ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.

ENERGY AND RESOURSES SAVING XXI CENTURY

Oryol, 14th – 16th November 2022

Орёл 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПРАВИТЕЛЬСТВО ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АДМИНИСТРАЦИЯ г. ОРЛА
ЦЕНТР ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НАУКИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
НАН РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ООО «ОРЛОВСКИЙ ЭНЕРГОСБЫТ»
ФИЛИАЛ ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР» – «ОРЁЛЭНЕРГО»
ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени И.С. ТУРГЕНЕВА
КАФЕДРА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

Материалы
XX международной
научно-практической конференции
г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.

под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова,
д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова

Орёл
ОГУ имени И.С. Тургенева
2022

УДК 620.92 (063)
ББК 31.15Я 431
Э65

Редакционная коллегия:
А.Н. Качанов – д-р техн. наук, проф. (предс.);
Ю.С. Степанов – д-р техн. наук, проф. (зам. предс.)
А.Б. Кувалдин – д-р техн. наук, проф. (член редкол.);
О.К. Никольский – д-р техн. наук, проф. (член редкол.);
Р.Н. Поляков – д-р техн. наук, доц. (член редкол.);
В.А. Чернышов – канд. техн. наук (отв. секр.)

Э65 Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : материалы XX международной научно-практической конференции (г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федереции, ОГУ имени И.С. Тургенева ; редкол. : А.Н. Качанов [и др.]. – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022. – 162 с. : ил. – ISBN 978-5-9929-1223-4. – Текст : непосредственный.

В материалы XX международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» включены труды ученых и специалистов России, стран ближнего и дальнего зарубежья. Материалы, представленные участниками, с учётом выбранного ими научного направления были размещены на сайте конференции http://myconfs.ru/energosber2022, которая проводилась в очном и дистанционном формате на базе кафедры электрооборудования и энергосбережения ОГУ имени И.С. Тургенева в период с 14 – 16 ноября 2022 года.

Работа конференции была организована по следующим секциям:

1. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении и металлургии.
2. Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их развития.
3. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.
4. Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении.

Материалы конференции предназначены учёным и специалистам, занимающимся исследованиями *в области техничесих наук по энергетике и электротехнике*. Могут быть полезны студентам, соискателям ученых степеней и инженерно-техническим работникам, занимающимся теоретическими и практическими исследованиями в вопросах энерго- и ресурсосбережения и активно внедряющим цифровые технологии в различные отрасли экономики.

УДК 620.92 (063)
ББК 31.15Я 431

ISBN 978-5-9929-1223-4
© Оформление. ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

1. Федотов Александр Анатольевич – канд. экон. наук, доцент, PhD, председатель организационного комитета, ректор ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», почетный работник сферы образования Российской Федерации.
2. Вакулко Анатолий Георгиевич – академик РИА, лауреат Государственной премии Российской Федерации, вице-президент Федеральной палаты энергоэффективности и энергобезопасности.
3. Голенков Вячеслав Александрович – д-р. техн. наук, профессор, лауреат Государственных премий Российской Федерации, руководитель научной школы ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
4. Бутырин Павел Анфимович – член-корреспондент РАН, академик АЭН Российской Федерации, президент АЭН Российской Федерации, лауреат премии имени П. Н. Яблочкова.
5. Качанов Александр Николаевич - заместитель председателя комитета, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, академик АЭН Российской Федерации, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
6. Кувалдин Александр Борисович – Заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик АЭН Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
7. Мешков Борис Николаевич – генеральный директор ООО «ЭнерГарант», г. Орёл.
8. Никольский Олег Константинович – Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электрификация производства и быта» ФГБОУ ВО «АлтГТУ имени И.И. Ползунова», г. Барнаул.
9. Подмастерьев Константин Валентинович –Заслуженный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, директор Института приборостроения, автоматизации и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
10. Рыжкова Елена Николаевна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
11. Семенов Александр Юрьевич – генеральный директор АО «Протон -Электротекс», г. Орёл.
12. Юрьев Юрий Николаевич – генеральный директор ПАО «ИНТЕР-РАО – Орловский энергосбыт», депутат Орловского областного Совета народных депутатов.
13. Чернышов Вадим Алексеевич – технический секретарь комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

1. Пилипенко Ольга Васильевна – председатель комитета, д-р. техн. наук, профессор, депутат Государственной думы Федерального собрания Российской Федерации VIII созыва.
2. Ахмедов Хаким Мунавварович – д-р. техн. наук, профессор, академик НАН республики Таджикистана.
3. Демидович Виктор Болеславович – д-р. техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники ФГБОУ ВО «ЛЭТИ имени В.И. Ульянова», академик–секретарь научно-отраслевого отделения № 6 АЭН Российской Федерации.
4. Захидов Ромэн Абуллаевич – академик АН Республики Узбекистан, д-р. техн. наук, профессор. Институт энергетики и автоматики АН РУз.
5. Любимов Виктор Васильевич – Заслуженный деятель науки Российской Федереции, д-р. техн. наук, профессор, член-корр. РАТН, заведующий кафедрой «Физико-химические процессы и технологии» ФГБОУ ВО ТулГТУ.
6. Петров Георгий Николаевич – д-р. техн. наук, Заслуженный деятель науки Таджикистана, академик международной Энергетической Академии, ведущий специалист Центра инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана.
7. Степанов Юрий Сергеевич – заместитель председателя программного комитета, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, лауреат премий Президента и Правительства Российской Федереции, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
8. Хейфиц Михаил Львович - д-р. техн. наук, профессор, заместитель академика – секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Белоруссии.
9. Li Qingling (Китай) - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering.
10. Коренков Дмитрий Андреевич – технический секретарь программного комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

1. Радченко Сергей Юрьевич – председатель комитета, д-р. техн. наук, профессор, почетный работник ВПО Российской Федереции, проректор по научно-технологической деятельности и аттестации научных кадров ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

2. Александрова Анжелика Паруйровна – канд. филол. наук, доцент, начальник отдела бюро переводов ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».

3. Воробьев Сергей Александрович начальник отдела организационного сопровождения НИР, доцент кафедры городского хозяйства и строительства автомобильных дорог, кандидат сельскохозяйственных наук.

4. Дудина Елена Федоровна – заместитель председателя программного комитета, канд. филол. наук, начальник отдела организации научных мероприятий и академического развития ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

5. Лунев Роман Алексеевич – секретарь технического комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий.

НАУЧНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении и металлургии.
2. Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их развития.
3. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.
4. Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении.

ORGANIZING COMMITTEE

1. Fedotov Alexander Anatolievich - Chairman of the Organizing Committee, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, PhD, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Orel State University named after I.S. Turgenev, Honorary Worker of Education of the Russian Federation.

2. Vakulko Anatoly Georgievich - Academician of the RAE, State Prize Laureate, Vice-president of the Federal Chamber for Energy Efficiency and Energy Security.

3. Golenkov Vyacheslav Alexandrovich - Doctor of Engineering Sciences, Professor, State Prize Laureate in Science and Engineering of the RF, Head of the Research School at the Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

4. Butyrin Pavel Anfimovich - Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, President of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, laureate of the P.N. Yablochkov Prize.

5. Kachanov Alexander Nikolayevich - Vice-Chairman of the Organizing Committee, Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, Head of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S.Turgenev, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation.

6. Kuvaldin Alexander Borisovich - Honored Master of Sciences of Russia, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies, National Research University “MEI” (Moscow Power Institute).

7. Meshkov Boris Nikolaevich - General Director of LLC «Energarant», Orel.

8. Nikolski Oleg Konstantinovich – Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor of the Department of Factory and Household Elictrification, Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov, Barnaul.

9. Podmasterev Konstantin Valentinovich - Served employee of higher professional education of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Instrument Engineering, Automation and Information Technologies, Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

10. Ryzhkova Elena Nikolajevna - Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Energy supply of Industrial Enterprises, National Research University “MEI” (Moscow Power Institute)

11. Yuriev Yuriy Nikolaevich - General Director of the PAO “INTER-RAO – Orlovsky energosbyt” (JSC “INTER-RAO Oryol Energy Sales”, Deputy of the Orel Regional Council of People's Deputies.

12. Semenov Alexander Yuryevich - General Director of JSC «Proton-Electrotex», Orel.

13. Chernyshov Vadim Alekseevich - Technical Secretary of the Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

PROGRAM COMMITTEE

1. Pilipenko Olga Vasilievna - Chairman of the Organizing Committee, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy of the seventh convocation of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation

2. Akhmedov Hakim Munavvarovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan.

3. Demidovich Victor Boleslavovich - Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor of the Department of Electrotechnology and Converting Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

“LETI n.a. V.I. Uljanov”, Secretary of the Scientific Branch Department Nr.6 of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF.

4. Zakhidov Romen Abullaevich - Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor, Institute of Energy and Automation, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

5. Ljubimov Victor Vasilievich - Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of the RATS, Head of the Department of Electrical and Nanotechnologies, Tula State Technical University, Tula.

6. Petrov Georgy Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Honored Scientist of Tajikistan, academician of the International Energy Academy, leading specialist of the Center for Innovative Development of Science and New Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

7. Stepanov Yury Sergeevich - Deputy-Chairman of the Program Committee, Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, State Prize Laureate, Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

8. Kheyphits Mikhail Lvovich - Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Secretary of the Scientific Branch Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus.

9. Li Qingling - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering (China).

10. Korenkov Dmitriy Andreevich - Technical Secretary of the Program Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

TECHNICAL COMMITTEE

1. Radchenko Sergey Yurjevitch - Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor, Vice-rector for Scientific and Technological Activity and Certification of Scientific Personnel, Orel State University n.a. I.S.Turgenjev, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation.

2. Alexandrova Anzhelika Paruirovna - Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Head of the Translation Agency Department, Orel State University n.a. I.S.Turgenjev.

3. Vorobyev Sergey Aleksandrovich - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Economy and Road Construction, Head of the Department of Organizational Support of Research work.

4. Dudina Elena Fedorovna - Candidate of Philological Sciences, Head of the Department of Organization of Scientific Events and Academic Development, Orel State University n.a. I.S.Turgenjev.

5. Lunev Roman Alekseevich - Secretary of the Technical Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, Orel State University n.a. I.S.Turgenev.

SCIENTIFIC AND ENGINEERING DIRECTIONS

1. Energy-saving electrical processes and installations in mechanical engineering and metallurgy.
2. Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development.
3. Energy and resource saving in the agro-industrial complex.
4. Intelligent technologies in power engineering.

<u>СЕКЦИЯ 1.</u> ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ

Руководитель:
Кувалдин Александр Борисович, академик АЭН Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии», НИУ «МЭИ», г. Москва

УДК 621.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Птицына Е.В., Птицын Д.В.
Россия, г. Омск, Омский государственный технический университет
Кувалдин А.Б.
Россия, г. Москва, НИУ-Московский энергетический институт

Аннотация. Применение тока сложной формы (ТСФ) для совершенствование электрического режима излучательных электротехнологических установок (ИЭТУ) позволяет повысить их энергоэффективность не оказывая негативного влияния на питающею сеть. В статье исследована работа светлых зеркальных инфракрасных излучателей при питании ТСФ. Полученные результаты говорят о целесообразности применения ТСФ для питания ИЭТУ.

Ключевые слова: излучательная электротехнологическая установка, инфракрасный излучатель, ток сложной формы, повышение энергоэффективности.

Излучательная электротехнологическая установка (ИЭТУ) преобразует электрическую энергию в энергию электромагнитного излучения и передает ее обрабатываемому изделию при помощи излучения. Такие установки применяются для термообработки пищевой продукции, сварных швов, пайки, обогрева и сушки [1-4]. Мощность таких установок может достигать 1000 Вт. На пример, установка для ИК сушки тепловозов компании ПИКСАН имеет мощность 765 кВт.

В ИЭТУ используются твердотельные и газовые излучатели. Среди твердотельных излучателей выделяют керамические и металлические излучатели. Последние разделяют на темные и светлые в зависимости от температуры нагрева излучаемого тела [5-6]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетический характеристик светлых инфракрасных излучателей: белый излучатель – ИКЗ 250 Вт и красный излучатель – ИКЗК 250 Вт (рис.1).

а) б)

Рисунок 1 – Типы светлых ИК излучателей, используемых в экспериментах:
а) ИКЗ; б) ИКЗК

Авторами проводятся исследования по изучению энергетических характеристик излучательных электротехнологических установок (ИЭТУ) при питании их ТСФ [7].

Ток сложной формы (ТСФ) – это ток, который содержит в своем составе гармоники с частотой 10^2 – 10^3 Гц. Доказано, что применение ТСФ в различных электротехнологических установках позволяет получить положительные технологические и энергетические эффекты.

© Птицына Е.В., Птицын Д.В. Кувалдин А.Б., 2022

Для проведения исследований разработана экспериментальная установка небольшой мощности, включающая в себя излучатель, трансформатор и дроссель насыщения. Функциональная схема установки приведена на рис. 2.

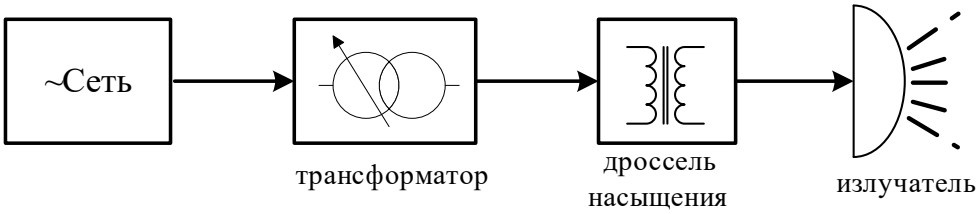


Рисунок 2 – Функциональная схема для исследования характеристик излучателей

Исследования энергетических характеристик проводились в двух режимах при одинаковой потребляемой активной мощности ***P*** из сети (табл. 1): с питанием синусоидальным током 50 Гц и с питанием ТСФ. Потребляемая мощность ИЭТУ с белым излучателем в обоих режимах составляла 96 Вт, для ИЭТУ с красным излучателем – 100 Вт.

Таблица 1 – Электрические характеристики ИЭТУ в рассматриваемых режимах

Наименование электрического режима	**Мощность из сети**			***cosφ***
	***P*, Вт**	***Q*, вар**	***S*, ВА**	
Красный излучатель ИКЗК				
Ток 50 Гц	100	110	145	0,68
ТСФ	100	14	101	0,99
Белый излучатель ИКЗ				
Ток 50 Гц	96	102	140	0,68
ТСФ	96	14	97	0,99

В режиме с переменным током питание излучателя осуществлялось от сети 220 В через однофазный трансформатор 220/110 В с переключением ступеней напряжения. В режиме с ТСФ дополнительно использовался дроссель насыщения, который позволяет изменять спектр тока с содержанием четных и нечетных гармоник с частотами 10^2 - 10^3 Гц.

Для измерения электрических характеристик использовался анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060. В качестве основной энергетической характеристики излучателя рассматривалась мощность потока излучения, которая определялась расчетным путем через плотность потока излучения. Для определения плотности потока излучения ***p*** использовали оптоволоконный спектрометр AvaSpec-ULS 2048-USB2. Для этого на расстоянии 240 мм от центра излучателя устанавливалась облучаемая поверхность с закрепленным спектрорадиометрическим датчиком, который перемещался по горизонтальной оси.

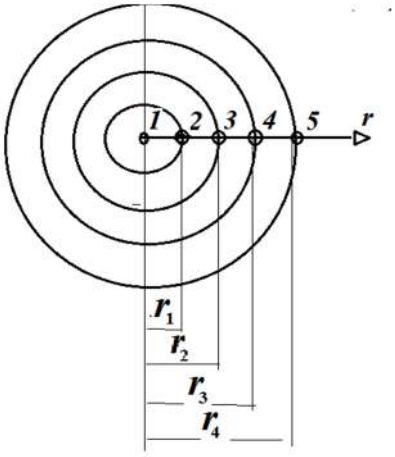


Рисунок 3 – Расположение точек измерения на облучаемой поверхности

На облучаемой поверхности зрительно были выделены кольца одинаковой освещенности и отмечены точки внутреннего и внешнего радиуса для измерения плотности потока излучения. Эскиз облучаемой поверхности приведен на рис. 3. Результаты измерений

приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Плотность потока излучения p на расстоянии h=240 мм от излучателя в функции координаты r

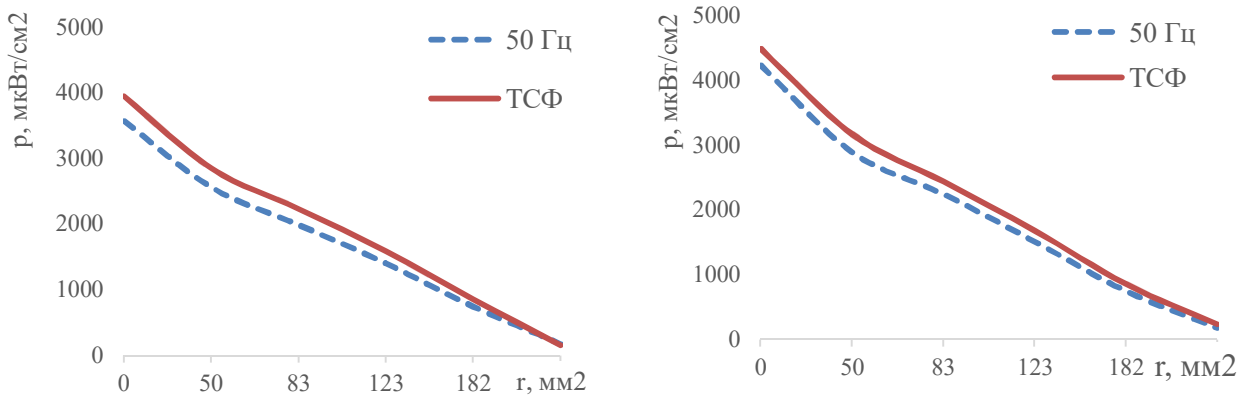
***p*, мкВт/см²**	**Координата *r, мм***					
	0	**50**	**83**	**123**	**182**	**325**
Красный излучатель ИКЗК						
Ток 50 Гц	3036	3371	2341	930	506	278
ТСФ	3273	3860	2687	1008	538	293
Белый излучатель ИКЗ						
Ток 50 Гц	3950	3030	3300	1075	588	305
ТСФ	4191	3211	3443	1118	610	327

После обработки результатов экспериментов были получены уравнения полинома 2-ой степени распределения плотности потока излучения от r для двух исследуемых режимов. Для красного излучателя:

$$\begin{aligned} &50\ \text{Гц}: p(r) = 0,0356r^2 - 22,02r + 3576 \\ &\text{ТСФ}: p(r) = 0,0373r^2 - 23,795r + 3953 \end{aligned} \quad (1)$$

Для белого излучателя:

$$\begin{aligned} &50\ \text{Гц}: p(r) = 0,0444r^2 - 26,838r + 4246 \\ &\text{ТСФ}: p(r) = 0,0483r^2 - 28,81r + 4501 \end{aligned} \quad (2)$$



а) б)

Рисунок 4 – Распределения плотности потока излучения по облучаемой поверхности: *а) красный излучатель; б) белый излучатель*

На основе полученных данных плотности потока излучения была рассчитана мощность потока излучения для рассматриваемых типов излучателей в рассматриваемых режимах. Мощность излучения была рассчитана двумя способами:

1. Как сумма мощностей отдельных участков (колец) P = Σ Pi. Расчет выполнен по усредненным показателям ***p*** – среднее значение внутреннего и внешнего радиусов кольца.

2. При аппроксимации графика распределения ***p*** от радиуса ***r*** и интегрировании полученной зависимости:

$$P = \int_0^R p(r) 2\pi r dr \quad (3)$$

В табл. 3 - табл. 4 представлены результаты расчёта мощности излучения как суммы мощностей отдельных участков. Расхождения результатов расчетов двумя способами не превысил 5 %.

Таблица 3 – Эффективность преобразования излучения Р, Вт от красного излучателя при питании током 50 Гц и ТСФ

Радиус, см	**Р, Вт**	
	Ток 50 Гц	ТСФ
0 - 5	0,25	0,28
5 - 8,3	0,394	0,451
8,3 – 12,3	0,423	0,478
12,3 – 18,2	0,406	0,437
18,2 – 32,5	0,892	0,946
Сумма	**2,37**	**2,59**

Таблица 4 – Эффективность преобразования излучения Р, Вт от белого излучателя при питании током 50 Гц и ТСФ

Радиус, см	**Р, Вт**	
	Ток 50 Гц	ТСФ
0 - 5	0,27	0,29
5 - 8,3	0,44	0,46
8,3 – 12,3	0,57	0,59
12,3 – 18,2	0,47	0,49
18,2 – 32,5	1,016	1,067
Сумма	**2,76**	**2,89**

Плотность потока излучения в режиме с ТСФ увеличивалась для всех координат (табл. 2). По результатам обработки данных экспериментов получены уравнения ***p(r)*** и построены соответствующие графики изменения плотности потока излучения от координаты ***r*** (рис. 4). Эффективность преобразования излучения для красного излучателя при питании током 50 Гц и ТСФ составила 2,37 и 2,59 Вт (табл. 3). Эффективность преобразования излучения для белого излучателя при питании током 50 Гц и ТСФ составила 2,76 и 2,89 Вт (табл. 4).

Выводы

Анализ полученных результатов показал, что при потреблении ИЭТУ одинаковой ***P*** из сети, режим с питанием ТСФ обеспечивает большую мощность потока излучения. Для белого излучателя мощность излучения возросла на 9%, для красного на 4%. Также в режиме с ТСФ коэффициент мощности в сети увеличился с 0,68 до 0,99.

Список источников

1. Гинзбург А.С., Ляховицкий Б.М. Генераторы. Инфракрасного излучения для пищевой промышленности. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. – 71 с.

2. Мешков Д.В. Применение инфракрасных излучателей для отопления помещений. Промышленная энергетика. – 2004. № 11. – С. 38 - 40.

3. Клименко А.В., Зорин В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник. 3-е изд. – М., МЭИ, 2004. – 632 с. (3.4.2. Характеристики инфракрасных излучателей и нагреваемых материалов. – С. 159 – 161)

4. Левитин И.Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 264 с.

5. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева / Под ред. И.Б. Левитина. – Москва – Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.

6. Электротермическое оборудование: Справочник / Под общ. Ред. Альтгаузена. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1980. – 460 с. (Инфракрасный нагрев. С. 204 – 208)

7. Птицына, Е.В. Режимы работы белых и красных зеркальных инфракрасных излучателей при питании током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Промышленная энергетика. 2021. №4. – С. 39 – 45.

Птицына Елена Витальевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ). SPIN-код: 4415-9705, AuthorID (РИНЦ): 416340.
E-mail: evptitsyna@yandex.ru Тел.65-36-35
Птицын Дмитрий Вячеславович, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ.
Кувалдин Александр Борисович, академик АЭН Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
E-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

UDC 621.3

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE RADIANT FLUX OF MIRROR INFRARED EMITTERS POWERED BY COMPLEX WAVEFORM CURRENT

Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V.
Russia, Omsk, Omsk State Technical University
Kuvaldin A.B.
Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute

Summary. The use of a complex-shaped current (SF) to improve the electrical mode of radiative electrotechnological installations (IETU) allows to increase their energy efficiency without adversely affecting the supply network. The article investigates the operation of light mirror infrared emitters when powered by TSF. The results obtained indicate the expediency of using TSV for nutrition and ETU.

Keywords: radiative electrotechnological installation, light mirror infrared emitter, complex-shaped current, energy-efficient mode.

References

1. Ginzburg A.S., Lyakhovitsky B.M. Generators. Infrared radiation for the food industry. – M.: Tsniiteilegpishmash, 1971. – 71 p.

2. Meshkov D.V. Application of infrared emitters for room heating. Industrial energy. - 2004. No. 11. – p. 38 - 40.

3. Klimenko A.V., Zorin V.M. Industrial heat power engineering and heat engineering: Handbook. 3rd ed. – M., MEI, 2004. - 632 p. (3.4.2. Characteristics of infrared emitters and heated materials. – pp. 159 – 161)

4. Levitin I.B. Application of infrared technology in the national economy. – L.: Energoizdat, 1981. – 264 p.

5. Borchert R., Yubits V. Infrared heating technique / Edited by I.B. Levitin. – Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. – 278 p.

