Задача усложняется тем, что для их определения необходимо специальное оборудование и использование дополнительных сенсоров. Поэтому целесообразно использовать технологии испытаний ЭТИ, основанные на использовании «внутренних сенсорных» свойств испытуемых изделий. Например, управляющий и информационный сигналы подаются и снимаются с обмотки электромагнита, являющейся его составной частью. Определяется вебер-амперная характеристика (ВАХ), анализируя характерные точки и сегменты которой, судят о состоянии электромагнита. В этой связи актуальным является разработка теоретических основ создания бессенсорных устройств определения характеристик изделий и построение на их основе эффективных систем управления производством ЭТИ.

Важными элементами системы управления (рис. 1) являются бессенсорные устройства определения ВАХ электромагнитов. От времени и погрешности определения ВАХ во многом зависит эффективность системы управления производством этих изделий. В таких устройствах рабочая обмотка испытуемого электромагнита, при протекании в ней тока I , служит в качестве источника магнитного поля. Активную составляющую сопротивления обмотки $R_{об}$ предварительно измеряют и затем используют как постоянную величину при вычислении магнитного потокосцепления [1, 4, 8]. Действительное значение потокосцепления Ψ_d определяют по формуле

$$\Psi_d = \int_0^t (U - I \cdot (R_{об} + \Delta R_{об})) dt + C, \quad (1)$$

где U – напряжение на обмотке испытуемого изделия; $\Delta R_{об}$ – абсолютная погрешность определения активной составляющей сопротивления обмотки; t – время испытания; C – постоянная.

Величина $\Delta R_{об}$ зависит от погрешности измерения $R_{об}$ в начале испытаний, обусловленной как наличием методических и инструментальных погрешностей устройства, так и изменением $R_{об}$ в процессе испытаний из-за нагрева обмотки.

В [6] установлено, что в процессе испытания электромагнитов из-за изменения $\Delta R_{об}$ возникает погрешность измерения потокосцепления и, как следствие, погрешность определения ВАХ бессенсорными устройствами [1, 4, 8]. При этом зависимости погрешностей разных устройств отличаются вследствие разного характера $\Delta R_{об}(t)$. Для учета данной особенности предлагается использовать следующие коэффициенты. Весовой коэффициент j учитывает среднюю значимость влияния $\Delta R_{об}$:

$$j = \frac{\sum_{k=2}^N |I_k R_{обk}| (t_k - t_{k-1})}{\sum_{k=2}^N |U_k - I_k R_{обk}| (t_k - t_{k-1})}, \quad (2)$$

где I_k – значение тока в обмотке; U_k – значение напряжения на обмотке; $\Delta R_{обk}$ – активная составляющая сопротивления обмотки в момент времени t_k , $k = 1, 2, \dots, N$ – количество временных отсчетов при определении ВАХ.

Коэффициент p вычисляется по формуле

$$p = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{\delta R_{обk}}{N}}{\delta R_{об}}, \quad (3)$$

где $\delta R_{об}$ – относительная погрешность определения активной составляющей сопротивления обмотки; $\delta R_{обk}$ – относительная погрешность определения активной составляющей сопротивления обмотки на k -м шаге определения ВАХ, и позволяет учитывать характер изменения $\delta R_{об}$ в ходе испытаний.

С целью анализа погрешности измерения потокосцепления проведено исследование работы бессенсорных устройств [1, 4, 8] в системе схемотехнического моделирования *Micro-Cap 9* для параметров обмотки: начальное значение активной составляющей сопротивления $R_{обн} = 10$ Ом; индуктивность $L = 1,148$ Гн; число витков обмотки $w = 196$, и характере изменения $\delta R_{об}$ при определении ВАХ: постоянное значение ($\delta R_{об} = \text{const}$); линейное изменение ($\delta R_{об} = \text{linear}$).

На рис. 2 показаны зависимости изменения приведенной погрешности измерения потокосцепления в ходе испытаний $\gamma_{\Psi}(t)$ при $\delta R_{об} = 5\%$ (линейный режим): бессенсорное устройство [1] – 1; бессенсорное устройство [4] – 2; бессенсорное устройство [8] – 3. Как следует из рисунка, погрешность изменяется как по абсолютному значению, так и по знаку.

