

ISSN 0136-3360

**ИЗВЕСТИЯ**  
**ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

**6**

**2013**

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И УЧЕБНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель – Министерство образования и науки Российской Федерации

Соучредитель – издатель – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

№ 6, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>Нос О.В., Панкратов В.В.</b> Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе.....  | 3  |
| <b>Шаншуров Г.А.</b> Оценка качества обмоток машин переменного тока на стадии проектирования.....   | 9  |
| <b>Приступ А.Г., Топорков Д.М.</b> Исследование способов уменьшения пульсаций момента в магнитоэлектрических синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками.....             | 14 |
| <b>Вяльцев Г.Б., Шевченко А.Ф.</b> Численное моделирование уравнительных токов в электрических машинах с дробно-зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов ..... | 18 |
| <b>Вдовин В.В., Котин Д.А., Панкратов В.В.</b> Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания.....                 | 23 |
| <b>Глазырин М.В., Диёров Р.Х.</b> Анализ динамических свойств гидроагрегата на основе машины двойного питания .....   | 28 |
| <b>Тюков В.А.</b> О влиянии различных параметров на процесс пуска индукционных двигателей .....   | 32 |
| <b>Алиферов А.И., Бланк А.В., Бикеев Р.А., Власов Д.С.</b> Исследование влияния металлических конструкций электрических печей на их электрические параметры .....               | 36 |
| <b>Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П., Игнатенко А.Ю.</b> Метод расчета параметров шихтованных пакетов рудно-термических печей.....  | 41 |
| <b>Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П., Игнатенко А.Ю.</b> Моделирование электромагнитных полей шихтованных пакетов электротехнологических установок.....                   | 45 |
| <b>Нейман Л.А., Нейман В.Ю.</b> Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка .....   | 48 |

## CONTENTS

|  |    |
|--|----|
| <b>Nos O.V., Pankratov V.V.</b> Analysis of Three-Phase System in Quaternion Basis or Ineffective Instantaneous Power Compensation .....   | 3  |
| <b>Shanshurov G.A.</b> Quality Assessment of Ac Motors Windings on Stage of Projecting.....  | 9  |
| <b>Pristup A.G., Toporkov D.M.</b> Investigation of the Cogging Torque Reduction Methods in the Permanent Magnet Synchronous Machines with Fractional Slot Concentrated Windings ..... | 14 |
| <b>Vialtsev G.B., Shevchenko A.F.</b> Numerical Simulation of Circulating Currents in Electric Machines with Permanent Magnet.....   | 18 |
| <b>Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V.</b> Adaptive State Estimator for Sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor.....   | 23 |
| <b>Glazyrin M.V., Diyorov R.H.</b> Dynamic Properties Analysis of Hydroelectric Power Plant with Double Fed Induction Generator .....  | 28 |
| <b>Tyukov V.A.</b> Induction Motor Start Process Influenced by Diverse Parameters .....  | 32 |
| <b>Aliferov A.I., Blank A.V., Bikeev R.A., Vlasov D.S.</b> Research of Influence of Metal Constructions of Electric Furnaces on Their Electrical Parameters .....                      | 36 |
| <b>Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P., Ignatenko A.Y.</b> Calculation Method of Secondary Circuit Parameters of Electrotechnologic Equipment. ....                                | 41 |
| <b>Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P., Ignatenko A.Y.</b> Modeling of Electromagnetic Field of Reassembled Package of Electrotechnological Installations.....                     | 45 |
| <b>Neyman L.A., Neyman V.Yu.</b> Operation Cycle OF Double Winding Synchronous Electromagnetic Machine with Head Free Running Out .....  | 48 |