6. Electrothermal equipment: Reference / Under the general Ed. Altshausen. – 2nd ed. – Moscow: Energiya, 1980. - 460 p. (Infrared heating. pp. 204 – 208)

7. Ptitsyna, E.V. Modes of operation of white and red mirror infrared emitters when powered by a complex-shaped current / E.V. Ptitsyna, D.V. Ptitsyn, A.B. Kuvaldin // Industrial power engineering. 2021. No. 4. - pp. 39-45.

Ptitsyna Elena Vitalevna, doctor of technical sciences, professor of Theoretical and general electrical engineering Department of OmGTU. SPIN-код: 4415-9705, AuthorID (RINC): 416340.
E-mail: evptitsyna@yandex.ru Phone: 65-36-35
Ptitsyn Dmitry Vyacheslavovich, assistant of Theoretical and general electrical engineering Department of OmGTU.
Kuvaldin Alexander Borisovich, AEN Academician of the Russian Federation, doctor of technical sciences, professor of AETUS Department of NRU "MEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14.
E-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

УДК 621.45.038.72

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ ПО ВАННЕ И СТЕНАМ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М.
Россия, г. Тверь, Тверской государственный технический университет

Аннотация. Произведен расчет теплообмена в высокомощной дуговой сталеплавильной печи. Результаты расчета показали, что с ростом высоты слоя шлака тепловые потоки излучения дуг на стены уменьшаются, а на поверхность ванны увеличиваются. При полном заглублении дуг в ванну и шлак плотность потоков теплового излучения дуг снижается в 3 раза по всей высоте стен по сравнению с незначительным заглублением дуг. Тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен в поглощательной атмосфере печи снижаются в 4 раза по сравнению с прозрачной атмосферой печи.

Ключевые слова: печь, теплообмен, электрическая дуга, тепловые потоки,излучение, коэффициент полезного действия.

Методика расчета тепловых потоков излучения дуг по ванне и шаровому сегменту, образуемому электродинамическим воздействием дуг на ванну и шлак, и результаты расчета КПД дуг подробно изложены в работах [1,2].Установлено, что потоки теплового излучения дуг на расчетные участки, расположенные на ванне напротив и между дугами, в зависимости от расстояния от дуг до участков, отличаются в десятки раз. Полученные результаты расчетов объясняют ускоренное расплавление шихты напротив дуг и задержку расплавления шихты, расположенной между дугами. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак превосходящая часть теплового излучения дуг попадает на поверхность шарового сегмента в ванне и шлаке. Необходимо рассчитать плотность распределения потоков тепловых излучений коротких дуг по ванне и провести анализ взаимосвязи длины дуг, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах высокой мощности.

По методике расчета тепловых потоков излучения дуг по ванне и шаровому сегменту определили плотности потоков тепловых излучений коротких дуг, падающих на поверхность ванны высокомощной печи. В расчетах принимали длину дуг 256 мм, высоту слоя шлака 143 и 256 мм, воспользовавшись известными параметрами дуг и печей ДСП–100 [1].

При полном погружении дуг в ванну и шлак дуги на поверхность ванны практически не излучают, а излучают тепло на поверхность шаровых сегментов в ванне металла и шлаке. Тепло из шаровых сегментов ванне металла и шлаку передается теплопроводностью и интенсивным конвективным теплообменом. На дуги действуют аксиальные и радиальные электромагнитные силы, аксиальные силы вызывают электромагнитное давление дуг на ванну металла и шлак, создавая в них заглубления в виде шаровых сегментов. Радиальные

© Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М., 2022

электромагнитные силы вызывают радиальные перемещения электрических дуг от оси электродов к поверхности ванны со скоростью 50м/сек и частотой 50 Гц, то есть 50 раз в секунду. В процессе перемещения дуги захватывают жидкий металл и шлак из шаровых сегментов и далеко выбрасывают их на поверхность шлака. Движение жидкого металла и шлака носит бурный турбулентный характер, что обеспечивает преобразование теплового потока излучения дуг в мощный конвективный тепловой поток в ванне металла и шлака. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака поступают в шаровой сегмент и процесс электромагнитного выбрасывания, перемешивания металла, шлака повторяется, конвективный теплообмен металла, шлака интенсифицируется, КПД дуг возрастает.

Для анализа взаимосвязи теплообмена, высоты слоя шлака, длины дуг, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии было рассчитано распределение потоков тепловых излучений дуг, длиной 425 мм, по высоте стен при различном заглублении дуг. Результаты экспериментальных исследований тепловых нагрузок на своды печей ДСП–100 приведены в [3]. В работе [2] приведены результаты исследования влияния высоты слоя шлака на КПД дуг, а также влияния высоты слоя шлака на распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности стен дуговых сталеплавильных печей. Так как результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг, длиной 425 мм, по поверхности стен печи ДСП–100 при полном погружении дуг в ванну металла и шлак $h_з$=425 мм отсутствуют, произведем данные расчеты.

На рис. 1 изображены схемы для расчета, где 1-5 расчетные площадки на поверхности стен, расположенные напротив дуг, на которые расчитаем плотности потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи ДСП–100; N_1, N_2 – перпендикуляры, соответственно к оси дуги и расчетной площадке; $\ell_Д$, $\ell_{ОТК}$ – длина, соответственно, дуги и открытой части дуги, м; α, β – углы между лучем r, являющимся кратчайшим расстоянием от расчетной площадки до середины открытой части дуги, и, соответственно, N_2 и N_1, град.; O_1O_2, O_3O_4 – оси соответственно, электрода и печи.

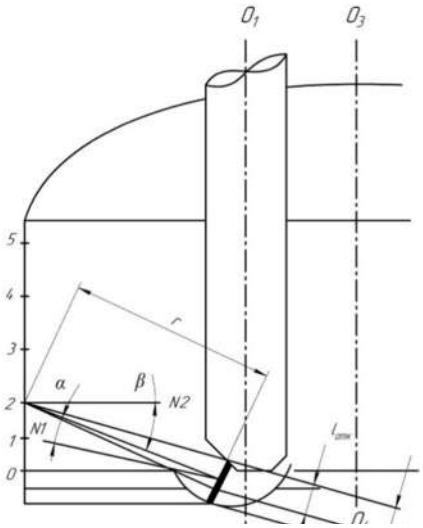


Рисунок 1 - Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены дуговой сталеплавильной печи

Плотность потока теплового излучения каждой из трех дуг, падающего на расчетную площадку на поверхности стен печи ДСП–100 вычислили по первому закону теплового излучения газовых объемов дуг [1,2]:

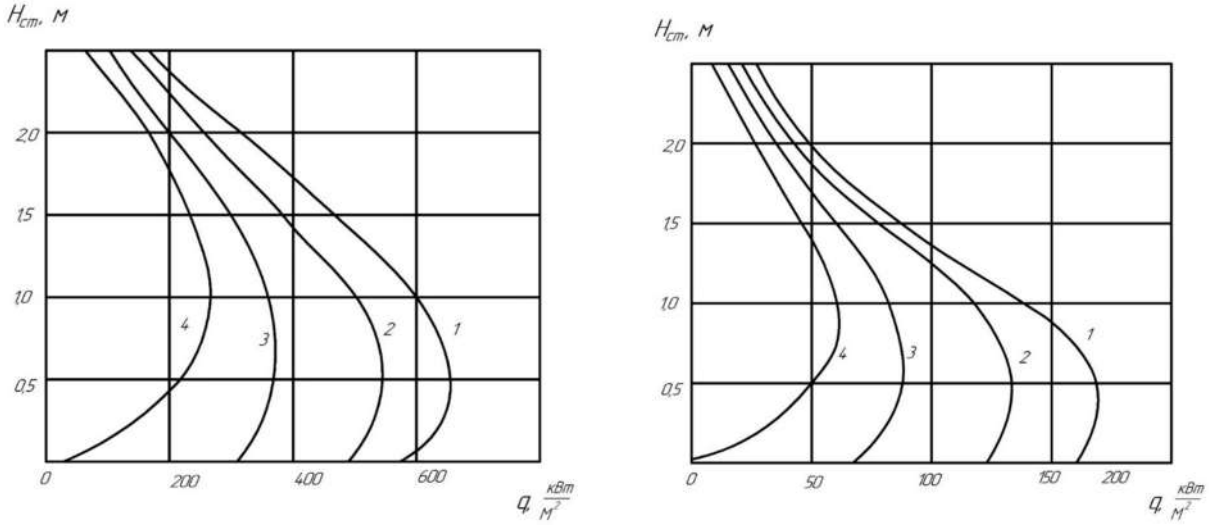
$$q = \frac{\varphi_{ДF} P_Д}{F e^{kr}} = \frac{\alpha_{ст} P_Д \cos\alpha \cos\beta\, l_{отк}}{\pi^2 r^2 l_д} \cdot e^{-kr} \qquad (1)$$

где $\varphi_{ДF}$ - локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку, площадью F, $\varphi_{ДF}$ определяется по таблицам [2]; $\alpha_{ст}$=0,92 [3]; $P_Д$- мощность дуги, $P_Д$=18 МВт; k - коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи, k=0,7 [2].

Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг по высоте стен печи ДСП–100 по участкам, расположенным напротив дуг, представлены для прозрачной – на рис. 2, а, и поглощающей – на рис. 2, б, атмосферы печи. Графики характеризуют распределение по высоте стен плотностей потоков тепловых излучений дуг, длиной 425 мм, заглубленных в жидкий металл и шлак на высоту 70(1), 160(2), 300(3) и 425 (4) мм. Как видно из рис. 2, а, сростом заглубления дуг в шлак максимальные потоки теплового излучения дуг на участки стен, расположенные на высоте 0,5 м, уменьшаются с 650 кВт/м^2 при $h_з$=70 мм до 262 кВт/м^2 при $h_з$=425 мм в лучепрозрачной среде и с 165 кВт/м^{2}при $h_з$=70 мм до 63 кВт/м^2 при $h_з$=425 мм в поглощающей среде, то есть уменьшаются в 2,5÷2,6 раза.

С увеличением высоты расположения расчетных площадок на поверхности стен уменьшается плотность потоков тепловых излучений дуг на площадки. Плотность тепловых потоков излучений дуг при их незначительном заглублении, составляющем 70 мм, кривая 1, рис. 2, а, на высоте 0,5 м равна 650 кВт/м^2, а на высоте 2,5 м, под сводом, 175 кВт/м^2 то есть в 3,7 раза меньше. Такая большая разница плотностей тепловых потоков излучений дуг в нижней и верхней частях стен объясняется тем, что, например, расстояние r от дуг, расположенных напротив стен, возрастает для площадок на высотах 0,5 м и 2,5 м, соответственно, с 1,9 до 2,8 м то есть в 1,5 раза, а плотность потоков тепловых излучений дуг, рассчитанная по формуле (1), уменьшается пропорционально квадрату расстояния r, то есть в 2,25 раза. Кроме того, для расчетной площадки 5 увеличиваются углы α и β, а косинусы углов уменьшаются в 1,45 раза, что приводит к суммарному снижению плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг на стены на высоте 2,5 м в 3,7 раза по сравнению с тепловыми потоками на высоте 0,5 м.

Из рис. 2, а видно, что при заглублении дуг, длиной 425 мм, в ванну и шлак максимальная плотность потоков тепловых излучений дуг снижается. Опираясь на данный расчет, получаем, что при полном заглублении дуг в ванну и шлак плотность потоков тепловых излучений дуг снижается приблизительно в 3 раза по всей высоте стен по сравнению с незначительным заглублением дуг или отсутствием заглубления дуг.



(а) (б)

Рисунок 2 - Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен печи по участкам стен, расположенным напротив дуг:

(а) прозрачная и (б) поглощательная от атмосферы печи:

$\ell_Д$=425 мм при $h_З$=70 мм (1), $h_З$=160 мм (2), $h_З$=300 мм (3), $h_З$=425 мм (4)

Зависимость максимальной тепловой нагрузки на стены от высоты заглубления в ванну металла и шлак в поглощательной атмосфере печи показана в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость максимальной тепловой нагрузки на стены от высоты заглубления в ванну металла и шлак в поглощательной атмосфере печи

Высота заглубления, мм	70	160	300	425
Максимальная тепловая нагрузка, кВт/м^2	165	137	86	51

Тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели в поглощательной атмосфере печи, рис. 2, б, снижаются по высоте стен. Из сравнения графиков 1-4 на рис. 2, а и рис. 2, б следует, что максимальные тепловые нагрузки, находящиеся на высоте 0,5 м стен, снижаются в поглощательной атмосфере печи в 4–4,3 раза по сравнению с прозрачной атмосферой печи. Аналогичные данные получены при экспериментальном исследовании тепловых нагрузок на водоохлаждаемые свод [3] и стены [4] дуговой сталеплавильной печи

ДСП–100. В случае лучепрозрачной среды тепловые нагрузки на свод ДСП–100 составляют 350÷534 кВт/м^2, при максимальной запыленности тепловые потоки снижаются в 4–4,5 раза до 80÷115 кВт/м^2 [3]. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по изменению тепловых нагрузок на водоохлаждаемые панели стен и свода в 4÷4,5 раза при переходе от лучепрозрачной к запыленной атмосфере печи совпадают. Плотности потоков тепловых излучений расположены на своде существенно неравномерно: увеличиваются с 100÷180 кВт/м^2 на периферии, у стен, до 400÷550 кВт/м^2 у электродных отверстий в лучепрозрачной среде и с 25÷45 кВт/м^2 на периферии до 100÷140 кВт/м^2 у электродных отверстий в поглощающей среде вследствие значительного теплового излучения трех электродов на свод печи [5-9].

Выводы

В ходе исследования расчетами установлено, что ростом заглубления дуг, плотность максимальных тепловых потоков дуг на стенах в лучепрозрачной атмосфере уменьшается с 650 кВт/м^2 при незначительном заглублении дуг до 262 кВт/м^2 при полном заглублении дуг в шлак. В поглощающей атмосфере печи плотности тепловых потоков дуг на стенах снижается с 165 кВт/м^2 при незначительном заглублении дуг до 63 кВт/м^2 при полностью заглубленных в шлак дугах. Максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен от незаглубленных дуг изменяются в 4 раза. Расчетные и экспериментальные данные по плотностям тепловых потоков излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи ДСП–100 совпадают. Максимальные тепловые нагрузки от излучений незаглубленных дуг на водоохлаждаемые панели в лучепрозрачной атмосфере могут привести к термическим повреждениям панелей, поэтому работа на незаглубленных длинных дугах в лучепрозрачной атмосфере печи не только энергозатратна, но и сокращает срок службы панелей.

Список источников

1. Макаров А. Н. Теплообмен в высокомощных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // Металлург. 2022. №7. С. 28-34

2. Дорофеев Г. А., Зинягин Т. А., Макаров А. Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: Издательство ТНТ, 2021. 324 с.

3. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: Металлургия, 1985. 144 с.

4. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1984. 232 с.

5. Кузьмин М.Г., Чередниченко В.С., Бикеев Р.А. и др. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // Электрометаллургия. 2014. №7. С. 8-16.

6. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмощных дуговых печей // MPT Металлургические заводы и технологии.

7. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортозамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // Сталь. 2015. №12. С. 74 – 76.

8. Симонян Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А. и др. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. №11. С. 68 – 75.

9. Гудим Ю.А., Овчинников С.Т., Зинуров И.Ю. Потери металла при выплавке стали в дуговых печах и способы их уменьшения // Электрометаллургия. 2010. №6. С. 11 – 15.

10. Макаров А.Н. Влияние задымленности атмосферы и высоты шлака на теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Влияние высоты шлака на тепловые нагрузки на стены и расход электроэнергии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 4 (12). С. 80-88.

Макаров Анатолий Николаевич, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, набережная Афанасия Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru.

Окунева Виктория Валерьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, набережная Афанасия Никитина, д. 22. E-mail: bukashka_89@inbox.ru.
Павлова Юлия Михайловна, старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, набережная Афанасия Никитина, д. 22. E-mail: sokolhawk98@gmail.ru

---

UDC 621.45.038.72

DISTRIBUTION OF THERMAL RADIATION FLUES OF ARCS OVER THE BATH AND WALLS IN HIGH-POWER ARC STEEL-MELTING FURNACES

Makarov A.N., Okuneva V.V., Pavlova Yu.M.
Russia, Tver, Tver State Technical University

Summary. Calculation of heat transfer in a high-power arc steel-smelting furnace is made. The results of the calculation showed that with an increase in the height of the slag layer, the heat fluxes of radiation from the arcs to the walls decrease, and to the surface of the bath they increase. With full penetration of the arcs into the bath and slag, the density of the thermal radiation fluxes of the arcs decreases by a factor of 3 along the entire height of the walls compared with a slight penetration of the arcs. Thermal loads on water-cooled wall panels in the absorption atmosphere of the furnace are reduced by 4 times compared to the transparent atmosphere of the furnace.
Keywords: furnace, heat exchange, electric arc, heat fluxes, radiation, efficiency.

References

1. Makarov A. N. Heat transfer in high-power arc steel-smelting furnaces. Part I. Calculation of thermal radiation fluxes of arcs on the bath and heat transfer in the metal bath // Metallurgist. 2022. No. 7. pp. 28-34
2. Dorofeev G. A., Zinyagin T. A., Makarov A. N. Production of steel based on direct reduction iron. Stary Oskol: TNT Publishing House, 2021. 324 p.
3. Sosonkin O.M., Kudrin V.A. Water-cooled roof of an electric arc furnace. Moscow: Metallurgy, 1985. 144 p.
4. Samokhvalov G.V., Chernysh G.I. Electric furnaces of ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1984. 232 p.
5. Kuzmin M.G., Cherednichenko V.S., Bikeev R.A. Water-cooled units of superpowerful arc steel-smelting furnaces // Electrometallurgy. 2014. No. 7. pp. 8-16.
6. Humer O. Water-cooled panels of modern heavy-duty arc furnaces // MRT Metallurgical plants and technologies.
7. Nefedov A.V., Nefedova E.V. Import-substituting technology for unloading dust from the bunkers of the electric steel-smelting shop of JSC "Ural Steel" // Steel. 2015. No. 12. pp. 74 - 76.
8. Simonyan L.M., Khilko A.A., Lysenko A.A. et al. Electric steelmaking dust as a dispersed system. Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy. 2010. No. 11. pp. 68 - 75.
9. Gudim Yu.A., Ovchinnikov S.T., Zinurov I.Yu. Losses of metal during steel smelting in arc furnaces and ways to reduce them // Electrometallurgy. 2010. №6. pp. 11 – 15.
10. Makarov A.N. Influence of atmospheric smoke and slag height on heat transfer in arc steel-smelting furnaces. Part II. Influence of slag height on thermal loads on walls and power consumption // Bulletin of the Tver State Technical University. Series “Construction. Electrical engineering and chemical technologies”. 2021. No. 4 (12). pp. 80-88.

Makarov Anatoly Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 170026, Tver, Afanasy Nikitin Embankment, 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru.
Okuneva Victoria Valerievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 170026, Tver, Afanasia Nikitin Embankment, 22. E-mail: bukashka_89@inbox.ru.
Pavlova Yulia Mikhailovna, Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 170026, Tver, Afanasia Nikitin Embankment, 22. E-mail: sokolhawk98@gmail.ru.

УДК 674.047.3-047.58

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ РАБОЧИХ КАМЕР ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКЕ ЗАГОТОВОК ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР

Еремеев В.Д., Коренков Д.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

Аннотация. Статья содержит промежуточные результаты исследований, направленных на дальнейшее развитие перспективных высокочастотных электротехнологий применительно к процессам сушки заготовок деревянных опор воздушных линий электропередач. Приведены результаты анализа способов формирования штабелей и размещения электродов рабочего конденсатора с точки зрения технологических и технических характеристик.

Ключевые слова: сушка заготовок деревянных опор; сушка в электромагнитном поле; электротехнологические установки для сушки; энерго- и ресурсосберегающие технологии.

Современные электротехнологические комплексы и системы должны отвечать требованиям энерго- и ресурсосбережения, что во многих случаях достигается интенсификацией выполняемого процесса при сопоставимых энергозатратах и сохранении качества получаемой продукции вне зависимости от того, является ли этот процесс конечным в технологическом цикле производства или промежуточным. Указанным требованиям удовлетворяют высокочастотные установки для нагрева и сушки, поскольку они существенно повышают скорость протекания данных процессов, однако, в отдельных случаях требуют дополнительных усилий для сохранения качества.

В работе [1] представлена принципиальная возможность сушки заготовок деревянных опор с помощью применения вакуумно-высокочастотной технологии, и в случае обеспечения высокой степени качества процесса, это позволит увеличить срок службы соответствующих линий электропередач. На данном этапе установлено, что качество высушенных заготовок во многом определяется правильным распределением поперечного сечения внутреннего источника тепла, что определяется правильным распределением параметров электромагнитного поля в рабочей камере во время сушки. Последнее условие может быть выполнено только при рациональном расположении заготовки относительно её электродов и оптимальной геометрии самих электродов. Следовательно, целью настоящего исследования является анализ известных методов укладки высушиваемых заготовок и поиск путей для дальнейших исследований.

Особенностью заготовок деревянных опор является, очевидно, их круглая форма, а также неравномерность диаметра в продольном направлении (сбег), что усложняет формирование штабеля по сравнению с обычными пиломатериалами, которые подвергаются вакуумно-высокочастотной сушке с меньшими технологическими проблемами при укладке. Форма не позволяет плотно укладывать материал, но, как показывает опыт использования вакуумно-высокочастотных комплексов, плотная укладка не всегда необходима. И если абстрагироваться от формы заготовок, то анализ следует начать с типовых способов формирования штабелей, а именно с горизонтальной и вертикальной систем электродов.

Конструкция рабочей камеры при укладке штабеля с вертикальными электродами (рис. 1, *а* и *б*) должна обеспечивать изоляцию электродов от заземленных частей самой камеры, для чего используются сухие деревянные подложки. Если заготовки уложены плотно (без шпаций) и электроды прилегают плотно к штабелю (без зазоров), можно добиться более высокой равномерности распределения параметров ЭМП, но при этом увеличивается аэродинамическое сопротивление влаге, испаряющейся с поверхности материала. Поэтому при плотной укладке деревяных опор с вертикальными электродами, показанной на рисунке 1, *в*, испарившаяся влага будет конденсироваться внутри штабеля, что потребует дополнительной энергии для повторного испарения. Для устранения этого

© Еремеев В.Д., Коренков Д.А., 2022

эффекта обычно материал укладывается в ряду со шпациями, а ряды отделяются друг от друга прокладками (рисунок 1, *а*), но в этом случае равномерность электромагнитного поля в рабочем конденсаторе сильно нарушается.