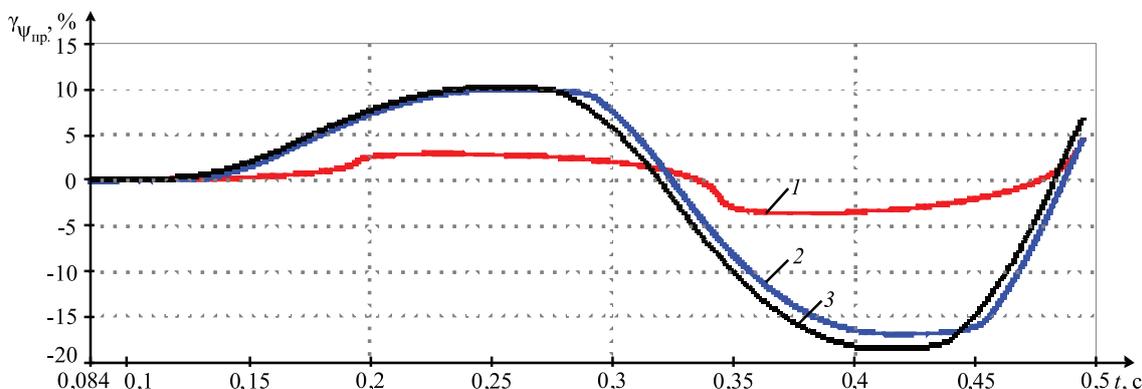


Рис. 2. Зависимости приведенной погрешности измерения потокосцепления бессенсорных устройств

В табл. 1 приведены результаты моделирования работы бессенсорных устройств, где $\tilde{\gamma}_\psi$ – средняя приведенная погрешность

определения потокосцепления; p_γ – коэффициент, определяемый по формуле $p_\gamma = \gamma_\psi / (j \delta R_{об})$.

Таблица 1

Результаты моделирования бессенсорных устройств

$\delta R_{об} = \text{const}$									
$\delta R_{об}, \%$	Бессенсорное устройство [1]			Бессенсорное устройство [4]			Бессенсорное устройство [8]		
	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ
0	4,44	0,1	–	4,83	0,1	–	0,97	0,1	–
0,3	4,45	1,2	0,92	4,84	1,3	0,92	0,98	0,3	0,86
1,0	4,49	4,3	0,95	4,87	4,6	0,95	0,99	0,9	0,94
3,0	4,59	13,0	0,95	4,97	14,1	0,95	1,04	2,9	0,94
5,0	4,69	21,9	0,93	5,07	23,6	0,93	1,10	5,1	0,92
$\delta R_{об} = \text{linear}$									
$\delta R_{об}, \%$	Бессенсорное устройство [1]			Бессенсорное устройство [4]			Бессенсорное устройство [8]		
	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ	j	$\gamma_\psi, \%$	p_γ
0	4,44	0,1	–	4,83	0,1	–	0,97	0,1	–
0,3	4,45	0,6	0,43	4,84	0,6	0,41	0,98	0,1	0,35
1,0	4,49	2,0	0,44	4,87	2,0	0,42	0,99	0,4	0,40
3,0	4,59	5,9	0,44	4,97	6,1	0,42	1,04	1,3	0,42
5,0	4,69	9,7	0,43	5,07	10,0	0,41	1,09	2,3	0,43

Из табл. 1 следует, что коэффициент j фактически остается постоянным при разных значениях $\delta R_{об}$. Коэффициент p_γ хорошо коррелируется с коэффициентом p , поскольку для режима $\delta R_{об} = \text{const}$ коэффициент $p_\gamma = 1$, для $\delta R_{об} = \text{linear}$ – $p_\gamma = 0,5$.

На основании проведенных исследований предлагается следующий алгоритм оценки погрешности измерения потокосцепления бессенсорными устройствами в ходе испытаний электромагнитов.

1. Осуществляется измерение активной составляющей сопротивления обмотки в начале и конце испытаний.

2. Вычисляется относительная погрешность определения активной составляющей сопротивления обмотки $\delta R_{об}$.

3. Вычисляется весовой коэффициент j по формуле (2).

4. Вычисляется коэффициент p , учитывающий характер изменения $\delta R_{об}$ в ходе испытаний, по формуле (3).

5. Оценивается средняя приведенная погрешность измерения потокосцепления в соответствии с выражением

$$\tilde{\gamma}_\psi = p_\gamma \cdot j \cdot \delta R_{об}$$

В настоящее время разработаны методы определения ВАХ электромагнитов с компенсацией погрешности измерения актив-

ной составляющей сопротивления обмотки, основанные на периодическом измерении $R_{об}(t)$ с последующей корректировкой его значения в выражении (1) [2]; периодическом измерении $R_{об}(t)$ с последующей линейно-ступенчатой аппроксимацией значения активной составляющей сопротивления обмотки в выражении (1) [7]; на учете, выделенной в обмотке тепловой энергии [5].