|   |  |    |    |
|---|--|----|----|
| <b>Зиновьев Г.С., Сидоров А.В., Удовиченко А.В.</b><br>Повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью .....  | <b>Zinoviev G.S., Sidorov A.V., Udovichenko A.V.</b><br>Buck-Boost AC Voltage Regulators with Improved Electromagnetic Compatibility.....  | 53 | 53 |
| <b>Нейман Л.А.</b> Оценка перегрузочной способности ударного электромагнитного привода по средней температуре перегрева в переходных режимах....  | <b>Neyman L.A.</b> Impact Electromagnetic Drive Overload Capability Estimation by Average Overheating Temperature in Transient Modes .....   | 58 | 58 |
| <b>Панова Н.В., Спиридонов Е.А., Андреев А.И.</b><br>Особенности регулирования и реверсирования режима работы крупных высоконагруженных осевых вентиляторов серии ВО .....  | <b>Panova N.V., Spiridonov E.A., Andreev A.I.</b><br>The Regulation and Reverse Features of Operation Modes of Heavy High Loaded Axial-Flow Fans.....  | 62 | 62 |
| <b>Большенко А.В., Павленко А.В., Паненко И.Н.</b><br>Определение технических параметров регулятора тока для микроплазменного оксидирования с учетом характера нагрузки.....  | <b>Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Panenko I.N.</b><br>Definition of the Technical Parameters of the Current Controller for Micro Plasma Oxidation Given the Nature of the Load .....   | 66 | 66 |
| <b>Кузнецов С.М., Демиденко И.С., Сухарева Е.А.</b><br>Исследование переходных процессов в тяговой сети при проезде электроподвижного состава через секционный изолятор и совершенствование методики настройки уставок цифровой защиты..... | <b>Kuznetsov S.M., Demidenko I.S., Sukhareva E.A.</b><br>The Investigation of Traction Network Transients During the Electrically Propelled Vehicles Movement Through the Section Isolator and the Improvement of Methods of Digital Protection Devices Adjusting..... | 70 | 70 |
| <b>Джаборов М.М., Мятаж С.В., Щуров Н.И.</b><br>Совершенствование четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов переменного тока.....   | <b>Jaborov M.M., Myateg S.V., Schurov N.I.</b><br>The Perfecting of the Four-Rectifier with a Staircase Structure for Ac Electric Locomotives.....   | 73 | 73 |

#### Сообщения

|  |   |    |    |
|--|---|----|----|
| <b>Малахов А.П.</b> Обзор электрических сейсмоисточников .....     | <b>Malakhov A.P.</b> Electric Seismic Sources Review .....              | 78 | 78 |
| Содержание журнала «Изв. вузов. Электромеханика» за 2013 год ..... | Contents of Magazine «Izv. vuzov. Electromechanics» for year 2013 ..... |    |    |
| I. Тематический указатель .....                                    | I. Topical list.....  | 80 | 80 |
| II. Именной указатель .....  | II. Name list .....   | 87 | 87 |

#### Reports

|  |   |    |    |
|--|---|----|----|
| <b>Малахов А.П.</b> Обзор электрических сейсмоисточников .....     | <b>Malakhov A.P.</b> Electric Seismic Sources Review .....              | 78 | 78 |
| Содержание журнала «Изв. вузов. Электромеханика» за 2013 год ..... | Contents of Magazine «Izv. vuzov. Electromechanics» for year 2013 ..... |    |    |
| I. Тематический указатель .....                                    | I. Topical list.....  | 80 | 80 |
| II. Именной указатель .....  | II. Name list .....   | 87 | 87 |

Редактор

**Л.И. Павленко**

Корректор

**Д.В. Малыгина**

Компьютерная вёрстка:

**Е.Г. Берестова**

Подписано в печать 19.11.2013 г. Формат 60x84 1/8.  
Бумага офсетная №1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.23. Тираж 300 экз.  
Заказ № 46-1242. Цена свободная

Свидетельство о регистрации № 1080 от 7 декабря 1990 г. Министерства Российской Федерации по делам печати

Адрес редакции и издателя: 346428. Новочеркасск. ул. Просвещения. 132.  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
Телефон (863-5) 25-53-26. E-mail: electromechanika@bk.ru