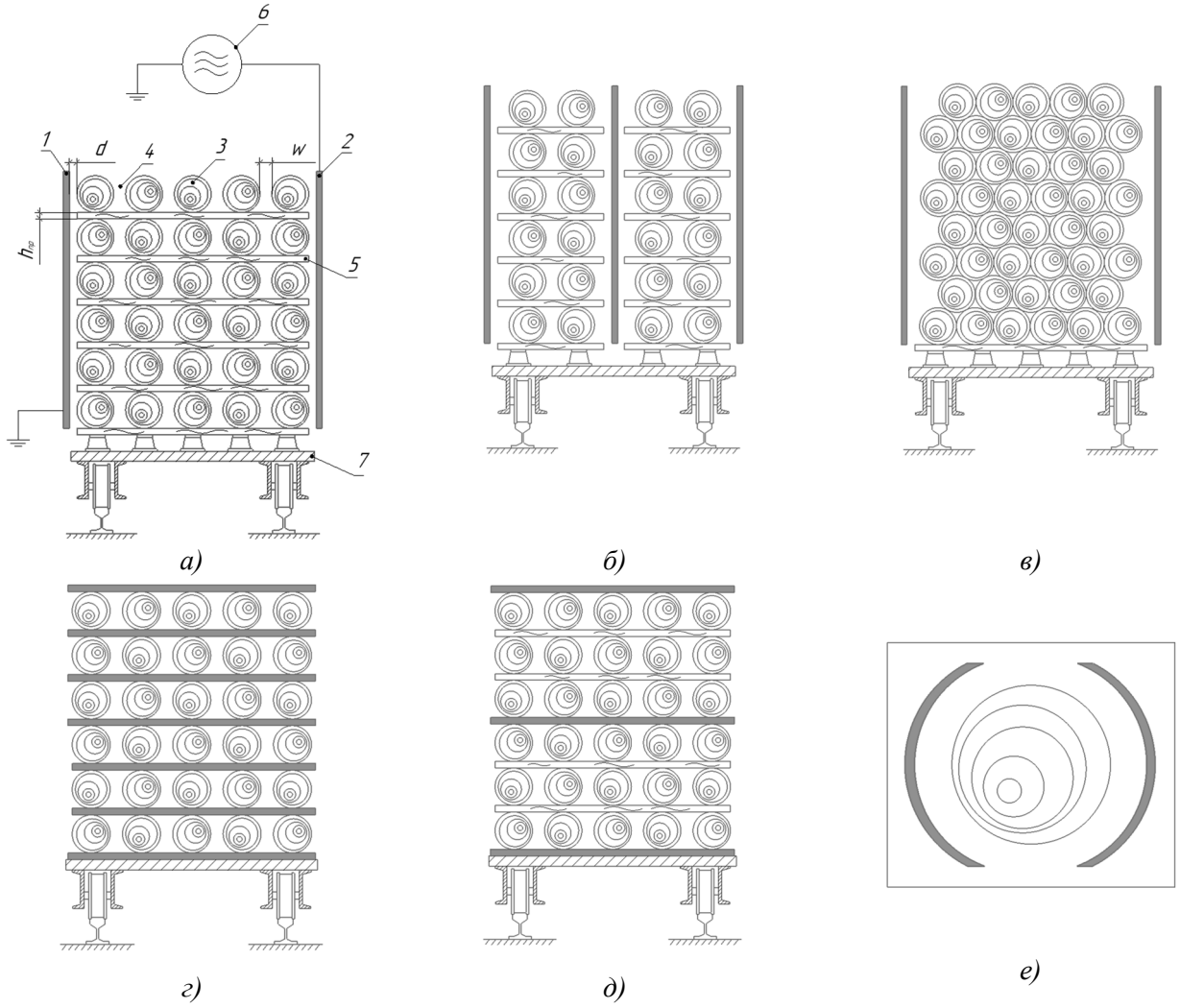


Рисунок 1 – Конфигурации рабочих конденсаторов при ВЧ сушке заготовок опор
а) и б) – укладка штабеля с вертикальными электродами; в) – плотная (хаотичная) укладка деревяных опор с вертикальными электродами; г) – укладка штабеля с горизонтальными электродами; д) – укладка штабеля через прокладки с горизонтальными электродами; е) – рабочий конденсатор с электродами в виде секторов окружности;
1 – низкопотенциальный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод; 3 – деревянная опора; 4 – шпация; 5 – прокладка; 6 – ВЧ генератор; 7 – тележка; w – ширина шпаций; d – воздушный зазор; h – высота прокладки.

Если электроды уложены вертикально и находятся в тесном прилегании, усушка материала будет приводить к образованию локальных воздушных зазоров, в которых могут возникать искровые разряды. Для их предотвращения заранее предусматривается зазор с большим значением *d*, который также оказывает непосредственное влияние на распределение параметров электромагнитного поля в рабочем конденсаторе [2].

Рабочий конденсатор с горизонтальными электродами (рисунок 1, *г*) лишен этого недостатка, так как их плотное прилегание к заготовкам обеспечивается под их собственным весом, а также за счет специальных мер: дополнительных грузов или стяжек. При этом низкопотенциальные электроды устанавливаются непосредственно на тележке; все нечетные электроды подключаются к низкопотенциальному выводу высокочастотного генератора, в то время как четные электроды присоединяются к высокопотенциальному выводу. Такой

способ формирования также требует применения прокладок для улучшения отвода испаренной влаги от поверхности материала (рис. 1, *д*).

С технической точки зрения вертикальная система электродов имеет значительные преимущества перед горизонтальной, поскольку сокращается время на укладку штабеля и погрузочно-разгрузочные работы, которые при горизонтально ориентированных электродах сопровождаются операциями по их подключению к высокочастотному генератору, что также увеличивает простой сушильного комплекса. Возможен и индивидуальный способ сушки, если заготовку поместить в отдельный рабочий конденсатор с электродами, повторяющими форму заготовки (рис. 1, *е*), тогда направление вектора напряженности электрического поля будет совпадать с радиальным направлением годовых колец. Это обеспечивает оптимальное распределение параметров электромагнитного поля по сечению заготовки и гарантирует качество сушки, но этот метод не применим в условиях массового производства, например, при изготовлении деревянных пропитанных опор.

Таким образом, в условиях групповой сушки основными факторами, влияющими на распределение параметров электромагнитного поля в поперечном сечении, являются ориентация электродов, размер воздушного зазора d между электродами и штабелем, расстояние между заготовками в ряду w (ширина шпаций), и высота h прокладок. Отсюда следует цель дальнейших исследований – определение системы электродов конденсатора и рационального метода укладки заготовок, способствующих, с одной стороны, обеспечению равномерности электромагнитного поля, а с другой – несильному снижению уровня напряженности электрического поля в материале по сравнению с плотным заполнением рабочего конденсатора. Эта проблема может быть решена методами математического и компьютерного моделирования с использованием теории многофакторной оптимизации. Математическая модель данного класса задач расчета квазистационарного электрического поля описана в работе [3], а для её анализа планируется использовать отечественный программный продукт Elcut.

Список источников

1. Качанов А.Н., Коренков Д.А., Ревков А.А., Максимов В.В., Воркунов О.В. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.
2. Kachanov A.N., Korenkov D.A. Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying [Электронный ресурс] // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/8076423/ A. Taflove, S.C. Hagness, Computational electrodynamics: the finitedifference time-domain, 2-nd ed. Boston - London: Artech House, 2000, p. 866.
3. Коренков Д.А., Еремеев В.Д. Постановка задачи поиска оптимальной конфигурации рабочего конденсатора при ВЧ сушке деревянных опор // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIX международной научно-практической конференции (10 – 12 ноября 2021 г., г. Орёл). – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021. – С. 67-70.

Еремеев Владислав Дмитриевич, магистрант, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95.

Коренков Дмитрий Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

---

UDC 674.047.3-047.58

ANALYSIS OF POSSIBLE CONFIGURATIONS OF WORKING CHAMBERS DURING HIGH-FREQUENCY DRYING OF WOODEN SUPPORT BLANKS

Eremeev V.D., Korenkov D.A.

Russia, Oryol, the Orel state University named after I.S. Turgenev

Summary. The article contains intermediate results of research aimed at further development of promising high-frequency electrical technologies as applied to the processes of drying blanks of wooden supports of overhead power lines. The results of the analysis of methods of forming stacks and placement of working condenser electrodes in terms of technological and technical characteristics are given.

Keywords: drying of billets of wooden supports; drying in electromagnetic field; electrotechnological installations for drying; energy- and resource-saving technologies.

References

1. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Revkov A.A., Maksimov V.V., Vorkunov O.V. Modeling of processes of high frequency drying of wooden supports in vacuum chamber // Izvestiya vysshee izuchenii. POWER ENGINEERING PROBLEMS. 2020. T. 22. № 6. C. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.
2. Kachanov A.N., Korenkov D.A. Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying [Electronic resource] // 2017 International Conference on Industrial, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/8076423/ A. Taflove, S.C. Hagness, Computational electrodynamics: the finitedifference time-domain, 2nd ed. Boston - London: Artech House, 2000, p. 866.
3. Korenkov, D.A., Eremeyev, V.D. Statement of the problem of finding the optimum configuration of the working condenser for high frequency drying of wooden supports // Energy and Resources Saving - XXI Century: Proceedings of XIX International Scientific-Practical Conference (10 - November 12, 2021, Oryol). - Oryol: OGU named after I.S. Turgenev, 2021. - C. 67-70.

Eremeev Vladislav Dmitrievich, undergraduate, Oryol state university of I.S. Turgenev, 302026, g. Oryol, ul. Komsomolskaya, d. 95.
Korenkov Dmitry Andreevich, Candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department, Oryol state university of I.S. Turgenev, 302026, g. Oryol, ul. Komsomolskaya, d. 95, e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.

УДК 674. 047. 354

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ВЧ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПЕРЕМЕННУЮ ЕМКОСТНУЮ НАГРУЗКУ

Шевляков Д.Э., Шевляков Дм.Э., Коренков Д.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

Аннотация. В работе приведены результаты анализа различных способов сушки пиломатериалов. Показано, что применение токов высокой частоты следует рассматривать как перспективное решение, направленное на интенсификацию процессов удаления влаги. При этом возникает ряд проблем, связанных с необходимостью постоянной подстройки высокочастотных генераторов на оптимальный режим работы. Сформулированы задачи дальнейших исследований, решение которых позволит в целом повысить энергоэффективность функционирования электротехнологических комплексов для высокочастотной сушки.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов; сушка в электромагнитном поле; высокочастотные генераторы.

На сегодняшний день производство пиломатериалов сохраняет одно из важных мест в современной промышленности, поэтому решение комплексной задачи по улучшению эксплуатационных свойств изделий из древесины и уменьшению срока их производства не теряет своей актуальности. С этой точки зрения этап сушки пиломатериалов – это ключевой процесс всей деревообработки ввиду его влияния на длительность процесса производства, физико-химические свойства и конечную стоимость готового изделия. При сушке необходимо учитывать, что свежеспиленная древесина имеет пористую структуру,

© Шевляков Д.Э., Шевляков Дм.Э., Коренков Д.А., 2022

неоднородно заполненную влагой. Неоднородность структуры строения древесины имеет разный характер как в продольном, так и в поперечном направлениях, что сильно сказывается на процессе удаления влаги. Вследствие этого внешние слои высыхают быстрее, что приводит к возникновению напряжений в теле заготовки, и появляется риск возникновения трещин и изменения геометрии. Данным дефектам сильнее подвержены заготовки большого сечения, что требует снижения температуры и увеличения срока сушки [1].

В промышленности применяется несколько способов сушки пиломатериалов, направленных на достижение разных параметров качества древесины и требующих разных временных затрат. Естественная сушка является самой старой и легкой технологией, при использовании которой заготовки помещаются под навес на открытом воздухе. В таких условиях пиломатериалы защищены от попадания осадков и прямых солнечных лучей, и можно высушить древесину до показателей влажности в 18…23 %. При необходимости получить меньшее влагосодержание, заготовки помещают в закрытые вентилируемые помещения, в которых в конечная влажность снижается до 12 %. Основными недостатками данной технологии являются длительный срок сушки от нескольких недель до месяцев, а также зависимость от сезона и географического расположения производства.

Самым распространенным способом сушки древесины является конвективный метод. Технология конвективной сушки основана на подводе тепла к заготовкам посредством обдува потоками горячего воздуха, подогреваемого калориферами, в специальной камере. Достоинствами данного метода являются независимость от условий окружающей среды, меньшая продолжительность по сравнению с естественной, наличие возможности регулирования интенсивности процесса, возможность получения заготовок любой влажности. К недостаткам данной технологии можно отнести долгий процесс сушки, низкую заполняемость рабочего объема сушильной камеры ввиду установки прокладок между рядами в штабеле, а также вероятность появления микротрещин. Несмотря на все перечисленные недостатки, возможность большой разовой загрузки делает данный метод одним из самых распространенных [2].

К более современным технологиям, применяемым при производстве пиломатериалов, относят сушку древесины в электрическом поле токов высокой частоты (ТВЧ). При использовании данного метода молекулы древесного сока, содержащиеся в пористых каналах древесины, закипают под воздействием электромагнитного поля, которое генерируется излучателями. Высокочастотная сушка (ВЧ) пиломатериалов реализуется путём укладки заготовок между пластинами электрического конденсатора, состоящего из двух и более пластин, подключенных к генератору токов высокой частоты. Преимуществами данного метода является большая интенсивность, а также качество готовой древесины по сравнению с конвективной технологией, что достигается благодаря равномерному нагреванию всего объема заготовки [3]. При этом возникает необходимость уменьшения влияния неравномерности распределения следующих параметров материала: диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь из-за разной влажности участков одной заготовки. Неравномерности нагрева могут также способствовать отраженные от конца рабочего конденсатора электромагнитные волны, которые, взаимодействуя с падающими, образуют стоячие волны. В результате возникают узлы и пучности тока и напряжения по длине штабеля. В местах пучностей напряжения наблюдается максимальный нагрев заготовки. Для минимизации данного эффекта расстояние от точки подключения фидера до конца заготовки должно быть не больше 10 % от длины волны [4].

На текущем этапе для целей диэлектрического нагрева и сушки могут использоваться высокочастотные генераторы транзисторного и лампового типа. При этом для установок большой мощности (несколько десятков киловатт), работающих на частотах в единицы и десятки мегагерц, чаще применяются именно ламповые генераторы. Их эксплуатация сопровождается конструктивными проблемами, которые делают вопрос точной настройки их

электрических параметров для работы в оптимальном режиме актуальным. Настройка лампового генератора заключается в обеспечении оптимальных значений следующих характеристик [5]:

- коэффициента обратной связи, величина которого позволяет обеспечить стабильную работу генераторной лампы, не допустив превышения критического значения сеточного тока;
- сопротивления, приведенного к генераторной лампе (обладает чисто активной величиной и не оказывает влияния на критическое значение анодного тока).

Настройка лампового генератора обеспечивается путем подбора оптимальных значений межэлектродных емкостей генераторной лампы и цепи обратной связи, а также входного сопротивления всей установки, включая цепи нагрузки и обратной связи. На первом этапе настройки производится отключение анодной цепи, вследствие чего через балластную цепь напряжение поступает на анод генераторной лампы. Посредством изменения частоты генератора определяется максимум напряжения, при котором наблюдается полюс функции коэффициента обратной связи. Так как в состав цепи обратной связи входит всего один элемент с изменяемыми параметрами, его регулирование позволяет добиться расчетного положения полюса коэффициента обратной связи. На втором этапе вводится анодная цепь лапового генератора, а питание по-прежнему подается через балластную цепь на анод генераторной лампы. После измерения напряжения на аноде, регулирующими элементами происходит настройка генератора таким образом, чтобы максимум измеряемого напряжение равнялся или был близок к расчетному значению и принадлежал рабочей характеристике.

Применительно к процессам высокочастотной сушки пиломатериалов настройка генератора осложняется постоянным изменением электрических параметров нагрузки. Так отмечается, что при изменении важности древесины от 60 до 15 % емкость рабочего конденсатора изменяется в три раза [4]. Если текущие настройки не будут согласованы с нагрузкой, то работа генератора будет сопровождаться низким значением КПД, что, в свою очередь, будет означать повышенные затраты электроэнергии на сушку и более высокую ее себестоимость.

Таким образом, можно выделить следующие актуальные научно-технические задачи, направленные на дальнейшее совершенствование электротехнических комплексов для высокочастотной сушки древесины и повышение их энергоэффективности:

- анализ и корректировка существующих методик расчета параметров элементов типовых схем ВЧ генераторов с учетом средних значений электрический емкости и входного сопротивления рабочего конденсатора в зависимости от объема высушиваемого пиломатериала;
- усовершенствование методов, алгоритмов и средств автоматического регулирования оптимальной работой ВЧ генераторов на переменную емкостную нагрузку.

Решение данных задач возможно с использованием существующих математических моделей, описывающих процессы тепломассопереноса при сушке пиломатериала, а также методов компьютерного моделирования и современных программных комплексов для инженерных расчетов.

Список источников

1. Коренков Д.А., Еремеев В.Д. Постановка задачи поиска оптимальной конфигурации рабочего конденсатора при ВЧ сушке деревянных опор // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIX международной научно-практической конференции (10 – 12 ноября 2021 г., г. Орёл). – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021. – С. 67-70.

2. Платонов А.Д., Курьянов Т.К. Особенности процесса конвективной сушки термохимически обработанной древесины // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2007. – № 18. – С. 128-130.

3. Коренков Д.А. Проблемы вакуумно-высокочастотной сушки деревянных опор и способы их преодоления // Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность,

безопасность, энергосбережение и экономические аспекты» матер. конф. (Казань 7 апреля 2021 г.). - Казань: Казан гос. энерг. ун-т, 2021. С. 13-19.

4. Галкин В.П., Горяев А.А., Баланцева Н.Б., Калиничева О. А., Калинина А. А. Особенности высокочастотной сушки пиломатериалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21. – № 4. – С. 73–77.

5. Васильев А.С., Гуревич С.Г., Кильдишева О.Э. Диагностика ламповых генераторов для диэлектрического нагрева // Электричество. – 1995. – № 6. – С. 28-34.

Шевляков Дмитрий Эдуардович, магистрант, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95.
Шевляков Даниил Эдуардович, магистрант, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95.
Коренков Дмитрий Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орѐл, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

---

UDC 674. 047. 354

ON ENSURING OPTIMAL OPERATION OF RF POWER GENERATORS FOR VARIABLE CAPACITIVE LOAD

Shevlyakov D.E., Shevlyakov D.E., Korenkov D.A.
Russia, Oryol, FGBOU VO "OSU named after I.S. Turgenev"

Summary. The paper presents the results of the analysis of various methods of drying lumber. It is shown that the use of high-frequency currents should be considered as a promising solution aimed at intensifying the processes of moisture removal. At the same time, there are a number of problems associated with the need for constant adjustment of high-frequency generators to the optimal operating mode. The tasks of further research are formulated, the solution of which will generally improve the energy efficiency of the functioning of electrotechnological complexes for high-frequency drying.

Keywords: drying of lumber; drying in an electromagnetic field; high-frequency generators.

References

1. Korenkov D.A., Eremeev V.D. Formulation of the problem of finding the optimal configuration of the working capacitor during HF drying of wooden supports // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XIX International scientific and practical conference (November 10-12, 2021, Orel). – Eagle: I.S. Turgenev OSU, 2021. – pp. 67-70.

2. Platonov A.D., Kuryanov T.K. Features of the process of convective drying of thermochemically treated wood // Actual problems of the forest complex. - 2007. – No. 18. – pp. 128-130.

3. Korenkov D.A. Problems of vacuum-high-frequency drying of wooden supports and ways to overcome them // International Scientific and Practical conference "Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects" mater. conf. (Kazan, April 7, 2021). - Kazan: Kazan State Energy University, 2021. pp. 13-19.

4. Galkin V.P., Goryaev A.A., Balantseva N.B., Kalinicheva O. A., Kalinina A. A. Features of high-frequency drying of lumber // Forest Bulletin / Forestry Bulletin. – 2017. – Vol. 21. – No. 4. – pp. 73-77.

5. Vasiliev A.S., Gurevich S.G., Kildisheva O.E. Diagnostics of tube generators for dielectric heating // Electricity. - 1995. – No. 6. – pp. 28-34.

Shevlyakov Dmitry Eduardovich, master's student, OSU named after I.S. Turgenev; 302026, Orel, Komsomolskaya str., 95.
Shevlyakov Daniil Eduardovich, master's student, OSU named after I.S. Turgenev; 302026, Orel, Komsomolskaya str., 95.
Korenkov Dmitry Andreevich, PhDn., Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving " I.S. Turgenev OSU"; 95 Komsomolskaya str., Oryol, 302026; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Качанов А.Н.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А.
Россия, г. Орёл, ООО «ИНТЕР РАО – Орловский энергосбыт»

Аннотация. В статье приведены результаты исследования индукционных устройств с бегущим электромагнитным полем для термообработки рабочих валков прокатных станов. Приведены картины распределения электромагнитных и температурных полей, полученные в программной среде ELCUT.

Ключевые слова: индукционная термообработка, предварительный нагрев, бегущее электромагнитное поле, программный продукт ELCUT.

При индукционной закалке крупногабаритных изделий таких как рабочие валки прокатных станов (рисунок 1) на глубины больше 10 мм возникает опасность перегрева поверхности бочки, а, следовательно, нарушение технологии, которое может привести к браку изделия. Гарантией хорошего качества закаленного слоя является обеспечение требуемого распределения температуры по сечению валка, которое регламентируется технологическими картами термообработки, что позволяет избежать возникновения остаточных термических напряжений, а значит повысить качество термообработки.

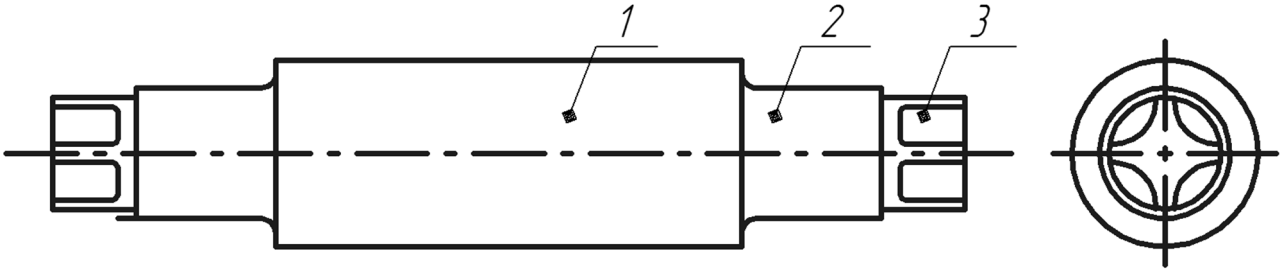


Рисунок 1 – Типовая конструкция рабочего валка прокатного стана:
1 – бочка; 2 – шейка; 3 – трефа

Успешным решением данной задачи является предварительный подогрев валка, который может осуществляться как в специальной печи, так и обеспечиваться непосредственно самой индукционной закалочной установкой, а также комбинацией этих способов. Дополнительно, для большей равномерности нагрева, валок приводится во вращение с помощью электропривода.

Известны технические решения, направленные на внедрение технологии электромагнитной термообработки рабочих валков прокатных станов. Так, в полезной модели [1], для предварительного нагрева валка авторы предлагают использовать токи частотой от 50 до 175 Гц, а затем осуществлять закалку на расчетной частоте. В полезной модели [2] авторы предлагают использовать закалочный блок, включающий в себя два водоохлаждаемых индуктора: дополнительный индуктор высокой (питаемый током частотой 500 Гц) частоты и индуктор промышленной (50 Гц) частоты. Эти индукторы работают одновременно и обеспечивают более быстрый и равномерный прогрев тела бочки валка, обеспечивая повышение качества последующей закалки.

Применение индукторов с бегущим электромагнитным полем (БЭМП) может позволить не только решить задачу предварительного подогрева, но и упростить конструкцию закалочной установки за счет исключения из её состава электропривода

© Качанов А.Н., Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А., 2022

обеспечивающего вращение валка. Индуктор с бегущим электромагнитным полем промышленной частоты вызывает не только нагрев валка, но и возникновение в нём электродинамических сил, которые обеспечивают его вращение, что способствует большей равномерности нагрева.

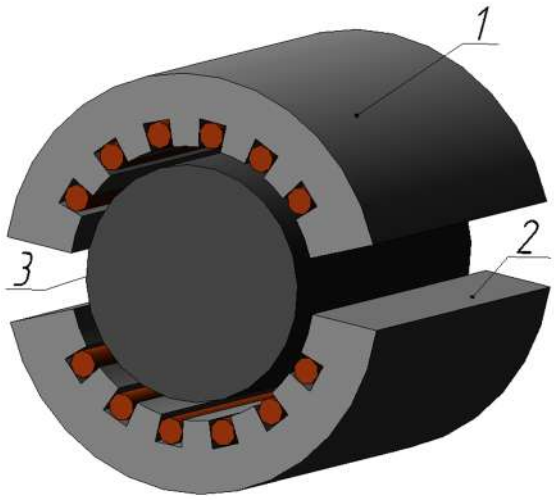


Рисунок 2 – Трехмерная модель системы «индукторы с БЭМП – ферромагнитная загрузка»:
1 – индуктор №1; 2 – индуктор №2; 3 – загрузка

Для исследования процесса предварительного нагрева бочки валка, которая представляет собой цилиндр, была использована система «индукторы с БЭМП – ферромагнитная загрузка», представленная на рисунке 2.

Такую конструкцию индукторов с БЭМП можно получить, если из статора асинхронного двигателя вырезать и оставить в конструкции часть, соответствующую некоторому центральному углу. Получится так называемый дугостаторный или сегментный индуктор [3], который по характеру электромагнитных процессов может рассматриваться как модификация линейного асинхронного двигателя. Наличие двух индукторов позволяет решить задачу управления нагревом с одновременным регулированием скорости и направления перемещения загрузки [4].

Условно разрезав вдоль осевой линии и развернув на плоскость, данную систему можно представить в прямоугольной (декартовой) системе координат. Этапы перехода от цилиндрической к прямоугольной системе координат показаны на рисунке 3.