С помощью предложенного алгоритма выполнялась оценка погрешности измерения потокосцепления с применением компенсации и без нее. Испытания производились на кольцевом образце и электромагните с применением бессенсорного устройства для определения ВАХ *MagHyst* [8]. Изделия специально оснащались дополнительной измерительной обмоткой для получения образцовых ВАХ. Был реализован квазистатический режим, при котором поддерживается постоянное значение ЭДС U_{ind} индуцируемой в рабочей обмотке, в течение всего цикла перемагничивания. Также осуществлялось измерение тока I в рабочей обмотке и напряжения U на ней для определения активной составляющей сопротивления обмотки непосредственно до начала испытаний $R_{обн}$ и после $R_{обк}$. Для считывания и обработки измеренных *MagHyst* данных, визуализации и сохранения результатов использовалось программное обеспечение

в среде графического программирования *LabVIEW* [3]. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 2, где

$\gamma_{\Psi_{\max}}$ – максимальная приведенная погрешность измерения потокосцепления; $t_{\text{и}}$ – время испытания.

Результаты экспериментальных исследований

Таблица 2

Электромагнит без компенсации $\delta R_{\text{об}}$										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
1	49,134	49,170	0,07	8,9	0,5	1,00	1,170	0,7	1,085	2,1
2	49,170	49,226	0,11	17,8	0,5	0,50	2,354	1,2	0,576	2,2
3	48,713	48,828	0,24	29,3	0,5	0,30	3,930	3,0	0,438	5,9
4	49,572	49,861	0,58	28,3	1,0	0,50	2,919	8,1	0,493	14,6
Кольцевой образец C45 без компенсации $\delta R_{\text{об}}$										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
5	1,078	1,079	0,05	3,6	7	0,50	0,134	0,5	2,724	1,0
6	1,075	1,079	0,41	20,2	7	0,08	0,819	4,1	0,494	8,0
Электромагнит с компенсацией $\delta R_{\text{об}}$, учитывающей выделенную в обмотке тепловую энергию										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
1	49,134	49,170	0,07	8,9	0,5	1,00	1,170	0,7	1,247	2,2
2	49,170	49,226	0,11	17,8	0,5	0,50	2,354	0,7	0,346	1,9
3	48,713	48,828	0,24	29,4	0,5	0,30	3,930	0,7	0,108	2,2
4	49,572	49,861	0,58	28,3	1,0	0,50	2,919	1,1	0,066	2,5
Кольцевой образец с компенсацией $\delta R_{\text{об}}$, учитывающей выделенную в обмотке тепловую энергию										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
5	1,078	1,079	0,05	3,6	7,0	0,50	0,134	0,4	2,508	1,1
6	1,075	1,079	0,30	20,3	7,0	0,08	0,819	0,9	0,106	2,1
Электромагнит с линейно-ступенчатой аппроксимацией $\delta R_{\text{об}}$										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
1	49,134	49,170	0,07	8,9	0,5	1,00	1,170	0,8	1,272	2,2
2	49,170	49,226	0,11	17,8	0,5	0,50	2,354	0,8	0,366	2,1
3	48,713	48,828	0,24	29,4	0,5	0,30	3,930	0,9	0,128	2,6
4	49,572	49,861	0,58	28,3	1,0	0,50	2,919	1,3	0,081	3,8
Кольцевой образец C45 с линейно-ступенчатой аппроксимацией $\delta R_{\text{об}}$										
Номер опыта	$R_{\text{об}_1}$, Ом	$R_{\text{об}_2}$, Ом	$\delta R_{\text{об}}$, %	j	I , А	$U_{\text{инд}}$, В	$t_{\text{и}}$, с	$\tilde{\gamma}_{\Psi}$, %	p_{γ}	$\gamma_{\Psi_{\max}}$, %
5	1,078	1,079	0,05	3,6	7	0,50	0,134	0,4	2,573	1,1
6	1,075	1,079	0,30	20,3	7	0,08	0,819	1,1	0,128	2,6

Из табл. 2 видно, что применение методов компенсации погрешности $\delta R_{\text{об}}$ обеспечивает повышение точности измерения потокосцепления электромагнитов. Использование метода, учитывающего выделенную в обмотке тепловую энергию, позволяет добиться лучших результатов: средняя приведенная погрешность не превысила 1,1%; максимальная приведенная погрешность – 2,5%. Если $\tilde{\gamma}_{\Psi} > 1,2\%$, то коэффициент $p_{\gamma} \approx 0,5$, что подтверждает возможность использования предложенного алгоритма для оценки погрешности измерения потокосцепления. Если $\tilde{\gamma}_{\Psi} < 1,2\%$, то коэффициент $p_{\gamma} > 1$. Следовательно, можно сделать вывод, что погрешность