ИД «Политехник»  
346428. Новочеркасск. ул. Просвещения. 132

УДК 621.314.58

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ

*А.В. Большенко, А.В. Павленко, И.Н. Паненко*

Южно-Российский государственный  
политехнический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова

Platov South-Russian  
State Polytechnic  
University (NPI)

*Рассмотрены вопросы проектирования импульсных регуляторов тока для микроплазменного оксидирования. Выполнен анализ влияния параметров МПО-нагрузки на характер и параметры переходных процессов изменения выходного тока регулятора.*

*Ключевые слова:* микроплазменное оксидирование, силовая электроника, источник питания, регулятор тока, система управления.

*The problems of designing of the current controllers for micro plasma oxidation. The analysis of the influence of parameters MPO-load on the nature and parameters of transient changes in the output voltage of the regulator.*

*Key words:* micro plasma oxidation, power electronics, power supply, current controller, the control system.

**Т**ЕХНОЛОГИЯ поверхностной обработки материалов методом микроплазменного оксидирования является сравнительно новой и перспективной, позволяющей формировать многофункциональные керамикоподобные покрытия, обладающие уникальным комплексом свойств. Сущность метода заключается в высоковольтной поляризации границы раздела металл-оксид-электролит, в результате чего возникают условия возникновения на поверхности обрабатываемого металла микроплазменных разрядов, формирующих оксидную пленку.

Одним из основных факторов, определяющих свойства и параметры микроплазменного покрытия, является электрический режим поляризации, реализацию которого обеспечивает технологический регулятор тока. Функциональные возможности и технические характеристики используемых регуляторов тока определяются требованиями, предъявляемыми к технологическому процессу. В настоящее время в области технологии микроплазменного оксидирования развивается тенденция использования в процессе обработки импульсного режима. Для реализации данного режима технологический регулятор тока

должен обеспечивать на выходе однополярные (биполярные) импульсы напряжения с возможностью регулирования их амплитуды.

При разработке технологического регулятора тока для микроплазменного оксидирования необходимо формирование функциональных возможностей и технических характеристик. К основным функциональным требованиям технологического регулятора тока для микроплазменного оксидирования можно отнести следующие:

- формирование однополярных (биполярных) импульсов напряжения;
- задание периода следования импульсов;
- задание длительности (скважности импульсов);
- регулирование амплитуды импульсов выходного напряжения;
- стабилизация среднего значения выходного тока за период следования импульсов (время действия импульса).

Последнее обусловлено гальваностатическим режимом проведения процесса микроплазменного оксидирования, который является основополагающим.

К основным техническим характеристикам можно отнести следующие:

- диапазон регулирования амплитуды импульсов выходного напряжения;
- диапазон величин заданного среднего значения тока нагрузки;
- диапазон регулирования временных параметров выходных импульсов напряжения.

Диапазон изменения (регулирования) электрических параметров регулятора тока определяется используемой технологией микроплазменного оксидирования. Однако при разработке регулятора тока необходимо учитывать характер и параметры нагрузки. Эквивалентная схема замещения, представленная на рис. 1 [1, 2], позволяет с достаточной степенью точности описать характер нагрузки регулятора тока для микроплазменного оксидирования и произвести анализ переходных процессов.

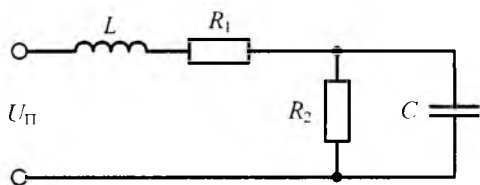


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения МПО-нагрузки

Учет характера нагрузки обусловлен влиянием ее параметров на параметры переходного процесса изменения тока нагрузки. Так как нагрузка имеет активно-емкостный характер, то в начальный момент времени наблюдается всплеск тока, обусловленный емкостной составляющей тока. Помимо нелинейности нагрузки ее параметры меняются во времени процесса микроплазменного оксидирования.