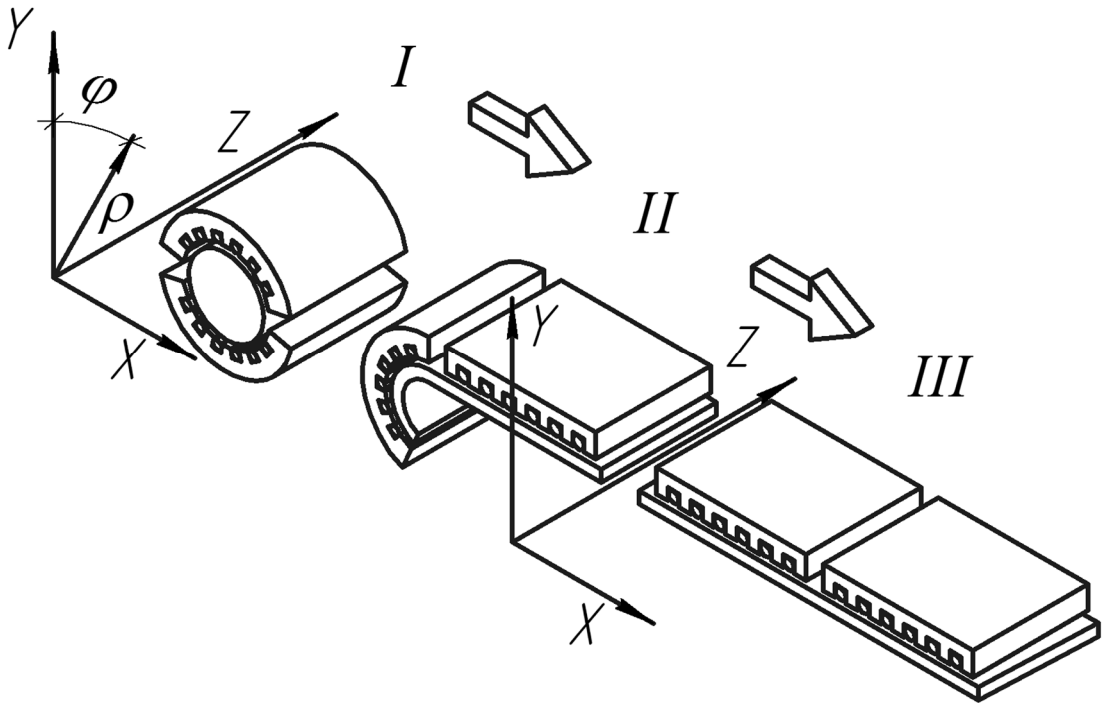


Рисунок 3 – Этапы перехода от цилиндрической к прямоугольной системе координат

После перехода к декартовой системе координат, расчет уже будет производиться в системе «индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка», эскиз которой представлен на рисунке 4.

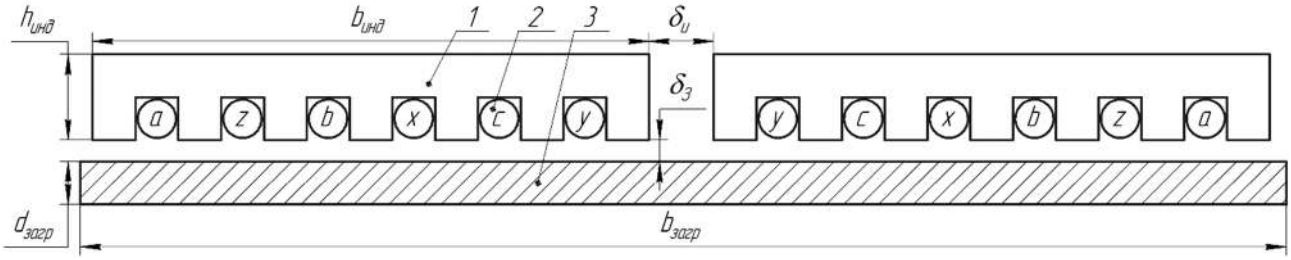


Рисунок 4 – Эскиз исследуемой системы «индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка»:
1 – магнитопровод; 2 – индуктирующий провод; 3 – загрузка

Исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка» было проведено в программной среде Elcut (рисунок 5). С целью повышения точности расчетов, сетка дискретизации задается неравномерной путем увеличения количества узлов в зонах исследуемой системы, представляющих наибольший интерес.

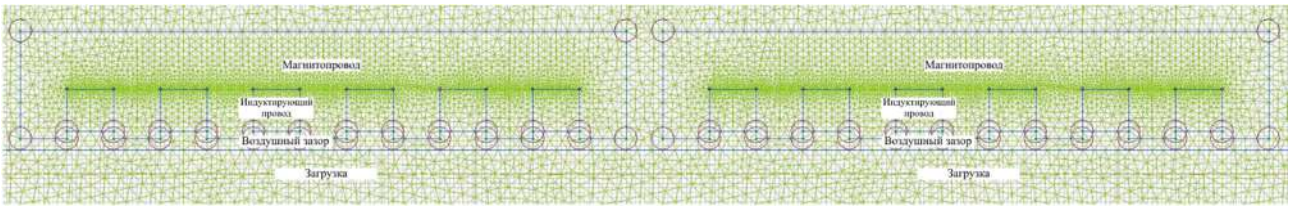


Рисунок 5 – Модель исследуемой системы в программной среде Elcut

При проведении исследования было принято, что частота тока индукторов равна 50 Гц, а элементы системы имеют следующие обозначения:

1. $h_{инд}$ и $b_{инд}$ – высота и ширина магнитопровода каждого индуктора соответственно;
2. $b_{загр}$ и $d_{загр}$ – ширина и толщина загрузки, длина загрузки равна длине индуктора;
3. $\delta_з$ – величина воздушного зазора между полюсами магнитопроводов индукторов и поверхностью плоской ферромагнитной загрузки, $\delta_и$ – расстояния между индукторами.

В таблице 1 приведена информация о способах включения и порядке чередования фаз индуктирующих проводов индукторов №1 и №2 при проведении исследования.

Таблица 1 – Способы включения и порядок чередования фаз

Способ включения индукторов № 1 и № 2	Чередование фаз	
	Индуктор № 1	Индуктор № 2
согласное	ABC	ABC
встречное	ABC	CBA

На первом этапе исследовано распределение электромагнитных и тепловых полей в загрузке при одинаковых значениях тока в индукторах и их согласном включении. На рисунке 6 представлена картина распределения плотности тока по сечению загрузки, а на рисунке 7 представлена картина распределения температуры во время нагрева полученные в программной среде Elcut. Чёрными линиями изображены линии электромагнитного поля, а распределение плотности тока показано цветной картиной. Наибольшее значение плотности тока во загрузке достигается на поверхности, а по толщине материала оно резко уменьшается. Наблюдается выраженный поверхностный эффект.

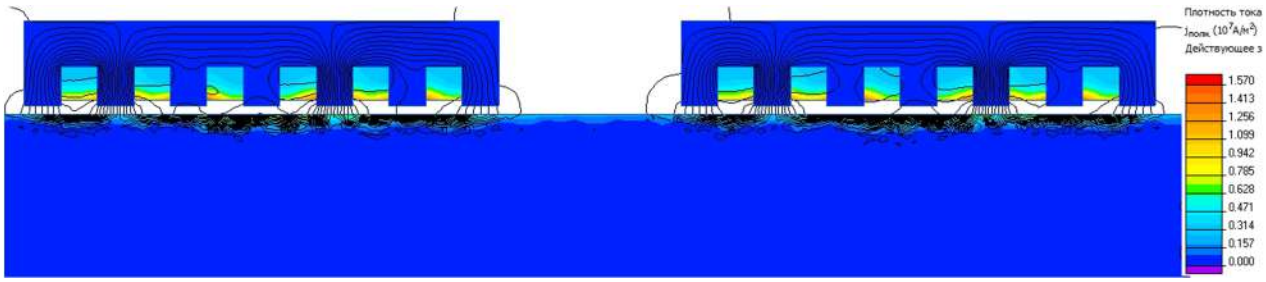


Рисунок 6 – Картина распределения плотности тока по сечению загрузки при согласном включении индукторов

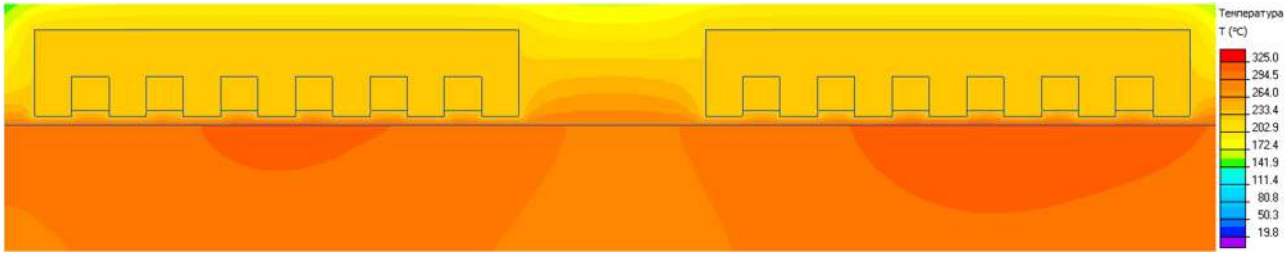


Рисунок 7 – Картина распределения температуры по сечению загрузки при согласном включении индукторов

Так как нагрев идёт на промышленной частоте, то обеспечивается глубинный нагрев, поэтому разница температур по объёму составляет 5 °С. Также заметны большие утечки тепла в окружающее пространство, поэтому необходимо применение теплоизоляционных материалов для уменьшения тепловых потерь.

На втором этапе исследовано распределение электромагнитных и тепловых полей в загрузке при одинаковых значениях тока в индукторах и их встречном включении. На рисунке 8 представлена картина распределения плотности тока по сечению загрузки, а на рисунке 9 представлена картина распределения температуры во время нагрева. Значение плотности тока в загрузке, по сравнению с согласным включением увеличилось на 4 %. Температура загрузки за один и тот же промежуток времени увеличилась на 30 %. Разница температур по объёму составляет не более 5 °С, т.е. нагрев можно считать однородным.

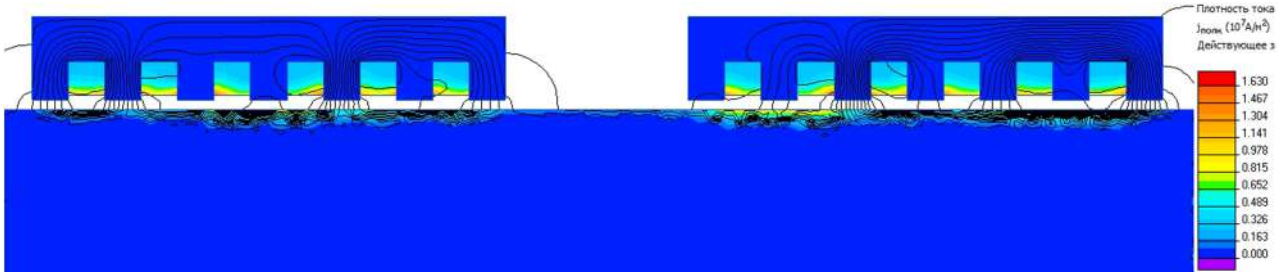


Рисунок 8 – Картина распределения плотности тока по сечению загрузки при встречном включении индукторов

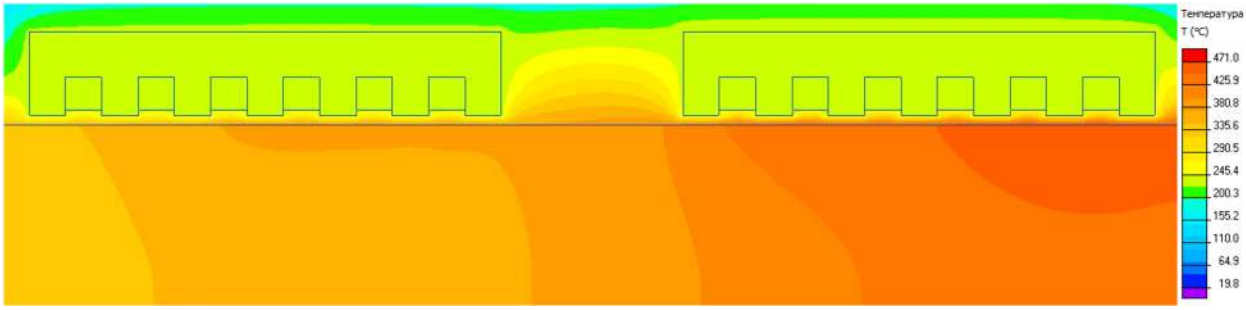


Рисунок 9 – Картина распределения температуры по сечению загрузки при встречном включении индукторов

Список источников

1. Патент 187731 Российской Федерации, МПК C21D 1/10, H05B 6/36, C21D 9/38. Индуктор для закалки валков прокатных станов / Демидович В.Б., Ситько П.А., Перевалов Ю.Ю., Абдулхаков И.Ю.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина)» – №2018120568; заявл. 04.06.2018; опубл. 15.03.2019, Бюл. №8 – 6 с.: ил.

2. Патент 159953 Российской Федерации, МПК C21D 1/10, C21D 9/38. Устройство индукционного нагрева и закалки прокатных валков / Сергеев В.А., Ергин А.Н., Кабалин Е.И., Герасимов А.В., Титченко Л.Н.; Акционерное общество "Научно- производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» АО НПО «ЦНИИТМАШ» – №2015136179/02; заявл. 26.08.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №5 – 8 с.: ил.

3. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Л. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 255 с.

4. Качанов А.Н., Миронов Е.А., Селиверстова О.С. Исследование индукционного устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле в программной среде ELCUT // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия технические науки. №3, 2019, С. 63–67.

Качанов Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор, академик АЭН Российской Федерации, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; адрес: 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, тел. 8(4862)419853; e-mail: kan@ostu.ru.

Юрьев Юрий Николаевич – генеральный директор ООО «ИНТЕР РАО – Орловский энергосбыт»; адрес: 302020, г. Орёл, ул. Полесская, 28к, тел. 8(4862)735151; e-mail: yurev_yn@interrao-orel.ru.

Миронов Евгений Андреевич – магистр, ассистент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; адрес: 302020 г. Орёл, ул. Наугорское шоссе, д. 29; тел. 89066612444; e-mail: gen996@mail.ru.

UDC 621.311

INVESTIGATION OF INDUCTION DEVICES WITH A TRAVELING ELECTROMAGNETIC FIELD FOR HEAT TREATMENT OF ROLLING MILLS WORK ROLLS

Kachanov A.N.

Russia, Oryol, FGBOU VO «OSU named by I.S. Turgenev»

Yuryev Y.N., Mironov E.A.

Russia, Oryol, LLC «INTER RAO – Orel energy distribution»

Summary. The article presents the results of a study of induction devices with a traveling electromagnetic field for heat treatment of work rolls of rolling mills. The distribution patterns of electromagnetic and temperature fields obtained in the ELCUT software environment are presented.

Keywords: induction heat treatment, preheating, traveling electromagnetic field, ELCUT software product.

References

1. Patent 187731 RF, IPC C21D 1/10, H05B 6/36, C21D 9/38. Inductor for hardening rolls of rolling mills / Demidovich V.B., Sitko P.A., Perevalov Yu.Yu., Abdulkhakov I.Yu.; Patentee Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State Electrotechnical University" LETI "named after V.I. Ulyanov (Lenin)" - No. 2018120568; dec. 06/04/2018; publ. 03/15/2019, Bull. No. 8 - 6 p.: ill.

2. Patent 159953 RF, IPC C21D 1/10, C21D 9/38. Device for induction heating and hardening of rolling rolls / Sergeev V.A., Ergin A.N., Kabalin E.I., Gerasimov A.V., Titchenko L.N.; Joint Stock Company "Scientific and Production Association "Central Research Institute of Engineering Technology" JSC NPO "CNIITMASH" - No. 2015136179/02; dec. 08/26/2015; publ. 02/20/2016, Bull. No. 5 - 8 pp.: ill.

3. Veselovsky O.N. Linear asynchronous motors / O.N. Veselovsky, A.L. Konyaev, F.N. Sarapulov. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 255 p.

4. Kachanov A.N., Mironov E.A., Seliverstova O.S. Investigation and calculation of induction mass heating devices in the elcut program environment // Bulletin of the Tver State Technical University. Series of technical sciences. No. 3, 2019, pp. 63–67.

Kachanov Alexander Nikolaevich – Doctor of technical sciences, Professor, Academician of the AES RF, Head of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev"; address: 302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29, tel. 8(4862)419853; e-mail: kan@ostu.ru.
Yuryev Yury Nikolaevich – General manager of LLC «INTER RAO – Orel energy distribution»; address: 302020, Orel, st. Polesskaya, 28k, tel. 8(4862)735151; e-mail: yurev_yn@interrao-orel.ru.
Mironov Evgeniy Andreevich – Master, Assistant of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE"OSU named after I.S. Turgenev"; address: 302020 Orel, Naugorskoe shosse, 29; tel. 89066612444; e-mail: gen996@mail.ru.

УДК 621.365.5

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НА ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОГО ИНДУКТОРА

Булгакова Е.С., Кувалдин А.Б.
Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»

Аннотация. Проведены теоретические исследования температурного распределения по слоям многослойного индуктора с внешним охлаждением для нагрева алюминиевых заготовок. Расчеты принятого в качестве примера шестислойного индуктора выполнены в программной среде ELCUT. На основе полученных результатов с учетом энергоэффективности выбраны конструктивные параметры многослойного индуктора и сформулированы требования к системе его охлаждения.

Ключевые слова: многослойный индуктор, алюминиевая заготовка, внешнее охлаждение, температура слоев индуктора, энергоэффективность.

Для повышения энергоэффективности индукционных установок для нагрева алюминиевых заготовок в промышленности применяются многослойные индукторы [1-3]. Надежность индукционных нагревательных установок во многом определяется работой системы охлаждения индуктора. На практике применяют индукторы трубчатого сечения для подачи охлаждающей жидкости, однако возможно также и применение индукторов сплошного сечения (внешнее охлаждение). Этот вариант конструкции рассматривается в данной работе.

Основными параметрами, влияющими на эффективность внешнего охлаждения, являются зазоры между слоями секции, высота секции, толщина электроизоляции, коэффициент теплоотдачи с поверхности индуктора и общая конфигурация системы охлаждения и индуктора. Ранее в работе [4] более подробно было исследовано влияние конфигурации системы охлаждения и индуктора на температурное распределение по слоям индуктора в зависимости от коэффициента теплоотдачи α. Было выявлено, что многослойный индуктор, у которого все шесть слоев плотно прижаты друг к другу и образуют секцию, охлаждаемую снаружи (рис.1), имеет ряд преимуществ перед другими вариантами. Для интенсификации охлаждения и снижения температуры до приемлемого значения, определяемого стойкостью электроизоляции, можно уменьшать высоту секций, однако увеличение их количества также нежелательно, так как усложняет конструкцию и приводит к увеличению потерь.

Для получения наиболее полной картины об условиях охлаждения индуктора, проведено исследование влияния высоты секции индуктора на тепловые характеристики многослойного индуктора. С этой целью была разработана математическая модель системы многослойный индуктор – загрузка (МИ – З) с использованием программного продукта

© Булгакова Е.С., Кувалдин А.Б., 2022

ELCUT.

Для основных параметров индуктора приняты следующие значения (указаны также диапазоны варьирования): число слоев $N_{сл}$ = 6, число, высота секции h_w = 20÷40 мм, зазор между слоями индуктора $\delta_{и\text{-}и}$ = 1 мм, толщина слоя индуктора $\delta_{сл}$ = 6 мм, толщина электроизоляции $\delta_{из}$ = 1 мм, удельное электрическое сопротивление $\rho_{м20°C} = 0{,}017 \cdot 10^{-6}$ Ом·м при температуре 20°С, частота f = 50 Гц, ток I = 3 кА.

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи от поверхности секции индуктора к среде охлаждения α = 500 – 1500 Вт/(м^2·К) были выбраны исходя из справочных данных и ранее проведенных исследований [4].

На внешней границе модели задано граничное условие конвекции. Оно описывает конвективный теплообмен и определяется следующим образом:

$$F_n = \alpha(T - T_0),$$

где α - коэффициент теплоотдачи, и T_0 - температура окружающей среды.

При решении линейной тепловой задачи использовалось уравнение теплопроводности для осесимметричного случая:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -q(T) - c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial t},$$

где T - температура;

t - время;

$\lambda(T)$ - теплопроводность, как функция температуры;

q - удельная мощность тепловыделения;

$c(T)$ - удельная теплоемкость, задаваемая кубическим сплайном функция температуры;

ρ - плотность.

Все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели [5].

Исследование проводилось для трех значений высот секции: 20, 30 и 40 мм при коэффициенте теплоотдачи 1500 Вт/(м^2·К).

Эскиз секции индуктора с геометрическими размерами представлен на рисунке 1.

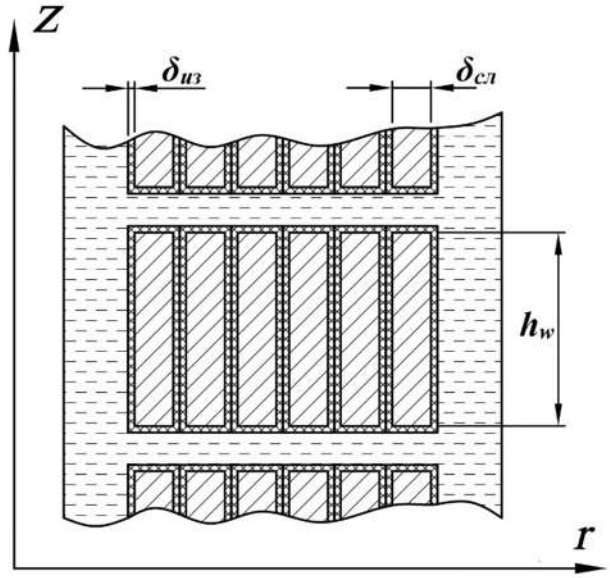


Рисунок 1 – Эскиз сечения секции индуктора: *h_w – высота секции, $\delta_{сл}$ – толщина слоя индуктора, $\delta_{из}$ – толщина электроизоляции*

На рис. 2 представлены результаты расчетов температурного распределения по слоям в шестислойном индукторе с высотой секции 20÷40 мм, в зависимости от меняющегося с ростом температуры удельного электрического сопротивления ($\rho_м$).

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, наиболее высокие температуры в процессе нагрева имеют слои с высотой секций индуктора равной 40 мм. Максимальная температура для среднего слоя (как наиболее «горячего») составляет около 75 °С. В

секции высотой 20 мм наблюдаются самые низкие температуры. Максимальная температура среднего слоя составляет 51 °С.

В процессе нагрева также наблюдается рост удельного электрического сопротивления, что влечет за собой повышение температуры в секции (по сравнению с уд. эл. сопр. при 20 °С, на графике указаны штрих-линией) и снижает энергетические параметры системы (около 4-6%). Так, например, КПД системы с высотой секции 30 мм составил около 58%, что ниже КПД системы с удельного электрического сопротивления индуктора при 20°С на 4%, значение cos φ выросло на 0,03 и составило 0,18.