$\delta R_{\text{об}}$ не является основной при измерении потокосцепления, а основной вклад вносят погрешности напряжения смещения нуля, интегрирования, преобразования аналоговых и цифровых сигналов. В этом случае осуществлять компенсацию $\delta R_{\text{об}}$ нецелесообразно ввиду ее незначительности, и, как следствие, введение режима компенсации $\delta R_{\text{об}}$ может привести к снижению точности определения ВАХ при увеличении времени испытания электромагнитов. Таким образом, применение разработанного алгоритма оценки погрешности измерения потокосцепления позволяет создавать оптимальные по точности и производительности бессенсорные устройства и тем самым повысить

эффективность системы управления производством электромагнитов.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 2833 «Теоретические основы моделирования, диагностики и информационного обеспечения сложных технических систем», выполняемого в рамках базовой части государственного задания № 2014/143, с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова.

Список литературы

1. Комаров Е.В., Покровский А.Д., Сергеев В.Г. [и др.] Испытание магнитных материалов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Ланкин М.В., Широков К.М. Компенсация температурной погрешности при бессенсорном измерении магнитных характеристик ферромагнитных материалов // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спец. выпуск: Информационно-измерительная техника и технологии. – С. 47–52.
3. Сахавова А.А., Широков К.М., Январев С.Г. Применение метода косвенного определения вебер-амперных характеристик в автоматизированной системе бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL: www.science-education.ru/111-10234 (дата обращения: 12.03.2014).
4. Сергеев В.Г., Шихин А.А. Магнитоизмерительные приборы и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
5. Широков К.М. Алгоритм определения магнитных характеристик электро-технических изделий // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2013. – № 1. – С. 70–73.
6. Широков К.М., Гречихин В.В. Анализ температурной погрешности бессенсорных устройств для измерения магнитных характеристик электротехнических изделий // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 28 сент. 2013 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2013. – С. 86–100.
7. Широков К.М., Шайхутдинов Д.В., Дубров В.И., Январев С.Г., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Устройство магнитного контроля для подсистемы управления производством электротехнических изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11665 (дата обращения: 12.03.2014).
8. Patent DE 10 2006 043 239 A1. Glet U.: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen.

References

1. Komarov E.V., Pokrovskij A.D., Sergeev V.G. [i dr.] Ispytanie magnitnyh materialov i sistem. M.: Jenergoatomizdat, 1984.
2. Lankin M.V., Shirokov K.M. Kompensacija temperaturnoj pogreshnosti pri bessensornom izmerenii magnitnyh harakteristik ferromagnitnyh materialov // Izvestija vuzov. Sev.-Kavk. region. Tehn. nauki. 2009. Spec. vypusk: Informacionno-izmeritel'naja tehnika i tehnologii, pp. 47–52.
3. Sahavova A.A., Shirokov K.M., Janvarev S.G. Primenenie metoda kosvennogo opredelenija veber-ampernyh harakteristik v avtomatizirovannoj sisteme bessensornoj diagnostiki jelektromagnitnyh mehanizmov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2013, no. 5; URL: www.science-education.ru/111-10234.
4. Sergeev V.G., Shihin A.A. Magnitoizmeritel'nye pribory i ustanovki. M.: Jenergoatomizdat, 1982.
5. Shirokov K.M. Algoritm opredelenija magnitnyh harakteristik jelektrotehnicheskikh izdelij // Izvestija vuzov. Sev.-Kavk. region. Tehn. nauki, 2013, no. 1, pp. 70–73.
6. Shirokov K.M., Grechihin V.V. Analiz temperaturnoj pogreshnosti bessensornyh ustrojstv dlja izmerenija magnitnyh harakteristik jelektrotehnicheskikh izdelij // Teorija, metody i sredstva izmerenij, kontrolja i diagnostiki: materialy XIV mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Novoherkassk, 28 sent. 2013 g. / Juzh.-Ros. gos. politehn. un-t (NPI) imeni M.I. Platova, Novoherkassk: JuRGPU(NPI), 2013, pp. 86–100.
7. Shirokov K.M., Shajhutdinov D.V., Dubrov V.I., Janvarjov S.G., Ahmedov Sh.V., Shajhutdinova M.V. Ustrojstvo magnitnogo kontrolja dlja podsystemy upravlenija proizvodstvom jelektrotehnicheskikh izdelij // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija, 2013. no. 6; URL: www.science-education.ru/113-11665.
8. Patent DE 10 2006 043 239 A1. Glet U.: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen.

Рецензенты:

Горбатенко Н.И., д.т.н., профессор, первый проректор, ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Работа поступила в редакцию 30.04.2014.