Для оценки влияния электрических параметров МПО-нагрузки и параметров воздействующих импульсов напряжения использованы результаты исследований [3, 4], в которых представлены зависимости изменения параметров эквивалентной схемы замещения (сопротивления  $R_2$  и емкости  $C$ ) микроплазменной системы от времени процесса МПО.

Одним из основных параметров при выборе элементной базы силовых полупроводниковых приборов является скорость открывания ключа, которая в итоге определяет скорость нарастания напряжения на нагрузке. Следует учитывать, что параметры МПО-нагрузки однозначно связаны с амплитудой тока нагрузки. Таким образом, выбор силовых приборов по критерию амплитудного значения тока производится после определения фронта нарастания напряжения на МПО-нагрузке.

На рис. 2 представлены графики изменения амплитуды тока во времени процесса микро-

плазменного оксидирования при среднем значении тока нагрузки 50 А. На рис. 3 – переходные процессы изменения тока нагрузки при различных значениях времени фронта нарастания импульса выходного напряжения, отражающие качественное изменение их характера.

Из графиков на рис. 2, 3 можно сделать вывод о существенном влиянии длительности фронта нарастания поляризирующего импульса напряжения нагрузки на величину амплитуды выходного тока. Например, при использовании в качестве полупроводниковых ключей низкочастотных тиристоров, которые, как правило, имеют время отпирания 5 – 20 мкс, или IGBT (MOSFET) транзисторов, с временем отпирания 0,1 – 0,5 мкс, требования к силовым полупроводниковым приборам по критерию максимального тока могут отличаться в два раза.

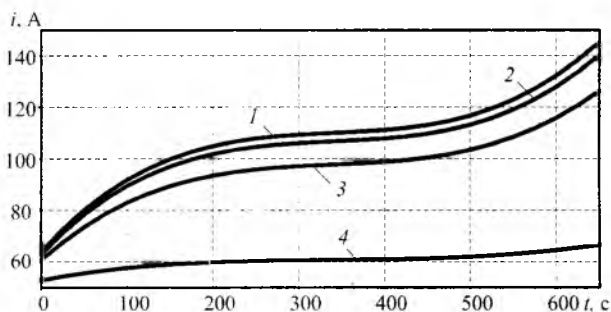


Рис. 2. Амплитудное значение тока нагрузки во времени процесса микроплазменного оксидирования для одного из составов электродлита при различных значениях времени фронта нарастания поляризирующего импульса напряжения: 1 – 0,2 мкс; 2 – 2,5 мкс; 3 – 10 мкс; 4 – 20 мкс

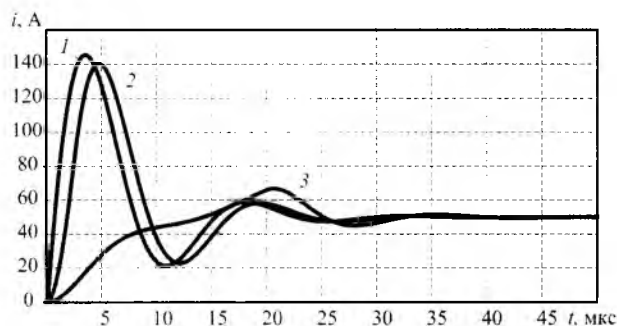


Рис. 3. Переходный процесс изменения тока нагрузки при различных значениях времени фронта нарастания поляризирующего импульса напряжения: 1 – 0,2 мкс; 2 – 2,5 мкс; 3 – 20 мкс

Неотъемлемым элементом нагрузки является индуктивность подводящих к гальванической ванне проводов и монтажа (см. рис. 1). Этот параметр технологической установки для микроплазменного оксидирования также оказывает влияние на амплитуду тока нагрузки. На рис. 4 представлены зависимости изменения амплитуды выходного тока во времени процесса микроплазменного оксидирования.