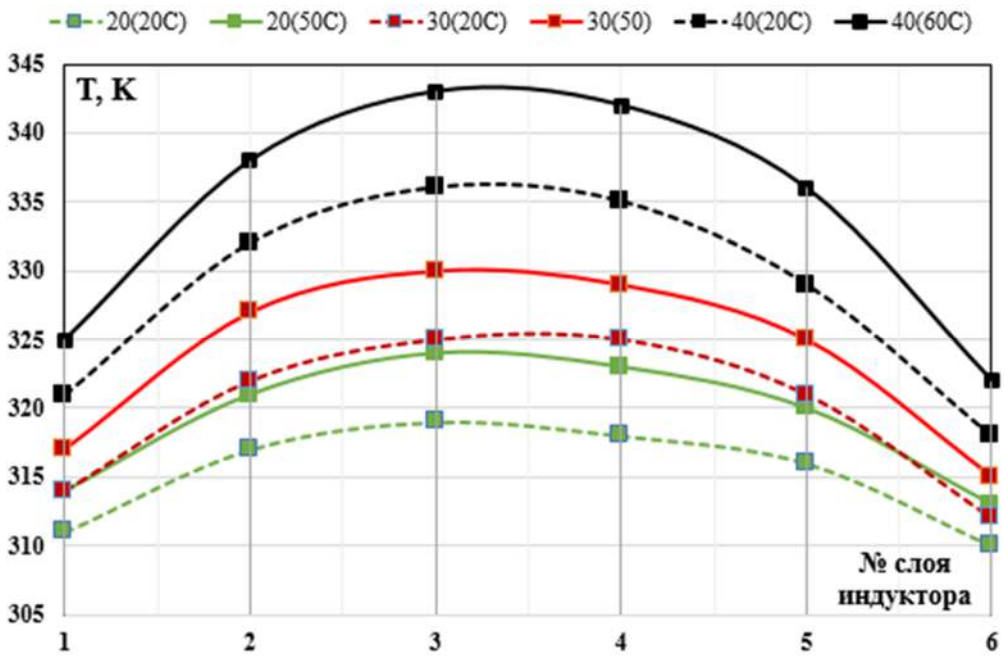


Рисунок 2 – Температура слоев секции высотой 20 ÷ 40 мм в зависимости от уд. эл. сопротивления индуктора $\rho_м$

Поскольку при проектировании таких многослойных индукционных нагревателей основными критериями являются эффективность их охлаждения и возможность реализации разработанного конструкционного решения, наиболее оптимальным вариантом для обмотки индуктора являются секции высотой 30 мм. При таких геометрических параметрах секции индуктора максимальная температура в центральных слоях не превышает 57 °С, что является допустимым значением температуры при проектировании индукционных установок.

Список источников

1. Немков В.С., Бендер Д.Б., Аркусский Л.Ю. и др. Многослойный водоохлаждаемый индуктор, А.С. 319966, BI 1971.

2. Григорьев В.А., Соколов М.М., Бродянский В.М., Кувалдин А.Б. и др. Исследование и разработка устройств для индукционного нагрева с использованием криогенной техники: отчет о НИР / М.: МЭИ, 1978. – 112 с.

3. Булгакова Е.С., Кувалдин А.Б., Федин М.А. «Оценка эффективности применения многослойных индукторов в индукционных установках для нагрева алюминиевых заготовок». «Вестник МЭИ», № 6, 2022.

4. Кувалдин А.Б., Булгакова Е.С. Исследование тепловых режимов многослойного индуктора с внешним охлаждением. Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XVIII международной научно-практической интернет-конференции (8 – 10 декабря 2020 г., г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева) / под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2020. 89– 92с.

5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя/ Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2010. – 345 с.

Булгакова Екатерина Сергеевна – аспирант кафедры электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: es.bulgakova@mail.ru. Тел. +79803692881
Кувалдин Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

---

621.365.5

INFLUENCE OF THERMAL CONDITIONS ON THE DESIGN PARAMETERS OF MULTILAYER INDUCTORS

Bulgakova E.S., Kuvaldin A. B.
Russia, Moscow, NRU «MPEI»

Summary. Theoretical studies of the temperature distribution over the layers of a multilayer inductor with external cooling for heating aluminum billets have been carried out. The calculations of the six-layer inductor used as an example were performed in the ELCUT software environment. Based on the results obtained, taking into account energy efficiency, the design parameters of multilayer inductor are selected and the requirements for its cooling system are formulated.

Keywords: multilayer inductor, aluminum billet, external cooling, temperature of inductor layers, energy efficiency.

References

1. Nemkov V.S., Bender D.B., Arkussky L.Yu., etc. Multilayer water-cooled inductor, A.S. 319966, BI 1971.
2. Grigoriev V.A., Sokolov M.M., Brodyansky V.M., Kuvaldin A.B., etc. Research and development of devices for induction heating using cryogenic technology: research report / M.: MPEI, 1978. – 112 p.
3. Bulgakova E.S., Kuvaldin A.B., Fedin M.A. "Evaluation of the effectiveness of the use of multilayer inductors in induction installations for heating aluminum billets". Bulletin of the MPEI, No. 6, 2022.
4. Kuvaldin A.B., Bulgakova E.S. Investigation of thermal modes of a multilayer inductor with external cooling. Energy and resource conservation – XXI century.: materials of the XVIII International Scientific and Practical Internet Conference (December 8-10, 2020, Orel, I.S. Turgenev OSU) / edited by Dr. of Technical Sciences, prof. A.N. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, prof. N. Kachanova, Doctor of Technical Sciences, professor Yu.S. Stepanova. – The Eagle: I.S. Turgenev OSU, 2020. 89– 92c.
5. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. User's Guide/ St. Petersburg: Production Cooperative TOR, 2010. – 345 p.

Bulgakova Ekaterina Sergeevna, post-graduate student of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies of the National Research University "MPEI". e-mail: es.bulgakova@mail.ru
Kuvaldin Aleksandr Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies of the National Research University "MPEI".
e-mail: a.kuvaldin2013@yandex.ru

УДК 621.365

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Кувалдин А.Б, Федин М.А., Молостова А.В., Зотов М.Л., Василенко А.И.
Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»

Аннотация. Приводятся комплексные исследования в решении проблемы повышения энергетической эффективности систем промышленного обогрева трубопроводов и обеспечения их электромагнитной совместимости с питающей сетью. На основе исследований разрабатывается способ симметрирования

© Кувалдин А.Б, Федин М.А., Молостова А.В., Зотов М.Л., Василенко А.И., 2022

однофазной нагрузки. Результаты работы позволяют существенно понизить коэффициенты несимметрии в системах питания электрообогрева.

Ключевые слова: электротехнологии, промышленный электрообогрев, индукционно-резистивная система нагрева, промышленные трубопроводы, электрооборудование, система управления, система электропитания, симметрирование нагрузки, преобразователь числа фаз.

Рисунок 1 – Макет ИРСН

Системы промышленного электрообогрева трубопроводов являются критически важной составляющей для безопасности объектов топливно-энергетического комплекса России. При транспортировке нефти и нефтепродуктов по трубопроводу необходимо поддерживать их температуру в заданном диапазоне, не допуская превышения нормы их вязкости, а также перегрева, который может привести к изменению или потери свойств продукта. Ввод новых и модернизация инфраструктуры старых нефтегазовых месторождений обязывает обеспечивать устойчивость температуры нефти и газа по ходу переработки, транспортировки и хранения. Большая протяженность теплоизолированных магистральных трубопроводов затрудняет реализацию этой задачи.

На сегодняшний день индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), основанные на использовании поверхностного эффекта и эффекта близости в электрических проводниках переменного тока, наиболее оптимизированы под задачи электрообогрева протяженных трубопроводов. Подача питания с одного конца обогреваемого участка позволяет отказаться от сопровождающей электросети. При использовании ИРСН можно регулировать температуру нагрева эффективно и безошибочно [1].

Современные ИРСН (рис. 1), как правило, являются однофазной нагрузкой, мощности которых могут достигать сотен киловатт. Для симметрирования однофазной промышленной нагрузки большой мощности требуется применение специальных технических средств. В целях снижения несимметрии потребляемого тока однофазной нагрузки большой мощности в трансформаторных подстанциях промышленных предприятий часто используются специальные симметрирующие электротехнические комплексы, в том числе выполненные на основе специальных трансформаторов.

В промышленности России существует опыт применения симметрирующих трансформаторов с различными схемами соединения обмоток. Активное развитие нефтяной и газовой промышленности в районы с более жесткими климатическими условиями привели к увеличению общей доли электрических нагрузок систем электрообогрева в суммарных электрических нагрузках предприятий.

Результаты сравнения современных схем электроснабжения для ИРСН показывают, что в качестве источника питания для них весьма целесообразно использование электромагнитного преобразователя числа фаз, спроектированного на основе схемы симметрирующего трансформатора (рис. 2).

В отличие от традиционного раздельного решения задач: обеспечения электромагнитной совместимости ИРСН с питающей сетью и повышением технологической эффективности ИРСН, в работе реализовано совместное решение обеих задач, что позволит достигнуть максимальной эффективности работы всей системы.

Электроэнергия на входе системы симметрирующего трансформатора имеет два независимых параметра – значения входных напряжений и угол фазового сдвига между

ними. Управляя этими параметрами можно осуществлять стабилизацию выходных фазных напряжений. Для расчета параметров и дальнейшего проектирования системы электроснабжения было проведено исследование электрических и энергетических характеристик ИРСН различной длины, мощности, с различными размерами прямого и обратного проводников и т.д.

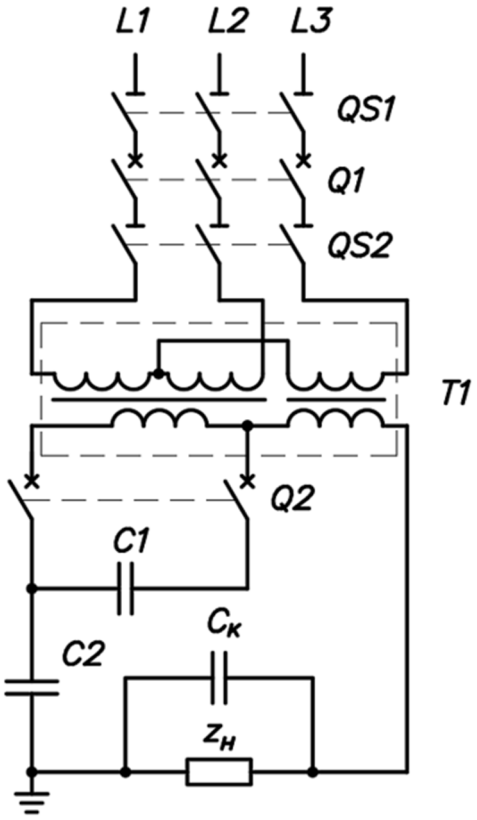


Рисунок 2 – Схема электроснабжения с применением симметрирующего трансформатора

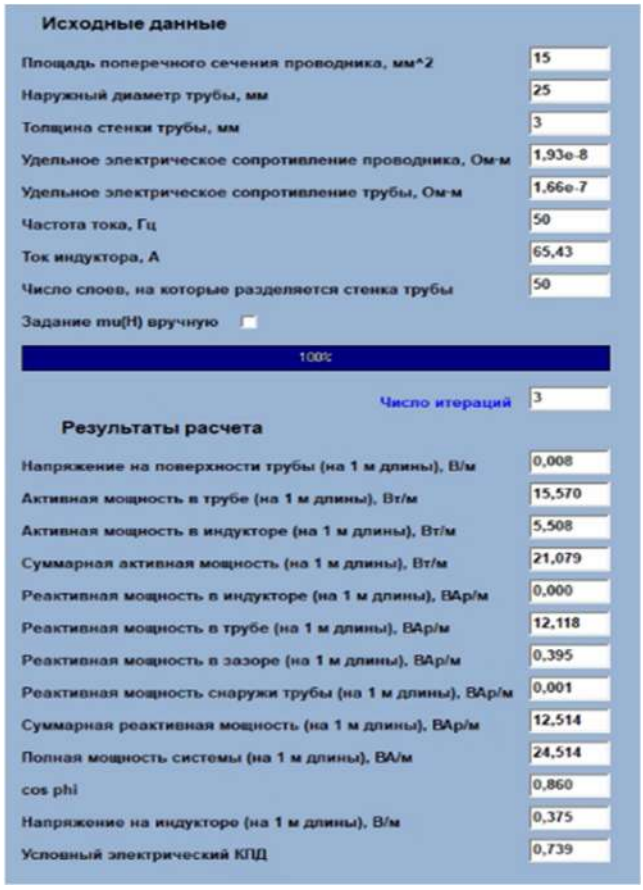


Рисунок 3 – Результаты расчета ИРСН

В качестве примера на рис. 3 приведены расчетные характеристики ИРСН в программе, разработанной авторами, а также определены параметры специального симметрирующего трансформатора (количество и способ соединения обмоток, числа витков и коэффициенты трансформации, величины компенсирующих и фазосдвигающих емкостей и т.д.) для ИРСН-систем в широком диапазоне изменения мощности и длины участка электрообогрева [2, 3]. Результаты исследования подтвердили возможность использования в качестве источника питания специального симметрирующего трансформатора.

С использованием программного пакета MATLAB Simulink была разработана математическая модель схемы электроснабжения для однофазной ИРСН с применением специального симметрирующего трансформатора.

Настройка симметрирующего устройства при однофазной нагрузке производится после завершения работ по монтажу и испытанию ИРСН. Перед включением питающего трехфазного напряжения необходимо проверить чередование фаз [4].

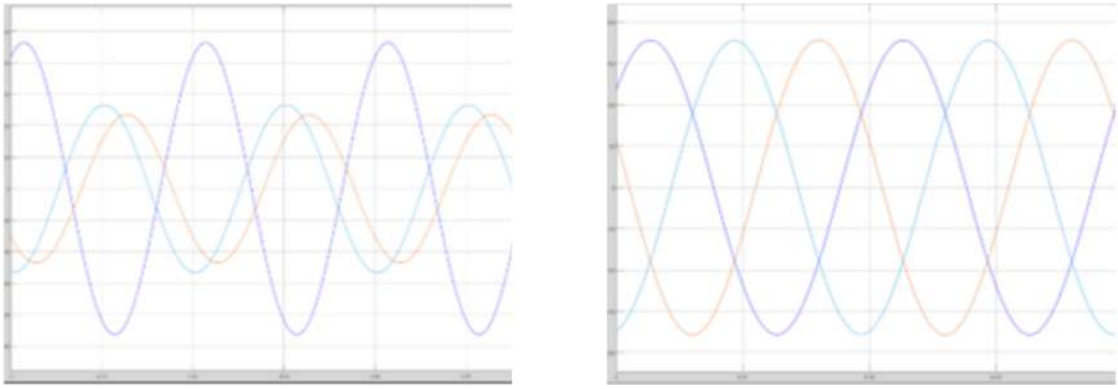
При подаче питающего напряжения по амперметрам питающих фаз контролируется равенство значений токов. Если значения токов в фазах не равны, то требуется настройка устройства, т.е. корректировка емкостей конденсаторов C_1 и C_2. Для этого измеряются: напряжение $U_н$ и ток нагрузки $I_н$, коэффициент мощности $\cos\varphi$. Емкости C_1 и C_2 представляют собой конденсаторные батареи, состоящие из некоторого количества конденсаторов, что позволяет корректировать емкость каждой батареи при наладке системы обогрева на объекте.

Подставляя измеренные или рассчитанные в программе значения $U_н$, $I_н$ и $\cos\varphi$, находим фактические значения активного сопротивления R и индуктивность L нагрузки:

$$R_н = \frac{U_н \cdot \cos\varphi}{I_н};$$

$$L_н = \frac{\frac{U_н}{I_н} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{2\pi f}.$$

В разработанную модель в программе MATLAB Simulink подставляются вычисленные значения $R_н$ и $L_н$. Корректируя значения емкости конденсатора C_1, выравнивают значение падения напряжения на конденсаторе C_1 и индуктивности нагрузки. Подбором емкости конденсатора C_2 выравнивают токи на выходных выводах трансформатора и питающих фазах $I_A = I_B = I_C$ (рис. 4).



а *б*

Рисунок 4 – Временные диаграммы фазных токов ИРСН без симметрирования (а) и с использованием симметрирующего трансформатора (б)

Полученные значения емкости конденсаторов C_1 и C_2 устанавливаются на симметрирующем устройстве.

Обеспечение бесперебойного круглогодичного функционирования месторождений и трубопроводов возможно при наличии системы электрообогрева. Разработанная модель источника питания с использованием специального симметрирующего трансформатора позволяет симметрировать токи в питающей сети с высокой точностью. Трансформатор обеспечивает на выходе форму напряжения, близкую к синусоидальной. На основе проведенных исследований осуществляется разработка способа симметрирования однофазной нагрузки и улучшения электрических характеристик ИРСН. Результаты работы позволяют существенно понизить коэффициенты несимметрии в системах электропитания промышленного обогрева.

Список источников

1. Хренков Н.Н., Струпинский М.Л., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли/ Инфра-Инженерия, 2015.

2. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве // Журнал «Индукционный нагрев», № 13, 2010. С. 17-21.

3. Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Шатов В. А. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах // Электричество, № 11, 2005. С. 56-61.

4. Струпинский М.Л., Есехин В.М. Устройство питания для двухфазных индукционно-резистивных нагрузок, обеспечивающее симметрию первичной трехфазной цепи. Патент RU 2290740. Заявлен 02.12.2005, опубликован 27.12.2006.

Кувалдин Александр Борисович, академик АЭН Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: KuvaldinAB@mpei.ru.
Федин Максим Андреевич, д-р. техн. наук, профессор кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: FedinMA@mpei.ru, тел. +7(916)762-06-91
Молостова Анастасия Вячеславовна, аспирант кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: MolostovaAV@mpei.ru, тел.: +7(915)1070761
Зотов Максим Леонидович, студент 4 курса кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: ZotovML@mpei.ru
Василенко Александра Ильинична, студент 4 курса кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: VasilenkoAI@mpei.ru

---

UDC 621.45.038.72

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PHASE NUMBER CONVERTER FOR INDUCTION-RESISTIVE INDUSTRIAL PIPELINE HEATING SYSTEM

Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Molostova A.V., Zotov M.L., Vasilenko A.I.
Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute

Summary. Comprehensive research in solving the problem of increasing the energy efficiency of industrial pipeline heating systems and ensuring their electromagnetic compatibility with the power grid is given. On the basis of research the way of single-phase load symmetrization is developed. The results of the work make it possible to significantly reduce the asymmetry coefficients in electric heating supply systems.

Keywords: electrotechnology, industrial electric heating, induction resistive heating system, industrial pipelines, electrical equipment, control system, power supply system, load balancing, phase number converter.

References

1. Khrenkov N.N., Strupinsky M.L., Kuvaldin A.B. Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry / Infra Engineering, 2015.
2. Kuvaldin A.B., Strupinsky M.L., Khrenkov N.N., Fedin M.A. Modeling of electromagnetic field in ferromagnetic steel during induction, electrocontact and combined heating // Journal of Induction Heating, No 13, 2010. C. 17-21.
3. Kuvaldin A. B., Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Shatov V. A. Mathematical models for the study of the electromagnetic field in ferromagnetic conducting media // Electricity, No. 11, 2005. pp. 56-61.
4. Strupinsky M.L., Yesekhin V.M. Power supply device for two-phase inductive-resistive loads providing symmetry of the primary three-phase circuit. Patent RU 2290740. Registered 02.12.2005, published 27.12.2006.

Kuvaldin Alexander Borisovich, AEN Academician of the Russian Federation, doctor of technical sciences, professor of EPPE Department of NRU "MPEI ". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: KuvaldinAB@mpei.ru
Fedin Maxim Andreevich, doctor of technical sciences, professor of EPPE Department of NRU "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: FedinMA@mpei.ru
Molostova Anastasiya Vyacheslavovna, postgraduate student of EPPE Department of NRU "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: MolostovaAV@mpei.ru
Zotov Maxim Leonidovich, 4th year student of the EPPE Department, National Research University "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: ZotovML@mpei.ru
Vasilenko Alexandra Ilyinichna, 4th year student of the EPPE Department, National Research University "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: VasilenkoAI@mpei.ru

УДК 621.365.41

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО КОСВЕННОМУ ПАРАМЕТРУ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Булгаков А.С., Погребисский М.Я.
Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»

Аннотация. Необходимым условием качества технологических процессов, проводимых в электропечах сопротивления (ЭПС), а также энергоэффективности печной установки является автоматическое регулирование температурного режима с высокой точностью. Рассмотрен способ регулирования температуры по косвенному параметру электрического сопротивления нагревателя, применимый в высокотемпературных вакуумных ЭПС с нагревательными элементами из тугоплавких металлов. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования процессов регулирования температуры по косвенному параметру.

Ключевые слова: высокотемпературные электрические печи сопротивления, регулирование температуры, косвенный параметр сопротивления нагревателя, износ нагревателей.

Современные электротехнологические установки, применяемые в высокотехнологичных отраслях промышленности и в научных исследованиях, предъявляют повышенные требования к точности и качеству автоматического регулирования температурного режима. Значительные трудности в осуществлении такого регулирования возникают в высокотемпературных (свыше 1800°С) вакуумных электропечах сопротивления (ЭПС) из-за весьма низкой механической и термической стойкости используемых датчиков температуры, прежде всего, термоэлектрических преобразователей (термопар), в этом температурном диапазоне. Предельная температура применения термопар на практике также ограничена электроизоляционными свойствами изолирующей керамики.

Использование в качестве датчиков температуры пирометров излучения в вакуумных печах с экранной теплоизоляцией крайне затруднено отсутствием прямой видимости рабочего пространства.

Таким образом, прямое измерение температуры в высокотемпературных (свыше 1800°С) вакуумных ЭПС практически невозможно. Поэтому организация замкнутой системы регулирования температуры в таких печах возможна только при использовании принципа регулирования по косвенному параметру. В качестве косвенного параметра удобно использовать удельное электрическое сопротивление материала нагревателя. Этот способ применим к печам, нагреватели которых изготовлены из материала, имеющего монотонную зависимость удельного сопротивления от температуры (к таким материалам относятся, в частности, молибден, вольфрам и другие тугоплавкие металлы). Так, сопротивление нагревателей из вольфрама значительно (в 10-15 раз) увеличивается при росте температуры от комнатной до рабочей, причем температурная зависимость сопротивления практически линейна.

При организации регулирования температуры по косвенному параметру удельного электрического сопротивления следует иметь в виду, что прямое измерение удельного сопротивления также невозможно, можно получить лишь активное сопротивление, как отношение действующих значений активных составляющих тока и напряжения. Температура нагревателя рассчитывается по известной функциональной зависимости удельного электрического сопротивления материала нагревателя (например, вольфрама) ρ от температуры *T*. В свою очередь, удельное сопротивление (для случая нагревателя круглого сечения) определяется как

$$\rho = \frac{U_a}{I_a} \cdot \frac{\pi d^2}{4L} \ , \qquad (1)$$

где U_a, I_a – измеренные значения активных составляющих первых гармоник напряжения и тока, d, L – диаметр и развернутая длина нагревательного элемента. Таким образом, для

© Булгаков А.С., Погребисский М.Я., 2022

расчета удельного сопротивления необходимо вычислить текущее значение диаметра нагревателя *d*, учитывая его уменьшение в ходе эксплуатации вследствие износа нагревателя. Функциональная схема системы регулятора температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей представлена на рис. 1. Объектом управления является высокотемпературная вакуумная печь сопротивления 1, исполнительным устройством системы регулирования температуры традиционно служит тиристорный регулятор напряжения 2. Блок определения удельного сопротивления 3 рассчитывает удельное сопротивление материала нагревателей на основе сигналов датчиков напряжения 4 и тока 5 с учетом поправки на износ нагревателей, рассчитываемой блоком введения поправки 7.

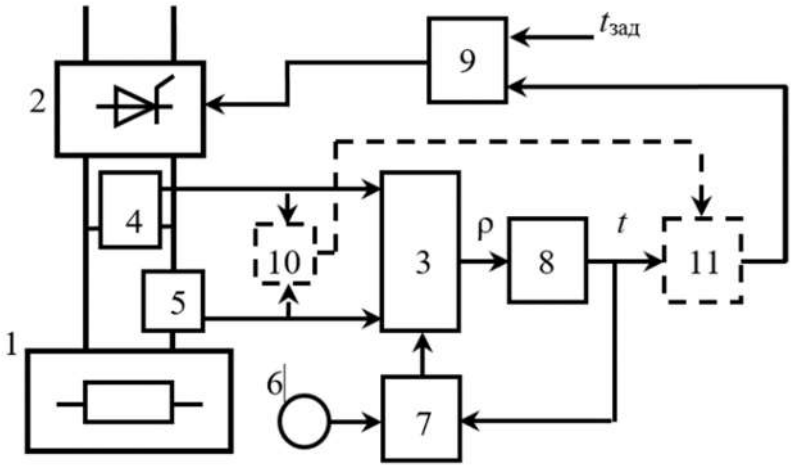


Рисунок 1 – Функциональная схема системы регулирования температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей

Алгоритм расчета поправки блоком 7 строится на основании предложенной модели процессов износа нагревателей. Блок 7 определяет мгновенное значение скорости массоуноса материала нагревателей в соответствии с температурой и давлением (датчик давления 6) и рассчитывает в реальном времени текущий диаметра (сечение) нагревателя, которое учитывается блоком определения удельного сопротивления 3. Блок расчета температуры нагревателя 8 определяет текущее значение температуры в соответствии с известной зависимостью $T(\rho)$. Это значение температуры используется традиционным регулятором температуры (например, с ПИД-законом регулирования) 9 в качестве сигнала обратной связи, а также передается блоку введения поправки 7 для определения мгновенной скорости массоуноса. Дополнительно используя блок измерения мощности 10 и блок расчета температуры печи 11, возможно пересчитать температуру нагревателя в температуру печи или загрузки на основании законов теплопередачи излучением, зная потребляемую мощность [3].

Функциональные блоки определения удельного сопротивления, введения поправки на износ нагревателя и регулятор температуры реализуются с использованием микропроцессорных средств управления.

Механизм износа нагревательных элементов вакуумных ЭПС, изготовленных из чистых металлов (вольфрам, молибден), и модель, используемая системой регулирования по косвенному параметру для вычисления поправки на износ нагревателей, были подробно рассмотрены в [3].

Разработана и реализована в среде *MATLAB/Simulink* структурная математическая модель температурного режима вакуумной ЭПС с регулированием температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей с учетом старения нагревателей. Модель учитывает влияние изменения площади поверхности нагревателя и его сечения вследствие уноса материала в вакууме на измеряемую величину активного сопротивления и условия

теплообмена в печи. На модели получены временные зависимости площади сечения нагревателя и температур нагревателя и печи (внутреннего экрана) в ходе эксплуатации. Модель позволяет прогнозировать срок службы нагревателей, исходя из условия воспроизводимости технологического процесса.

Экспериментальная проверка предложенного способа регулирования температуры печи по косвенному параметру сопротивления нагревателей с учетом массоуноса осуществлялась на вакуумной ЭПС СНВЭ-1.3.1/16И5, оснащенной системой регулирования по косвенному параметру, реализованной на программируемом промышленном контроллере. Значение температуры печи (внутреннего экрана), рассчитанное по косвенному параметру, сравнивалось со значением, измеренным контрольной термопарой (рис. 2).

Технологический процесс печи включал стадии: нагрев с постоянной мощностью 8% номинала до температуры печи 250°С; нагрев с постоянной скоростью 1000°С/час до температуры печи 1100°С; выдержка в течение 5 минут при постоянной температуре 1100°С; естественное остывание печи.

Совпадение рассчитанного по косвенному параметру и измеренного значений температуры достаточно хорошее. Так, при выдержке при постоянной температуре 1100°С различие не превышает 15°С (примерно 1%).

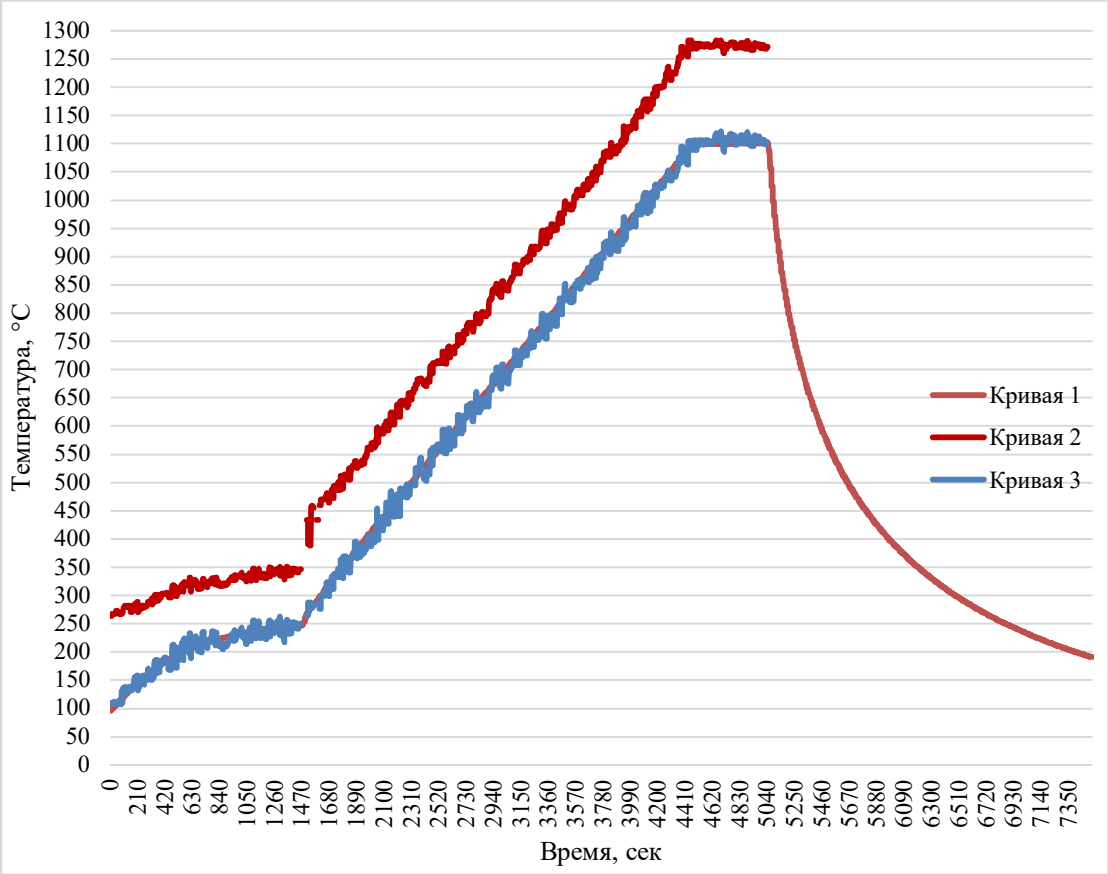


Рисунок 2 – Зависимость измеренной температуры печи (кривая 1) и рассчитанных по косвенному параметру температур нагревателя (кривая 2) и печи (кривая 3) от времени

Таким образом, экспериментальная проверка способа определения температуры по косвенному параметру на печи СНВЭ-1.3.1/16И5 подтвердила работоспособность системы и адекватность математической модели, положенной в основу регулирования температуры электропечи по косвенному параметру электрического сопротивления нагревателей. Автоматическое регулирование температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей можно рекомендовать к применению в высокотемпературных печах.

Список источников

1. Улановский А.А. Метрологическая стабильность термоэлектрических преобразователей (термопар) для измерения высоких температур // КИП и автоматика, № 2, 2003.
2. Reàl J. Fradette. Accurate temperature measurement of both the furnace hot zone and the workload is critical for a successful heat-treat process cycle. Various types of thermocouples are used to record and control the furnace temperature and monitor and record the workload temperature during the heat-treat process // INDUSTRIAL HEATING September 9, 2015.
3. Pogrebisskiy, M.Y., Bodarev, A.I., Salmanova, E.F., Bulgakov, A.S. Modelling of degradation processes for refractory metallic heating elements of vacuum resistance furnace // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 313 (2018) 012011. APEET 2018 – IOP Publishing, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/313/1/012011.
4. Булгаков А.С., Погребисский М.Я. Исследование процесса регулирования температуры по косвенному параметру в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Промышленная энергетика, № 4, 2022. С. 13-19.

Булгаков Андрей Сергеевич, аспирант кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: andbull@mail.ru
Погребисский Михаил Яковлевич, канд. техн. наук, доцент, директор института электротехники и электрификации, доцент кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

---

UDC 621.365.41

INDIRECT TEMPERATURE CONTROL IN HIGH TEMPERATURE RESISTANCE ELECTRIC FURNACES

Bulgakov A.S., Pogrebisskiy M.Ya.
Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute

Summary. Automatic temperature control with high accuracy is a prerequisite for the quality of processes carried out in resistance electric furnaces (REF), as well as the energy efficiency of the furnace unit. Method of temperature control by indirect parameter of electric resistance of heater is considered, which is used in high-temperature vacuum REF with heating elements from refractory metals. The results of theoretical and experimental study of temperature control processes by indirect parameter are presented.

Keywords: high-temperature resistance electric furnaces, temperature control, indirect parameter of heater resistance, heating wear.

References

1. Ulanovskiy, A.A. Metrological stability of thermoelectric transducers (thermocouples) for measuring high temperatures // Instrumentation and Automation, No. 2, 2015.
2. Reàl J. Fradette. Accurate temperature measurement of both the furnace hot zone and the workload is critical for a successful heat-treat process cycle. Various types of thermocouples are used to record and control the furnace temperature and monitor and record the workload temperature during the heat-treat process // INDUSTRIAL HEATING September 9, 2015.
3. Pogrebisskiy, M.Y., Bodarev, A.I., Salmanova, E.F., Bulgakov, A.S. Modelling of degradation processes for refractory metallic heating elements of vacuum resistance furnace // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 313 (2018) 012011. APEET 2018 – IOP Publishing, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/313/1/012011.
4. Bulgakov, A.S., Pogrebisskiy, M.Ya. Study of temperature control process by indirect parameter in high-temperature vacuum resistance furnaces // Industrial energy, No. 4, 2022, pp. 13-19.

Bulgakov Andrey Sergeevich, graduate student of the EPPE Department, National Research University "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: andbull@mail.ru
Pogrebisskiy Mikhail Yakovlevich, Candidate of Technical Sciences, docent, director of Institute of Electrical Engineering and electrification, associate professor of EPPE Department, National Research University "MPEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

УДК 621.365.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Королева Т.Г., Щербаков Н.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Аннотация. В статье показана энергетическая эффективность использования бегущего электромагнитного поля для нагрева металла в тигельных печах. Выполнен анализ составляющих потерь электроэнергии в тигельной печи. Сформулированы основные преимущества использования бегущего электромагнитного поля для нагрева металла. Исследовано влияние встречного и согласного включений обмоток индукторов на распределение электромагнитных и тепловых полей.

Ключевые слова: тигельные печи, бегущее электромагнитное поле, равномерное распределение температуры.

Одним из направлений энергетической политики Российской Федерации является повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов [1,2]. Одной из самых энергоемких сфер жизнедеятельности человека является промышленность, на долю которой приходится около 50 % потребляемых энергоресурсов. Среди наиболее энергоемких отраслей особое место занимает тяжелое машиностроение, где применяются различные термические установки. Особое значение следует уделить энергоемким плавильным установкам, к которым относятся тигельные печи. Энергетически баланс тигельной печи приведен на рисунке 1 [3].

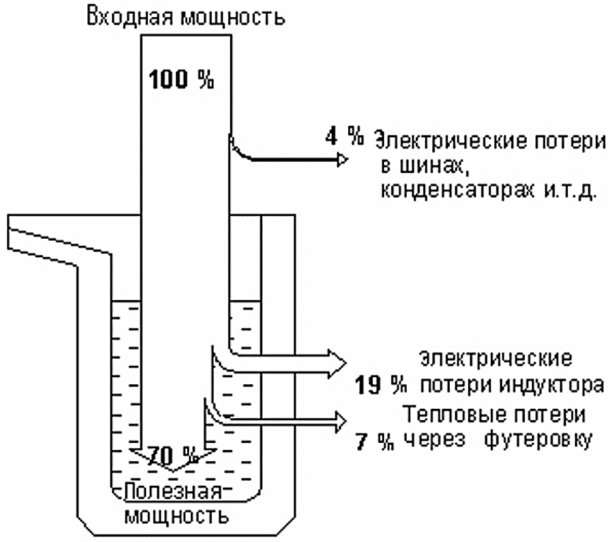


Рисунок 1 – Энергетический баланс индукционной тигельной печи

Как показано на рисунке 1 на полезную мощность приходится порядка 70 % потребляемой мощности. За счет применения специальных теплоизоляционных материалов можно минимизировать тепловые потери через футеровку (около 7 %), а также уменьшить электрические потери индуктора, используя его нагрев на отопление вспомогательных систем и процессов. В результате КПД установки можно повысить до 80-90 % [4].

Полезную мощность можно разделить на две составляющие:

- мощность, затрачиваемую на плавление металла и дальнейшее поддержание его температуры;
- мощность, затрачиваемую на перемешивание металла.

Индукционный нагрев бегущим электромагнитным полем по сравнению с другими способами нагрева (пламенным или электродуговым) имеет ряд существенных преимуществ таких как [5, 6]:

- обеспечение равномерного распределения температурного поля по всему объему нагреваемого расплава;
- отсутствие загрязнения окружающей среды;
- низкий уровень шума;
- малые затраты на футеровку печи.

Следует отметить, что применение бегущего электромагнитного поля для

© Королева Т.Г., Щербаков Н.А., 2022

перемешивания металла в тигельных печах позволит добиться равномерного химического состава металла, а также ускорить процесс выделения вредных веществ из расплава.

Для экономии электроэнергии при плавке металла в тигельных печах необходимо оптимизировать конструкцию индукционной установки. С этой целью предлагается использовать вместо индуктора с одной обмоткой несколько индукторов с обмотками, соединяемыми определенным образом для создания регулируемого бегущего электромагнитного поля. При этом отпадает необходимость использования дополнительных устройств для перемешивания расплавленного металла. Такая оптимизация обеспечит:

- экономию проводникового материала;
- сокращение интервала плавки и, как следствие, уменьшится энергоемкость процесса;
- повышение качества выплавляемого металла.

Принципиальная схема подключения обмоток Ш-образных индукторов приведена на рисунке 2 [7].

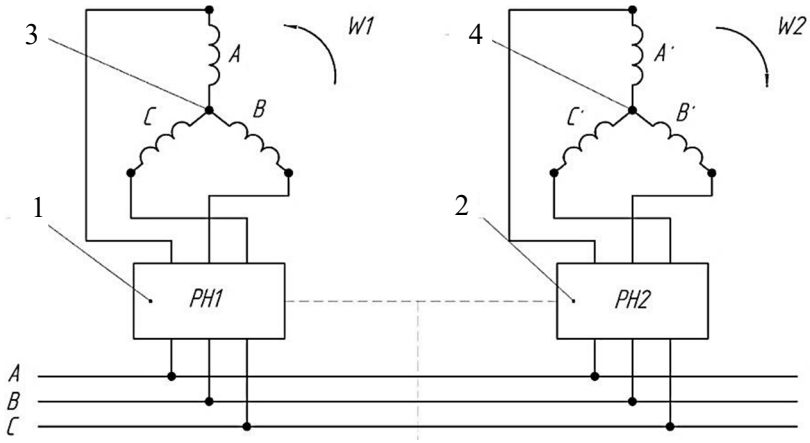


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема подключения обмоток индукторов к питающей сети

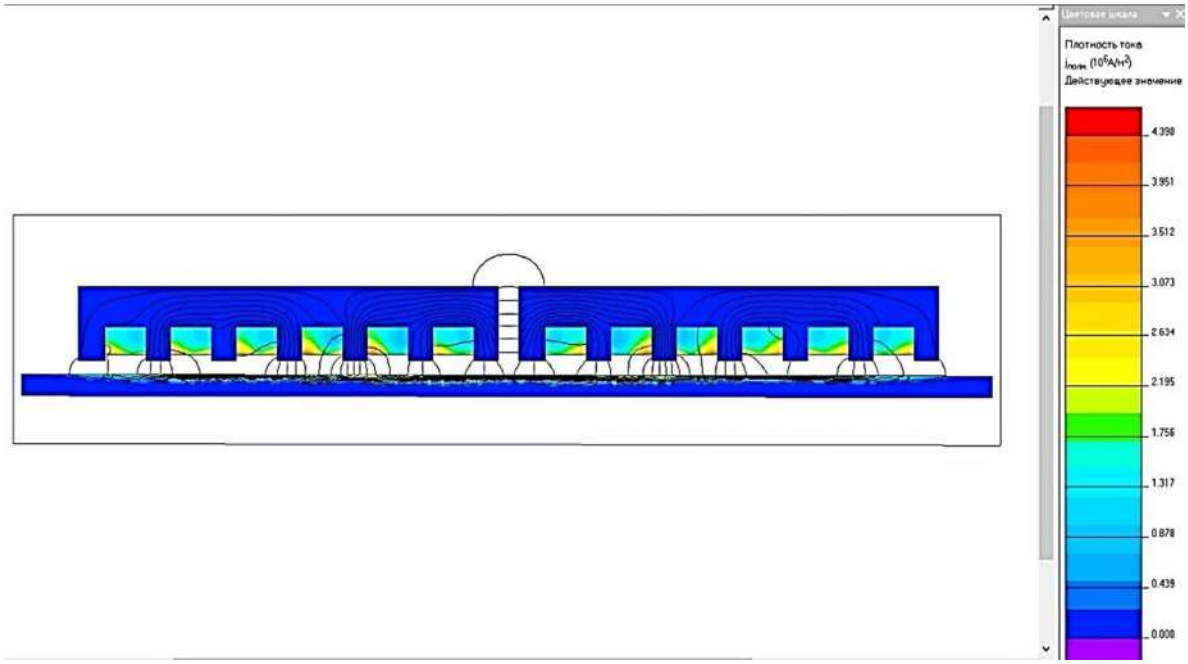


Рисунок 3 – Картина распределения плотности тока при встречном включении обмоток индукторов (для значения силы тока 500 А)

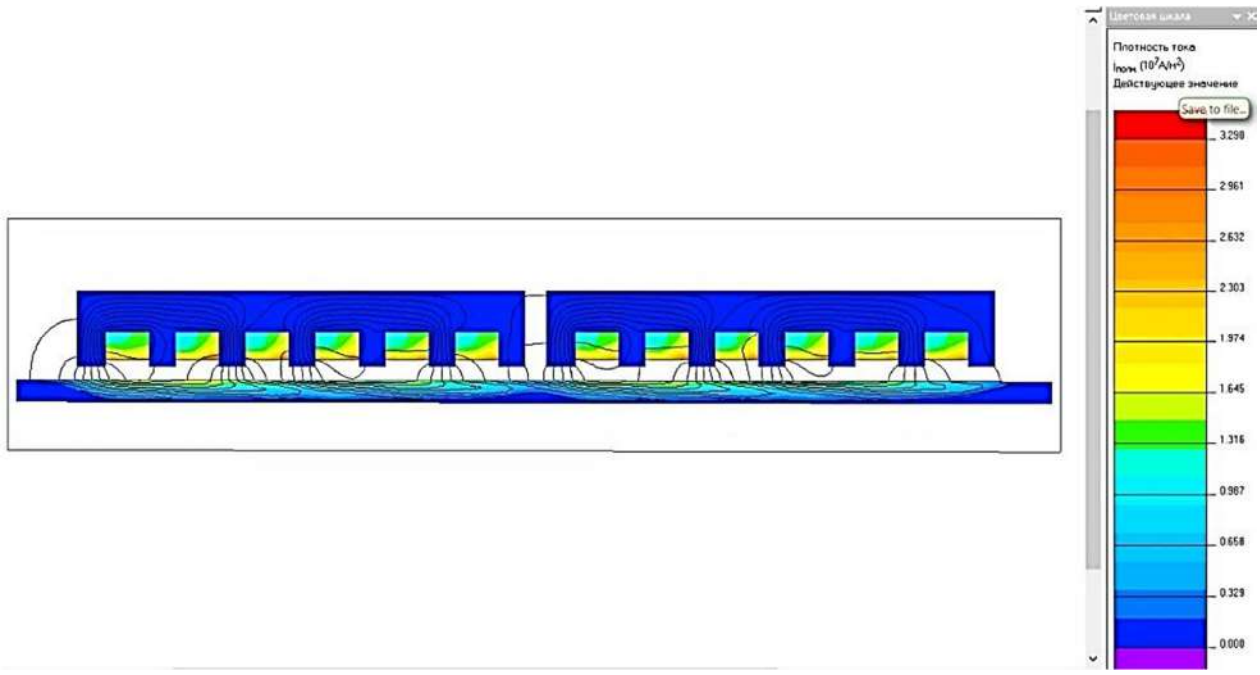


Рисунок 4 – Картины распределения плотности тока при согласном включении обмоток индукторов (для значения силы тока 500 А)

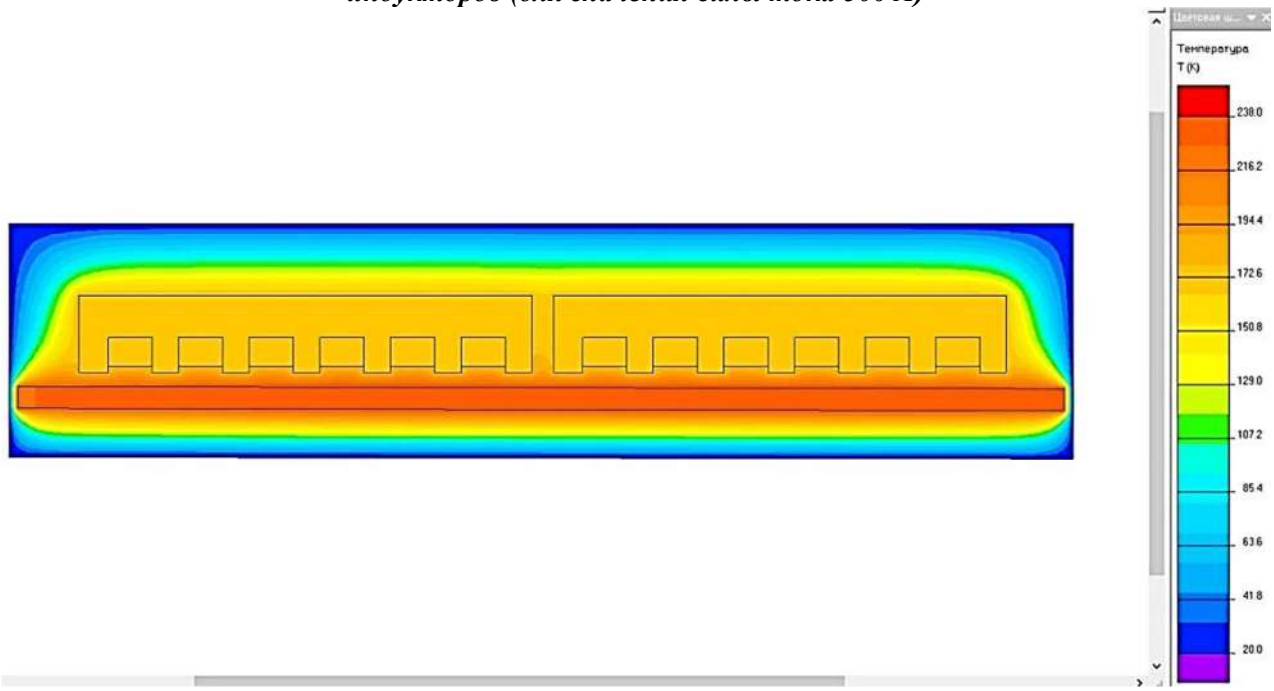


Рисунок 5 – Картины распределения температурного поля при встречном включении обмоток индукторов (для значения тока 500 А)

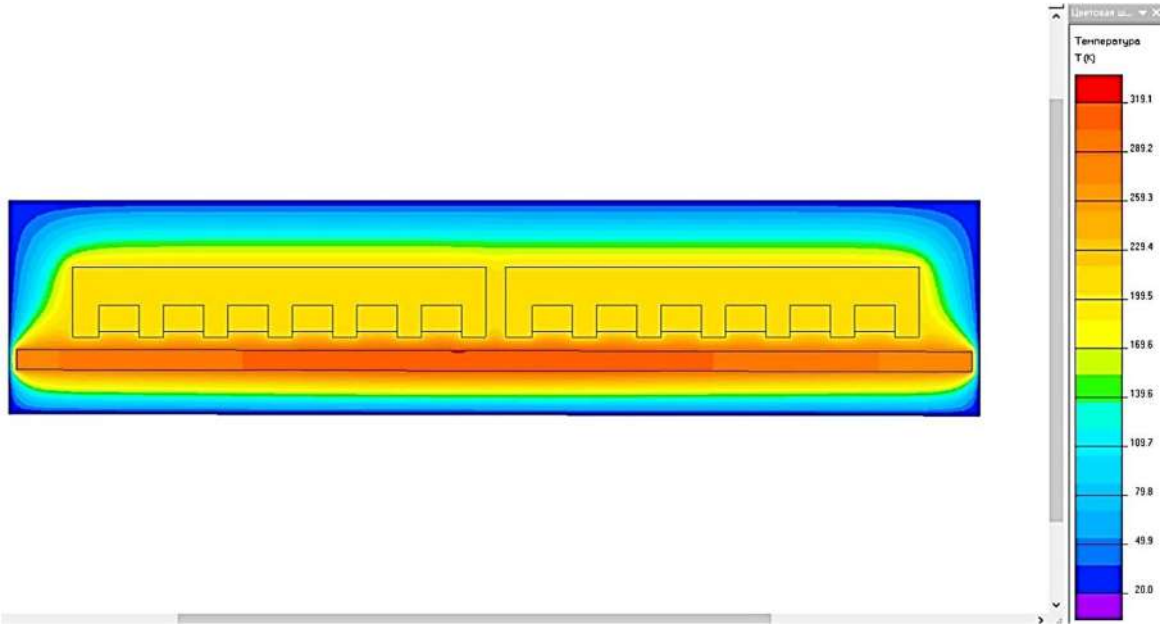


Рисунок 4 – Картины распределения температурного поля при согласном включении обмоток индукторов (для значения тока 500 А)

Возможность регулирования напряжения позволяет изменять напряженность электромагнитного поля, а встречное и согласное включение обмоток – изменять скорость перемешивания расплава. Регуляторы напряжения 1 и 2 обеспечивают изменение конфигурации наводимых полей. При этом напряжение на обмотке 3 должно быть выше, чем на 4 обмотке, чтобы избежать реверса. При равенстве напряжений и встречном включении скорость вращения будет равна нулю [7].