Из рис. 4 видно, что с увеличением индуктивности с 1 до 20 мкГн максимальная величина

амплитуды тока во время процесса МПО падает в три раза. Таким образом, наиболее жесткие условия работы полупроводниковых приборов наблюдаются при минимальной величине индуктивности. В связи с этим при проектировании расчет параметров регулятора тока необходимо производить при минимально возможной величине индуктивности монтажа.

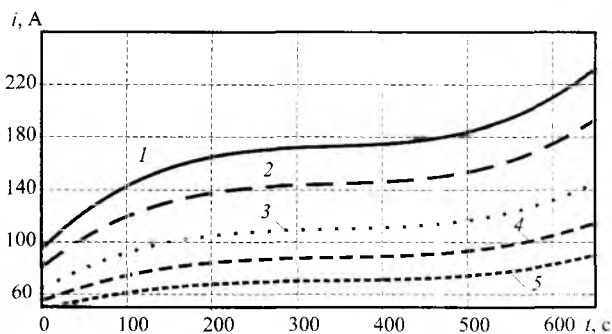


Рис. 4. Графики зависимости амплитуды выходного тока от времени процесса МПО при различных величинах индуктивности  $L$  подводящих проводов и монтажа: 1 – 1 мкГн; 2 – 2 мкГн; 3 – 5 мкГн; 4 – 10 мкГн; 5 – 20 мкГн

На рис. 5 представлена графическая оценка качественного изменения характера переходного процесса тока при изменении индуктивности МПО-нагрузки.

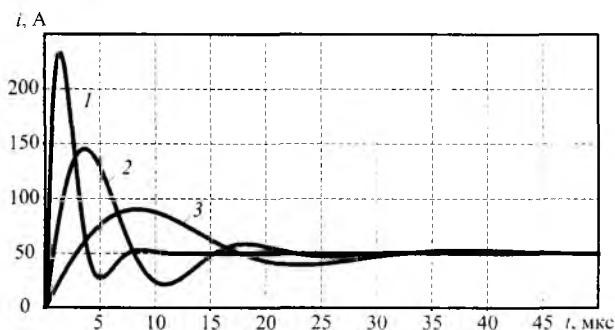


Рис. 5. Переходной процесс изменения тока нагрузки при различных значениях индуктивности  $L$  подводящих проводов и монтажа: 1 – 1 мкГн; 2 – 5 мкГн; 3 – 20 мкГн

Как правило, параметры микроплазменной системы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $C$  (см. рис. 1) подвергаются изменению пропорционально площади обрабатываемой детали. Однако индуктивность, входящая в эквивалентную схему замещения, остается постоянной. На рис. 6 представлены графики переходных процессов поляризации МПО-нагрузки при различных величинах площади обрабатываемой детали.

С увеличением площади обрабатываемой детали уменьшается разность (отношение) между амплитудным и установившимся значениями тока при идентичных технологических параметрах процесса микроплазменного оксидирования.

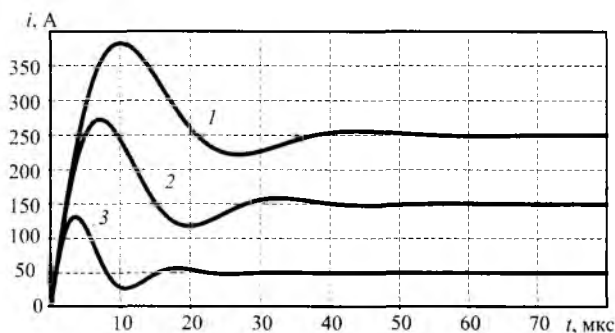


Рис. 6. Переходной процесс изменения тока нагрузки при различных величинах площади  $S$  обрабатываемой детали: 1 – 5 дм<sup>2</sup>; 2 – 3 дм<sup>2</sup>; 3 – 1 дм<sup>2</sup>

Расчеты переходных процессов изменения тока нагрузки производились с использованием аналитических соотношений, полученных в [1].