Используя математическую модель исследуемого объекта, созданную при использовании программных комплексов «Elcut» и «Mathcad», получены картины распределения плотности тока (рисунки 3 и 4) и температурных полей (рисунки 5 и 6) при встречном и согласном включении обмоток индукторов.

На основании результатов моделирования в программной среде «Elcut» определено, что при встречном включении обмоток индукторов тяговые силы будут направлены встречно (при этом в расчете принимается сила индуктора 2 отрицательной). Воздействие, оказываемое на пластину, будет наименьшим в точке между индукторами (в координате x = 215 мм F = 0 Н). При согласном включении обмоток индукторов тяговая сила будет оказывать наибольшее воздействие в центральной зоне пластины (от 100 до 330 мм), что приходится на пространство между индукторами. Кроме того, максимальное единичное значение приложенной силы при согласном включении будет в 1,5 раза больше, чем при встречном.

Из картин распределения температурного поля видно, что при встречном включении обмоток индукторов температура нагрева меньше, однако и меньше неравномерность распределения температур (перепад температур не превышает 10 ^{0}С). При согласном включении максимальное значение температуры возрастает, однако возрастает и неравномерность распределения температур (разница температур составляет 38 ^{0}С).

Таким образом, при применении индукторов с бегущим электромагнитным полем возможно обеспечить равномерное распределение теплового поля и равномерный химический состав расплава, а также уменьшить энергоемкость процесса плавления.

Список источников

1. Об энергосбережении и энергетической эффективности [Текст]: Федеральный закон Российской Федерации от 23.11.09 г. № 261-ФЗ.

2. Антонов, Н.В. Электропотребление России в 2008 году: вхождение в кризис [Текст] / Н.В. Антонов, Л.И. Татевосова// Электрика. – 2010. - №5. – С. 3 – 12.
3. Фомин, Н. И. Электрические печи и установки индукционного нагрева [Текст] / Н. И., Фомин, Л. М. Затуловский - Москва: "Металлургия", 1989 – 247 с.
4. Ткаченко, С. С. Проблемы модернизации литейного производства станкостроения [Текст] / С.С. Ткаченко, В. С. Кривицкий. – 2012 г. № 5.
5. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов/ И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; под редакцией А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982 – 400 с., ил.
6. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи/ А.М. Вайнберг - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 456 с.
7. Качанов, А. Н. Классификация и область применения систем низкотемпературного индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами [Текст] / А. Н. Качанов, Н. А. Качанов, Д. А. Коренков // В сб.: Вестник МЭИ. – Москва: Изд-во МЭИ. – 2016. – С. 36 – 40

Королева Татьяна Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭиЭ ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». 302020, Орёл, Наугорское шоссе 29. E-mail: tgkoroleva@mail.ru
Щербаков Николай Александрович, магистрант, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». 302020, Орёл, Наугорское шоссе 29. E-mail: nikolai.shcherbakov.ee@mail.ru.

UDC 621.365.5

THE USE OF A TRAVELING ELECTROMAGNETIC FIELD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A CRUCIBLE FURNACE

Koroleva Tatiana Gennadievna
Shcherbakov Nikolai Alexandrovich
Russia, Orel, Oryol State University named after I.S. Turgenev

Summary. The article shows the energy efficiency of using a traveling electromagnetic field for heating and mixing metal in crucible furnaces. The analysis of the components of electricity losses in a crucible furnace is carried out. The main advantages of using a traveling electromagnetic field for heating and mixing metal are formulated. The influence of the counter and consonant inclusions of the inductor windings on the distribution of electromagnetic and thermal fields is investigated.

Keywords: crucible furnaces, traveling electromagnetic field, mixing of metal, uniform temperature distribution.

References

1. On energy saving and energy efficiency [Text]: Federal Law of the Russian Federation No. 261-FZ of 23.11.09.
2. Antonov, N.V. Power consumption of Russia in 2008: entering the crisis [Text] / N.V. Antonov, L.I. Tatevosova// Electrician. - 2010. - No. 5. – p. 3-12.
3. Fomin, N. I. Electric furnaces and induction heating installations [Text] / N. I., Fomin, L. M. Zatulovsky - Moscow: "Metallurgy", 1989 – 247 p.
4. Tkachenko, S. S. Problems of modernization of foundry production of machine tools [Text] / S.S. Tkachenko, V. S. Krivitsky. – 2012 No. 5.
5. Electrotechnological industrial installations: Textbook for universities / I.P. Evtyukova, L.S. Katsevich, N.M. Nekrasova, A.D. Svenchansky; edited by A.D. Svenchansky. – M.: Energoizdat, 1982 – 400 p., ill.
6. Vainberg, A.M. Induction melting furnaces/ A.M. Vainberg - M. - L.: Gosenergoizdat, 1960. - 456 p.
7. Kachanov, A. N. Classification and scope of low-temperature induction heating systems with open magnetic circuits [Text] / A. N. Kachanov, N. A. Kachanov, D. A. Korenkov // In the collection: Bulletin of the MEI. – Moscow: Publishing House of MEI. – 2016. – p. 36 – 40

Koroleva Tatiana Gennadievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, 302020. E-mail: tgkoroleva@mail.ru
Shcherbakov Nikolai Alexandrovich, Master's student, FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev ", Orel, Naugorskoe highway, 29. 302020. E-mail: nikolai.shcherbakov.ee@mail.ru.

СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ

Руководитель:
Качанов Александр Николаевич, академик АЭН Российской Федерации, Заслуженный работник высшего образования Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, зав. каф. электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

УДК 621.333

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОПОЛОГИЙ

В.Н. Антипов, А.Д. Грозов, А.В. Иванова
Россия, Санкт-Петербург, Институт химии силикатов РАН

Аннотация. Представлено исследование процесса теплообмена и распределение температуры в поперечном сечении вентильно-индукторных тяговых двигателей различной магнитной топологии закрытого и защищенного исполнений. Разработана дополнительная подпрограмма расчета потерь на вихревые токи, встроенная в программный пакет расчета электромагнитного поля ELCUT, выполнено моделирование магнитного и теплового полей при различных граничных условиях. Оценены допустимые плотности тока для закрытых и защищенных двигателей.

Ключевые слова: вентильно-индукторный тяговый двигатель, процессы теплообмена, распределение температуры, моделирование типовых режимов работы, анализ параметров

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) были в центре внимания многих исследований за последние три десятилетия [1]–[6]. Основными преимуществами ВИД являются их надежность, простота и низкая стоимость изготовления. Реактивно-регулируемый электропривод на основе ВИД обладает очень привлекательными преимуществами, но требует больших усилий для создания двигателя с высокими техническими показателями [8]–[11]. Теория вращающегося магнитного поля и хорошо разработанные методы расчета вращающихся электрических машин неприменимы к ВИД, и в литературе отмечается сложность решения задачи расчета двигателя с высокими техническими показателями. Многочисленные исследования почти преодолели этот недостаток.

Целью данного исследования является изучение процессов теплообмена в вентильно-индукторных тяговых двигателях различной магнитной топологии (отношение числа зубцов статора к числу зубцов ротора равное 6/4, 12/8 и 8/6) и определение предельных значений плотности тока для ВИД при различных способах их охлаждения.

Для исследования выбраны тяговый двигатель троллейбуса ВИД-180-1500 (180 кВт, 550 В, 1500/3420 мин$^{-1}$) с топологией 12/8, тяговый двигатель шахтного аккумуляторного электровоза ВИД-14-615 (14 кВт, 145 В, 615/1230 мин$^{-1}$) и лабораторная модель вентильно-индукторного двигателя ВИД-1.5-1130 (1,5 кВт, 300 В, 1130 мин$^{-1}$), созданная в ИХС РАН для проверки режимов работы тягового привода. Результаты исследования этих машин ранее публиковались в печати, и основные их параметры представлены в таблице 1.

Разработка ВИД выполнена на принципах блочно-модульного проектирования, применение которых обеспечивает минимум производственных и финансовых затрат при переходе на новый более прогрессивный привод. Блочно-модульное проектирование двигателя означает, что выбран базовый прототип освоенного промышленностью двигателя

© Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В., 2022

и сохранены все необходимые узлы и детали (корпус, вал, подшипники, щиты и т.д.) за исключением вновь разработанных катушек статора, пакетов статора и ротора, а также

Таблица 1 – Основные параметры тяговых двигателей, выбранных для исследования

Параметры	ВИД-180-1500	ВИД-14-615	ВИД-1,5-1130
Число фаз обмотки статора	3	4	3
Число полюсов статора	12	8	6
Число зубцов ротора	8	6	4
Внешний диаметр статора, мм	520	396	191
Диаметр ротора, мм	360	261	98
Длина пакета статора, мм	420	215	100
Воздушный зазор, мм	0,6	1,0	1,0
Число витков катушки	10	23,5	156
Индуктивность фазы, млГн	16,5	1,67	29
Вращающий момент, Нм при I=1,0$I_н$	1033	86,5	5,5
Вращающий момент, Нм при I=2,0$I_н$	2113	198,3	16,3

небольшой доработки вала. Таким образом, при блочно-модульном проектировании ограничениями при разработке являются внешний диаметр пакета статора и внутренний диаметр пакета ротора, которые необходимо сохранить при проектировании листов железа статора и ротора.

Для выполнения исследований использовались модели для численного расчета электромагнитных и тепловых полей в геометрии 2D.

Используя численный метод расчета (программный пакет ELCUT), было определено электромагнитное поле двигателей для различных значений тока при согласованных и несовпадающих положениях ротора и статора. Кроме того, была рассчитана зависимость магнитного потока от фазного тока. Данные моделирования электромагнитного поля использовались для расчета потерь в стали и для выбора тепловых режимов для исследования.

Выражение для классических потерь на вихревые токи разработано на основе удельного сопротивления материала сердечника [19, 20]. Для расчета потерь на вихревые токи в сердечнике статора были созданы дополнительный алгоритм и подпрограмма, встроенные в программный пакет ELCUT.

При расчете потерь на вихревые токи следует отдать предпочтение методу Штейнмеца (GSE) как наиболее физически корректному [20]. Обобщенное уравнение основано на идее, что потери на вихревые токи зависят как от производной плотности потока, так и от ее значения:

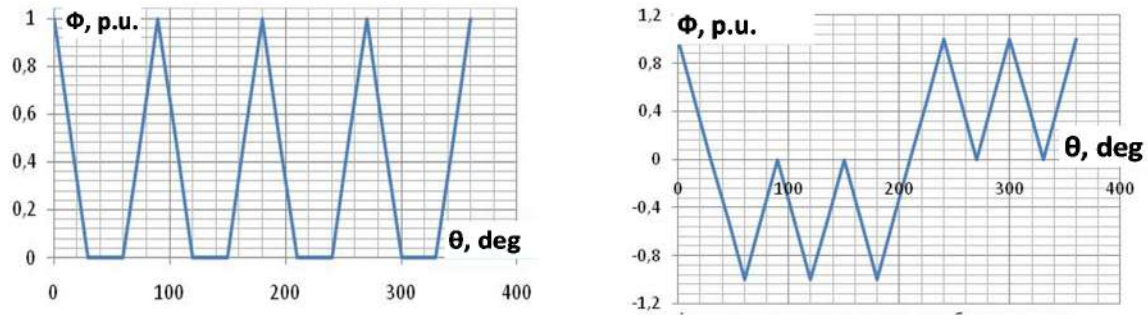
$$\Delta P_{Fe} = \frac{1}{T}\int_0^T k_1 \left|\frac{dB}{dt}\right|^{\alpha} \left|B(t)\right|^{\beta-\alpha} dt \qquad (1)$$

Вентильно-индукторный двигатель характеризуется различными формами изменения потока в определенных частях магнитопровода [6], [19]. Для 3-фазной машины с топологией магнитной системы 6/4 формы потока представлены в зубцах статора и ротора на рисунке 1, в ярмах статора и ротора на рисунке 2.

В зубцах статора поток близок к потоку однонаправленных треугольных импульсов с частотой следования $f_{rzs}=f_rN_r$, где f_r – частота вращения двигателя, а N_r – число полюсов ротора. Поток полюсов ротора меняется на противоположный каждые пол-оборота ротора. В зубцах ротора частота следования импульсов потока равна $f_{rzr}=f_rN_s$, где N_s – число полюсов статора.

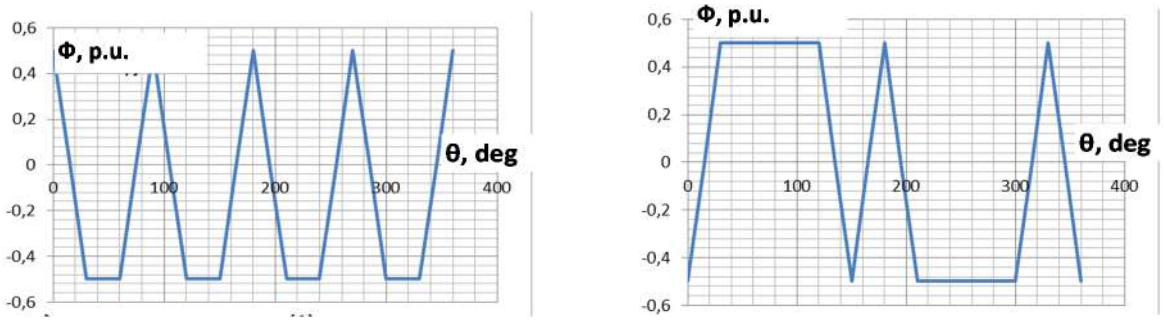
В ярме статора частота повторения потока такая же, как и в зубцах, но импульсы потока являются двунаправленными. В ярме ротора частота повторяемости потока равна f_r, а

импульсы потока являются двунаправленными: можно выделить три участка нарастания и три участка падения плотности потока.



а) *б*)

Рисунок 1 – Форма потока в зубцах статора (а) и ротора (б) для топологии 6/4



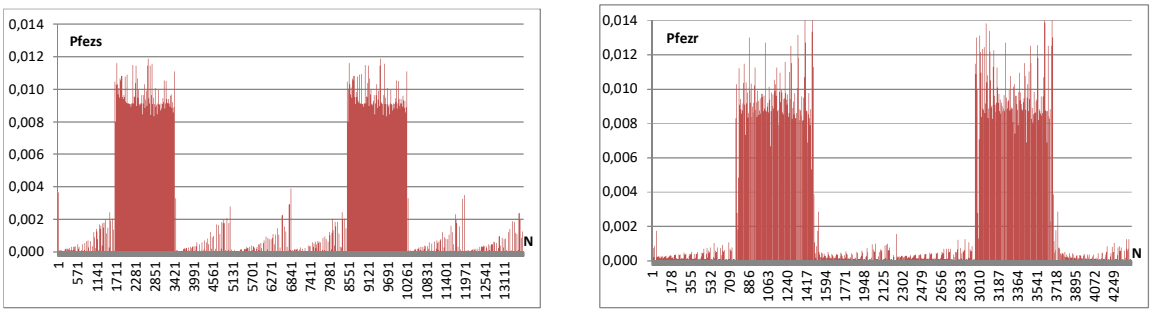
а) *б*)

Рисунок 2 – Форма потока в ярме статора (а) и ротора (б) для топологии 6/4

Для каждого элемента ферромагнитных доменов были определены характеристики электромагнитного поля, и для определения задачи стационарной теплопередачи задано тепловыделение с учетом распределения источников тепла энергии. Для расчета потерь на вихревые токи в магнитопроводе были разработаны дополнительный алгоритм и подпрограмма, встроенные в программный пакет ELCUT.

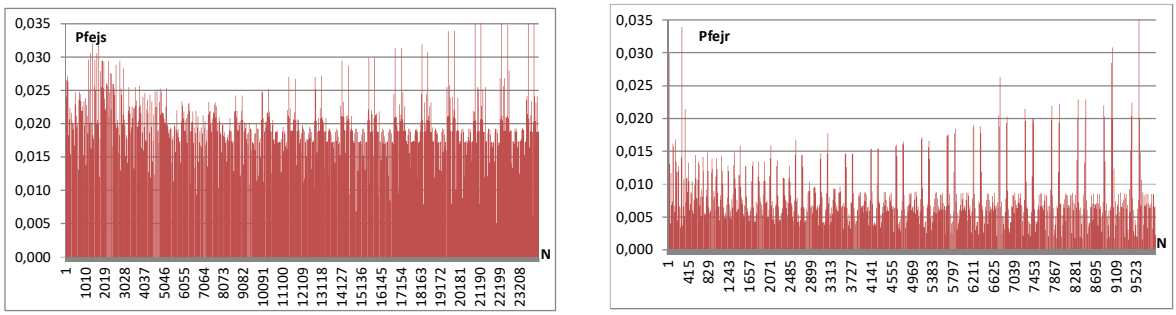
Алгоритм преобразует распределенные значения плотности потока в распределение магнитных потерь по элементам расчетной сетки модели. Результаты расчета плотности потока записываются в таблицу элементов, с которой выполняются необходимые операции в соответствии с формулами, которые различаются для зубьев статора, зубьев ротора, ярма статора и ярма ротора. Расчеты выполняются как для радиальной, так и для тангенциальной составляющих индукции, общие потери в каждом элементе сетки и общие потери каждого участка определялись путем суммирования по всему объему [21].

Для ВИД-1.5-1130 распределения потерь в зубцах статора (*а*) и ротора (*б*) показаны на рисунке 3, а распределения потерь в ярме статора (*а*) и ротора (*б*) на рисунке 4.



а) *б*)

Рисунок 3 – Распределение потерь в зубцах статора (а) и ротора (b) ВИД-1,5-1130



а) *б*)

Рисунок 4 – Распределение потерь в ярмах статора (а) и ротора (b) ВИД-1,5-1130

Для определения параметров исследуемых режимов использовалась имитационная модель, разработанная в среде MATLAB/Simulink с текущими ограничениями [9].

Данные о потокосцеплении, полученные методом конечных элементов (2-D FEM) в виде двумерной таблицы в зависимости от дискретных значений фазных токов и углов смещения $\psi=f(i,\theta)$, были преобразованы в зависимости $i=\varphi(\psi,\theta)$ с помощью MATLAB путем создания специального *m*-файла и были помещены в справочную таблицу.

Были записаны данные о вращающем моменте в зависимости от фазного тока и угла смещения. Проблема также решается путем создания *m*-файла MATLAB, в котором были определены коэнергия и ее градиент и помещены в справочную таблицу.

Для исследования тепловых моделей с помощью модели Simulink были получены следующие данные: действующее значение тока, угловая частота вращения и величина электромагнитного момента.

Основные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы для характерных точек диаграммы движения троллейбуса

Тип двигателя	Режим	M, Нм	U, В	n, мин$^{-1}$	I_{ref}, А	I_{rms}	Δ, рад
ВИД-180-1500	Р2	1071	550	1500	360	185	0,367
	Р3	550	550	3420	300	140	0,314
ВИД-14-615	Р2	215,6	145	655	200	71,1	0,393
	Р3	2,9	145	1108	200	27,7	0,393
ВИД-1,5-1130	Р1	7,1	300	722	12	7,5	0,628
	Р2	6,9	300	2527	18,5	7,6	0,628

Модели ELCUT для исследования температурных полей тяговых двигателей основаны на стационарном уравнении теплопроводности с граничными условиями радиационного и конвективного теплообмена:

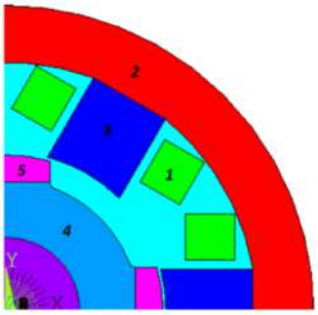


Рисунок 5 – Структурные элементы – источники потерь для ВИД-1.5-1130:
1 – обмотка, 2 – ярмо статора, 3 – зубцы статора, 4 – ярмо ротора, 5 – зубцы ротора

$$\frac{\partial T}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial T}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+q=0, \qquad (2)$$

где T – температура; λ_x и λ_y – теплопроводности в направлениях x и y соответственно, а q –тепло, выделяемое на единицу объема. Источники потерь в качестве модельных структурных элементов показаны на рисунке 5.

Объемный источник тепла в катушках обмотки определен по среднеквадратичному значению тока. Значение среднеквадратичного тока определено для всего цикла нагрузки T_c, включая паузу (для топологии 6/4 это π/2 оборота, для топологии 12/8 это π/4 оборота, для топологии 8/6 это π/3 оборота).

Для каждого элемента ферромагнитных доменов определено тепловыделение с учетом распределения потерь

в стали, а также введены следующие допущения и ограничения:

- Вокруг каждой полюсной катушки имеется общий изоляционный слой.
- Учитываются только радиальные и окружные потоки (потери в меди лобовых частей обмотки добавлены к потерям в активной части).
- Потери на механическое трение отводятся через подшипниковые узлы.

Распределение температуры в поперечном сечении рассчитано при следующих характеристиках материалов: теплопроводность меди λ_{Cu}=380 Вт/м/К, стали λ_{Fe}=25 Вт/м/К и изоляции λ_{iso}=0,2 Вт/м/К, воздуха $\lambda_в$=0,028 Вт/м/К.

Потери ВИД 180-1500 отводятся вентилятором, установленным на валу двигателя (способ охлаждения IC01). Вентилятор с диаметром 415/325 мм и шириной лопатки 120 мм при 1500 мин$^{-1}$ работает в точке с расходом Q_2=0,25 м^3/с и давлением H_2=280 Па, при 3420 мин$^{-1}$ – с расходом Q_3=0,6 м^3/с и давлением H_3=1485 Па. При частоте вращения 1500/3420 мин$^{-1}$ скорость воздуха в каналах статора – 4,1/9,8 м/с, в каналах ротора – 6,8/16,2 м/с. Коэффициенты теплоотдачи в каналах определены с помощью критериальных уравнений

$$\alpha_k = \mathrm{Nu}\lambda_в / d_г, \quad \mathrm{Nu} = 0{,}018\mathrm{Re}^{0{,}8}, \tag{3}$$

где Nu, Re – критерии Нуссельта и Рейнольдса, $d_г$ – гидравлический диаметр канала.

При тепловом моделировании ВИД 180-1500 заданы граничные условия конвекции и радиации.

Потери двигателей ВИД-14-615 и ВИД-1,5-1130 отводятся путем конвекции и теплоизлучения через корпус двигателя (способ охлаждения IC0141). Начальное значение превышения температуры корпуса $\Delta\theta_{к0}$ определено по значениям коэффициентам теплоотдачи корпуса двигателя равным для конвекции α_k=8 Вт/м^2/°С и для теплоизлучения α_{iz}=6 Вт/м^2/°С. Затем эти значения уточнены по критерию произведения Грасгофа $\mathrm{Gr}=g\beta h^3\theta_0/\nu^2$ и Прандтля $\mathrm{Pr}=\nu/\alpha$, где β – коэффициент температурного расширения, ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, α – коэффициент температуропроводности, h – определяющий размер (принята высота оси вращения). В зависимости от величины произведения (Gr×Pr) установлен режим течения, расчетные формулы и коэффициенты к ним.