Проведенный анализ влияния характера нагрузки на параметры переходного процесса изменения тока нагрузки и, тем самым, на технические характеристики регулятора тока показал, что учет характера и параметров нагрузки является обязательным условием при разработке регулятора тока для микроплазменного оксидирования.

Для определения максимального амплитудного значения тока нагрузки предложен следующий алгоритм, основанный на поиске экстремума функции трех переменных методом направленного перебора:

$$i_{\max} = \max \left[ f \left( \frac{\rho_{\text{эmin}}}{S_{\max}}, \frac{f_R(N_3, t)}{S_{\max}}, L_{\min}, S_{\max}, f_C(N_3, t), t_{1\min}, t \right) \right],$$

где  $\rho_{\text{эmin}}$  – минимальное удельное сопротивление электролита;  $S_{\max}$  – максимальная площадь обрабатываемой поверхности;  $N_3$  – порядковый номер состава электролита;  $t$  – момент времени процесса;  $L_{\min}$  – минимальная величина индуктивности;  $t_{1\min}$  – минимальная длительность фронта нарастания напряжения;  $f_R(N_3, t)$  и  $f_C(N_3, t)$  – удельные сопротивление и емкость, представленные в виде полиномиальных функций для отдельных электролитов.

С учетом вышеизложенного, произведен расчет технических характеристик регулятора тока устройства для МПО с исходными данными, представленными в табл. 1. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 1

## Исходные данные для расчета технических характеристик регулятора тока

| Параметры   | Значения |
|---|----------|
| Максимальная плотность тока $j_{\max}$ , А/дм <sup>2</sup>                                | 20       |
| Минимальная длительность импульса поляризирующего напряжения $t_{2\min}$ , мкс            | 10       |
| Максимальная длительность импульса поляризирующего напряжения $t_{2\max}$ , мс            | 10       |
| Минимальная длительность нарастания импульса поляризирующего напряжения $t_{1\min}$ , мкс | 0,2      |
| Диапазон регулирования величины выходного напряжения $U$ , В                              | 20 – 800 |

Таблица 2

## Результат расчета технических характеристик регулятора тока

| Параметры   | Значения |
|---|----------|
| Максимальный средний ток нагрузки $i_{\text{ср.макс}}$ , А            | 200      |
| Максимальное амплитудное значение тока нагрузки $i_{\text{макс}}$ , А | 1330     |
| Диапазон регулирования величины выходного напряжения $U$ , В          | 20 – 800 |

*Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики № СП-6459.2013.1 на тему «Источники питания установок для микроплазменного оксидирования, обеспечивающих получение функциональных композиционных покрытий нового поколения, позволяющих повысить энергоэффективность и энергосбережение устройств преобразования различных видов энергии».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Большенко А.В. Определение параметров процесса микроплазменного оксидирования в системе с регулятором тока // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2012. № 3. С. 32 – 36.
2. Борилов В.Н. Методы и средства измерений электрических параметров процесса формирования покрытий при импульсном энергетическом воздействии в растворах: дис.... д-ра техн. наук. Томск. 2012. 302 с.
3. Мамаев А.И. Физико-химические закономерности сильнотоковых импульсных процессов в растворах при нанесении оксидных покрытий и модифицировании поверхности: дис. ... д-ра техн. наук. Томск. 1998. 363 с.
4. Бутягин П.И. Закономерности образования композиционных оксидных покрытий в растворах при прохождении токов большой плотности: дис. ... канд. хим. наук. Томск. 1999. 177 с.

Поступила в редакцию

5 сентября 2013 г.

**Большенко Андрей Викторович** – младший научный сотрудник НИИ «Электромеханика» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Тел. (86352) 55-1-13. E-mail: bolwoi@rambler.ru

**Павленко Александр Валентинович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика и электрические аппараты» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Тел. (86352) 55-1-13. E-mail: m6lde@mail.ru

**Паненко Илья Николаевич** – аспирант Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Тел. (86352) 5-53-28. E-mail: ilyapanenko@mail.ru