При тепловом моделировании двигателей ВИД-14-615 и ВИД-1,5-1130 на внешней поверхности модели заданы граничные условия Неймана первого рода – предварительно определенная температура.

Результаты расчета потерь на вихревые токи по основным элементам магнитопровода в расчетных режимах представлены в таблицах 3 и 4.

Тяговые двигатели предназначены для работы в типовом режиме S2 (60 мин), а поскольку тепловая задача методом конечных элементов решается как стационарная, то необходимо осуществить приведение потерь таблицы 3 к режиму S1. Для этого воспользуемся отношением допустимых потерь

$$\frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \frac{\theta_\infty}{\theta_{per}} = \frac{1}{1-\exp\left(-t_p/T\right)}, \tag{4}$$

где t_p=3600 с – длительность нестационарного режима, $T = cG/\alpha S$ – постоянная времени нестационарного теплового режима, G и S – масса и внешняя поверхность охлаждения двигателя, c – удельная теплоемкость машины, α – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Таблица 3 – Результаты расчета потерь (Вт) в структурных элементах двигателей в типовом режиме S2

Тип двигателя	Режим	P_{Cu}	P_{Fe}	P_{Fezs}	P_{Fezr}	P_{Fejs}	P_{Fejr}
ВИД-180-1500	P1	436	6429	882	409	3519	1183
	P2	692	17747	2575	1194	10273	3455
ВИД-14-615	P1	94	608	62	35	378	133
	P2	9	1068	109	61	664	233
ВИД-1,5-1130	P1	252,3	194,4	70,4	35,0	84,8	4,2
	P2	265,3	38,4	13,9	6,9	16,8	0,8

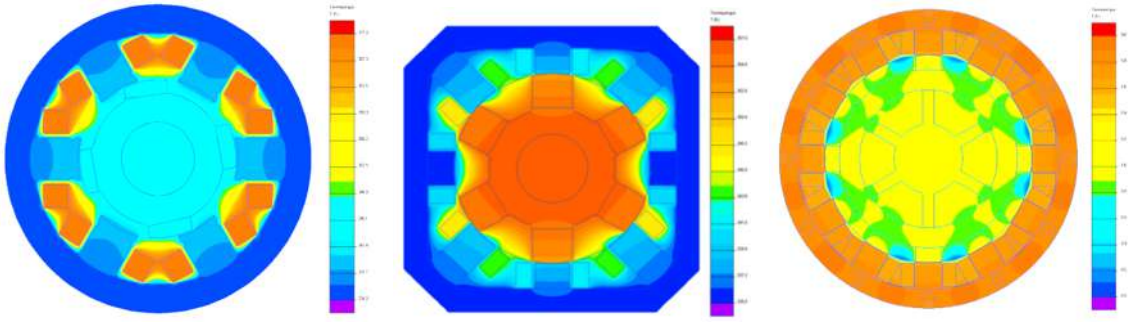
Таблица 4 – Результаты расчета потерь (Вт) в структурных элементах двигателей в типовом режиме S1

Тип двигателя	Режим	P_{Cu}	P_{Fe}	P_{Fezs}	P_{Fezr}	P_{Fejs}	P_{Fejr}
ВИД-180-1500	P1	167	1522	224	104	894	300
	P2	176	4444	654	303	2609	878
ВИД-14-615	P1	27	174	18	10	108	38
	P2	3	305	31	17	190	67
ВИД-1,5-1130	P1	126	100	36	18	44	2
	P2	137	20	7	4	9	0

Результаты расчета температуры для всех структурных элементов каждого двигателя представлены в таблице 5 для двух различных режимов, а тепловые поля для режимов номинальной скорости показаны на рисунке 6.

Таблица 5 – Результаты расчета температур (°C) в структурных элементах двигателей в типовом режиме S1

Тип двигателя	Режим	T_{Cu}	T_{Fezs}	T_{Fezr}	T_{Fejs}	T_{Fejr}
ВИД-180-1500	P1	72	72	64	74	64
	P2	98	103	84	108	83
ВИД-14-615	P1	72	64	80	64	83
	P2	80	79	86	78	87
ВИД-1,5-1130	P1	94	30	20	42	42
	P2	92	35	21	63	63



а) *б)* *в)*

Рисунок 6 – Тепловые поля номинальных режимов работы двигателей:

а) ВИД-1.5-1130 (I_{rms}=7,5 А), б) ВИД-14-615 (I_{rms}=71 А), в) ВИД-180-1500 (I_{rms}=185 А).

Экспериментальные испытания нескольких тепловых режимов лабораторной модели ВИД-1.5-1130 показали, что по полученным значениям средних перегревов обмотки погрешность расчетов не превосходит 8 %.

Таким образом, исследование процессов теплообмена в вентильно-индукторных тяговых двигателях различной магнитной топологии закрытого и защищенного исполнения позволили предложить методологию оценки их тепловой напряженности и сделать следующее заключение:

1. При тепловом моделировании ВИД защищенного исполнения с само- или независимой вентиляцией на внешней поверхности модели целесообразно задавать граничные условия конвекции и радиации – граничные условия Неймана третьего рода.

2. При тепловом моделировании ВИД закрытого исполнения на внешней поверхности модели целесообразно задавать граничные условия Неймана первого рода – предварительно определенную температуру.

3. Для расчета потерь на вихревые токи в магнитопроводе разработаны дополнительный алгоритм и подпрограмма, встроенные в программный пакет расчета электромагнитного поля ELCUT.

4. Показано, что в тепловой модели для зубцов статора, зубцов ротора, ярма статора и ярма ротора возможно задавать значения суммарного источника тепла при равномерном распределении по элементам ферромагнитных доменов.

5. Определены допустимые плотности тока j=3,0-4,0 А/мм^2 для способа охлаждения IC0141, j=7,0 А/мм^2 для способа охлаждения IC01.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российсикой Федерации, проект № 20-08-00386.

Список источников

1. Electronic Control of Switched Reluctance Machines (ser. Newnes Power Engineering Series), edited by J.E. Miller (Newnes, Oxford, U.K.). – 2001. – 272 p.

2. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. – London: Magna Physics Publishing and Oxford University Press. – 1993. – 200 p.

3. Miller T.J.E. Optimal Design of switched reluctance motors // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 1. P. 15–27.

4. Radun A.V. Design consideration for the switched reluctance motors // IEEE Trans. on Industry Appl. 1995. Vol. 31. No. 5. P. 1079–1087.

5. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. №3. С. 23–33.

6. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. – CRC Press. – 2001. – 432 p.

7. Bokose F., Vandevelde L., Melkebeek J.A.A. Structural design-optimization of switched reluctance motors based on long-range deformation forces using finite element method coupled with a genetic algorithm // Proc. 2004 Intern. Conf. on Electrical Machines. P. 235–236.

8. Rocca R., Capponi F.G., De Donato G., Rashed M., Papadopoulos S., Galea M. Analytical approach for the identification of an optimal design space for switched reluctance machines // Proc. 2018 Intern. Conf. on Electrical Machines. 2018. P. 569–575.

9. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Исследование моделей вентильно-индукторного двигателя // Электричество. 2018, № 6. С. 60–65.

10. Soares F., Costa Blanco P.J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. 2001. Vol. 37 (3). P. 989–1009.

11. Bocchese A., Nøland J.K., Bianchi N., Noddeland B., Røkke A. Maximum torque density limit for surface-cooled SPM machines // Proc. 24th Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM 2020). 2020. P. 218–224. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270815.

12. Kasprzak M., Jiang J.W., Bilgin B., Emadi A. Thermal analysis of a three-phase 24/16 switched reluctance machine used in HEVs // Proc. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2016. P. 1–7.

13.Li. S., Zhang S., Habetler T.G., Harley R.G. A survey of electromagnetic Thermal modeling and design optimization of switched reluctance machines // Proc. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017. P. 1–7.

14.Udhav U., Ashok B., Eshan D., Shahjahan A., Narayanan G., Pramod K. Thermal and mechanical design considerations for a switched reluctance motor// Proc. 7th India Intern. Conf. on Power Electronics (IICPE). 2016. P. 1–6.

15.Pavan A., Sathyanarayanan N., Rajesh Kumar R., Lenin N.C., Sivakumar R. Thermal Investigation of a Switched Reluctance Motor // Intern. J. of Electrical Engineering. 2015. Vol. 8 (2). P. 115–121.

16.Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Switched Reluctance Motor for a Trolleybus Traction Application: Design and Modeling // Proc. XXIV Intern. Conf. on Electrical Machines 2020 (ICEM 2020). 2020. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270914.

17.Kasi Rajan K., Latha P. Adaptive neuro fuzzy inference system based sensorless rotor position estimation of SRM // ARPN J. Engin. Appl. Sci. 2015. Vol. 10 (4). P. 1920–1926.

18.Li C., Wang G., Li Y., Xu A. Robust adaptive neural network control for switched reluctance motor drives // Automatika. 2018. Vol. 59 (1). P. 24–34.

19.Torrent M., Andrada P., Blanque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A. Method for estimating core losses in switched reluctance motors // Euro. Trans. Electr. Power. 2010. Vol. 21 (1). P. 757–771. DOI: 10.1002/etep.475.

20.Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Thermal field of mini turbine generator with the new gas cooling system // Proc. XV Int. Symp. on Electromagnetic Fieldsin Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2011). 2011.

Антипов Виктор Николаевич, д-р техн. наук. Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), ведущий научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

Грозов Андрей Дмитриевич, Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

Иванова Анна Владимировна, канд. физ.-мат. наук, Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), старший научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: iann57@mail.ru. (812)328-16-91.

UDC 621.333

HEAT EXCHANGE PROCESSES AND TEMPERATURE FIELDS SWITCHED RELUCTANCE MOTORS OF VARIOUS MAGNETIC TOPOLOGIES

V.N. Antipov, A.D. Grozov, A.V. Ivanova

Russia, St. Petersburg, Russian Academy of Sciences, Institute of Silicate Chemistry

Summary. A study of the heat exchange process and temperature distribution in the cross section of switched reluctance traction motors of various magnetic topologies of closed and protected motors is presented. An additional subroutine for calculating eddy current losses has been developed, integrated into the ELCUT electromagnetic field calculation software package, and magnetic and thermal fields have been simulated under various boundary conditions. The permissible current densities for closed and protected motors are estimated.

Keywords: switched reluctance traction motor, heat exchange processes, temperature distribution, simulation of thermal operating modes, analysis of parameters

References

1. Electronic Control of Switched Reluctance Machines (ser. Newnes Power Engineering Series), edited by J.E. Miller (Newnes, Oxford, U.K.). – 2001. – 272 p.

2. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. – London: Magna Physics Publishing and Oxford University Press. – 1993. – 200 p.

3. Miller T.J.E. Optimal Design of switched reluctance motors // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 1. P. 15–27.

4. Radun A.V. Design consideration for the switched reluctance motors // IEEE Trans. on Industry Appl. 1995. Vol. 31. No. 5. P. 1079–1087.

5. Ptah G.K. Ventil'no-induktornyj reaktivnyj elektroprivod srednej i bol'shoj moshchnosti: zarubezhnyj i otechestvennyj opyt // Elektrotekhnika: setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal. 2015. T. 2. №3. S. 23–33.
6. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. – CRC Press. – 2001. – 432 p.
7. Bokose F., Vandevelde L., Melkebeek J.A.A. Structural design-optimization of switched reluctance motors based on long-range deformation forces using finite element method coupled with a genetic algorithm // Proc. 2004 Intern. Conf. on Electrical Machines. P. 235–236.
8. Rocca R., Capponi F.G., De Donato G., Rashed M., Papadopoulos S., Galea M. Analytical approach for the identification of an optimal design space for switched reluctance machines // Proc. 2018 Intern. Conf. on Electrical Machines. 2018. P. 569–575.
9. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Issledovanie modelej ventil'no-induktornogo dvigatelya // Elektrichestvo. 2018, № 6. S. 60–65.
10. Soares F., Costa Blanco P.J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. 2001. Vol. 37 (3). P. 989–1009.
11. Bocchese A., Nøland J.K., Bianchi N., Noddeland B., Røkke A. Maximum torque density limit for surface-cooled SPM machines // Proc. 24th Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM 2020). 2020. P. 218–224. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270815.
12. Kasprzak M., Jiang J.W., Bilgin B., Emadi A. Thermal analysis of a three-phase 24/16 switched reluctance machine used in HEVs // Proc. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2016. P. 1–7.
13. Li. S., Zhang S., Habetler T.G., Harley R.G. A survey of electromagnetic Thermal modeling and design optimization of switched reluctance machines // Proc. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017. P. 1–7.
14. Udhav U., Ashok B., Eshan D., Shahjahan A., Narayanan G., Pramod K. Thermal and mechanical design considerations for a switched reluctance motor// Proc. 7th India Intern. Conf. on Power Electronics (IICPE). 2016. P. 1–6.
15. Pavan A., Sathyanarayanan N., Rajesh Kumar R., Lenin N.C., Sivakumar R. Thermal Investigation of a Switched Reluctance Motor // Intern. J. of Electrical Engineering. 2015. Vol. 8 (2). P. 115–121.
16. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Switched Reluctance Motor for a Trolleybus Traction Application: Design and Modeling // Proc. XXIV Intern. Conf. on Electrical Machines 2020 (ICEM 2020). 2020. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270914.
17. Kasi Rajan K., Latha P. Adaptive neuro fuzzy inference system based sensorless rotor position estimation of SRM // ARPN J. Engin. Appl. Sci. 2015. Vol. 10 (4). P. 1920–1926.
18. Li C., Wang G., Li Y., Xu A. Robust adaptive neural network control for switched reluctance motor drives // Automatika. 2018. Vol. 59 (1). P. 24–34.
19. Torrent M., Andrada P., Blanque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A. Method for estimating core losses in switched reluctance motors // Euro. Trans. Electr. Power. 2010. Vol. 21 (1). P. 757–771. DOI: 10.1002/etep.475.
20. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Thermal field of mini turbine generator with the new gas cooling system // Proc. XV Int. Symp. on Electromagnetic Fieldsin Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2011). 2011.

Antipov Victor Nikolaevich, Dr. of Sciences (Engineering), Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. Leading scientist. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.
GrozovAndrei Dmitrievich, Scientist, Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.
Ivanova Anna Vladimirovna, PhD (Phys.-Math.), Senior scientist, Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: iann57@mail.ru. 7(812)328-16-91.

УДК 621.333

СИНХРОННАЯ МАШИНА С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

В.Н. Антипов, А.Д. Грозов, А.В. Иванова
Россия, Санкт-Петербург, Институт химии силикатов РАН

Аннотация. Выполнен анализ параметров синхронной машины с постоянными магнитами и поперечным потоком для децентрализованной энергетики. Предложена методика расчета, исследованы потоки рассеяния, проанализирован коэффициент мощности. Приведено сравнение с аналогичными машинами с тангенциальным и аксиальным потоком. Отмечены преимущества синхронного генератора с аксиальным потоком по патенту Российской Федерации №2688204.

Ключевые слова: поперечный магнитный поток, постоянные магниты, синхронные ветрогенераторы, расчетная методика, анализ параметров

Россия обладает большим ветровым потенциалом в северных широтах, но основным источником энергии по-прежнему остается дизель-генератор. Работа ветрогенератора в комплексе с дизель-генератором не только повысит энергосбережение, но и снизит затраты на доставку топлива в труднодоступные районы. Установки должны обеспечивать энергией отдельные объекты, и такие установки уже предложены [1, 2].

В возобновляемой ветроэнергетике в качестве электромеханических преобразователей энергии широко применяются, благодаря своим известным преимуществам, синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов. Для синхронных ветрогенераторов с трехфазной обмоткой якоря и постоянными магнитами на роторе предпочтительны многополюсные конструкции [3]. Известно, что многополюсные конструкции могут быть созданы тремя принципиально различными способами: с тангенциальным магнитным потоком [4], с аксиальным магнитным потоком [5-7] и с поперечным магнитным потоком [8, 9]. В каждом из трех способов предложено несколько конструктивных исполнений. В ИХС РАН был разработан и изготовлен для вертикально-осевой карусельной ветротурбины низкоскоростной синхронный ветрогенератор мощностью 10 кВт с применением тангенциально расположенных постоянных магнитов, а также разработан размерный ряд таких синхронных машин как ветрогенераторы с сосредоточенными обмотками статора в диапазоне частот вращения 75-300 мин$^{-1}$ [2].

Анализ известных зарубежных и отечественных конструкций синхронных машин с аксиальным потоком позволил авторам статьи оценить как перспективный для ветрогенератора вариант с тороидальной намоткой и двумя роторами с постоянными магнитами, найти пути улучшения технико-экономических показателей этого варианта и предложить новую конструкцию с уменьшенным воздушным зазором и сосредоточенной обмоткой статора, а также создать лабораторную модель СГПМ-0,15-250 (150 Вт, 83 В, 250 мин$^{-1}$) [10].

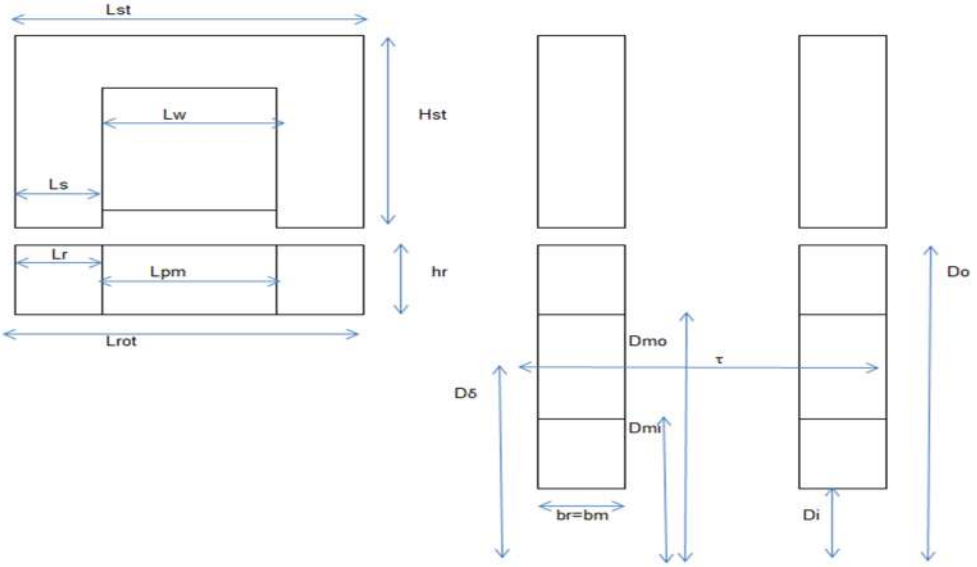
Основное различие между электрической машиной с поперечным потоком и машинами с радиальным, тангенциальным и аксиальным потоками заключается в том, что в структуре этой машины электрическая и магнитная цепи разъединены. Эта структура позволяет увеличить пространство для обмоток без уменьшения доступного пространства для основного потока и изготовить машину с очень малым шагом полюсов по сравнению с другими машинами. Уникальными достоинствами машин с поперечным потоком являются высокий вращающий момент и удельная мощность, а областью их применения является прямой привод – ветротурбина с переменной скоростью вращения и тяговый привод (мотор – колесо). В машине с поперечным потоком может быть достигнуто низкое значение отношения активной массы к крутящему моменту за счет конструкции обмотки, практически не имеющей неактивных частей.

© Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В., 2022

Однако машина с поперечным потоком имеет такие недостатки, как сложная конструкция, большие потоки рассеяния, высокое значение зубцового момента, низкий коэффициент мощности, а также трудности производства из-за большого количества отдельных деталей (сердечников и магнитов) и специальных методов изготовления и сборки.

Различные конструкции машин с поперечным потоком представлены в обзорах [11, 12]. Конструкции различаются направлением потока по радиальному или осевому воздушному зазору, формой сердечника (*U*-образный, *C*-образный, *E*-образный и *Z*-образный), топологией внутреннего или внешнего ротора, активной или пассивной конструкцией статора, расположением постоянных магнитов, однооборотной или двухоборотной фазной обмоткой, двойной или одинарной конструкцией статора и т.д. Как правило, в большинстве конструкций используются ферромагнитные шунты (iron bridges) для уменьшения потоков рассеяния.

В настоящей работе предложена методика расчета синхронного генератора с поперечным потоком для децентрализованной энергетики, и выполнено сравнение с аналогичными машинами с тангенциальным и аксиальным потоками. Для анализа выбран трехфазный синхронный генератор мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения 250 мин$^{-1}$ с осевым направлением магнитного потока, одинарной конструкцией статора с *U*-образным сердечником и кольцевой обмоткой. Расчеты выполнены для одной фазы. Трехфазная машина получается путем сборки трех модулей, в котором магниты сдвинуты на 120 градусов. Конфигурация машины с поперечным потоком представлена на рисунке 1.



а) *б*)

Рисунок 1 – Конфигурация машины с поперечным потоком:
а) сечение вдоль радиуса ротора, б) сечение по дуге окружности

Полагаем, что сечение сердечников статора и ротора квадратное, тогда $l_r=b_r=b_m$, $l_s=b_s=l_r$ и магнитные потоки магнита и в воздушном зазоре:

поток магнита $\Phi_{pm} = B_r h_m b_m 10^{-6}$,

поток в зазоре $\Phi_{\delta 0} = B_\delta h_r b_r 10^{-6}$.

Тогда высота магнита $h_m = \dfrac{B_r}{B_\delta} b_r$ (геометрические размеры обозначены на рисунке 1).

Для расчета приняты основные геометрические размеры ранее исследованных генераторов с тангенциальным и аксиальным потоками, а именно: наружный диаметр ротора 640 мм, внутренний 550 мм, воздушный зазор 4 мм, число полюсов и число сердечников

статора равно 40, а также использованы высококоэрцитивные постоянные магниты NвFeB с остаточной индукцией 1,25 Е и коэрцитивной силой по индукции 900 КА/м.

Заданы начальные значения отношения $\varepsilon = \frac{b_r}{\tau}$ и индукции в воздушном зазоре B_δ.

Для машины с поперечным потоком длина магнита определяется выражением

$$l_m = \frac{\delta \mu_{pm}}{\left(B_r / B_\delta - 1 \right)},$$

а площадь обмотки равна $S_w = \frac{I_n}{a j_{per} k_{fil}} = l_w h_w = l_w^2 k_h$, где I_n – номинальный ток, j_{per} – допустимая плотность тока, N – число эффективных проводников, коэффициенты: k_{fil} – учитывающий заполнение паза, $k_h = h_w / l_w$.

Тогда размер обмотки $l_w = \sqrt{\frac{I_n k_{iz} N}{a j_{per} k_{fil} k_h}}$, который по топологии должен быть равным размеру магнита $l_w = l_m$ позволяет определить коэффициент k_h:

$$k_h = \frac{I_n N \left(B_r / B_d - 1 \right)^2}{a j_{per} k_{fil} k_h \delta^2 \mu_{pm}^2}$$

и рассчитать следующие величины:

внешний диаметр ротора по магнитам	$D_{nap} = D_i + 2l_r + 2l_m$
внутренний диаметр ротора по магнитам	$D_v = D_i + 2l_r$
расчетный диаметр ротора по зазору	$D_\delta = D_i + 2l_r + l_m$
высота статора	$H_{st} = lmk_h + l_r + h_k$
высота ротора	$H_r = h_m$
длина статора (ротора)	$L_{st} = L_r = 2l_r + l_m$
полюсное деление по диаметру D_δ	$\tau = \frac{\pi D_\delta}{2p}$
отношение	$\varepsilon = \frac{b_r}{\tau}$

Методом последовательных приближений следует добиться в расчете равенства заданных и полученных значений B_δ и cosφ. При этом желаемая внешняя характеристика генератора не реализуется, т.к. при номинальной нагрузке значение напряжения отличается от номинального. Необходимая внешняя характеристика реализуется изменением высоты магнита h_m. Полученные результаты в значительной мере зависят от величины $\varepsilon = \frac{b_r}{\tau}$. В таблице 1 приведены расчетные данные для трех значений ε, на рисунке 2 – зависимости от этой величины объема магнитов и потерь в меди. Рисунок 3 показывает изменение КПД и коэффициента мощности от ε.

Таблица 1 – Расчетные данные синхронного генератора с поперечным потоком при различных ε

ε	0,5	0,4	0,3	0,4*
N		162		162
b_p	9,0	9,0	8,0	8,0
h_p	15,3	22,5	46,4	27,2
h_m	30,0	21,0	25,0	21,0
b_m	25,0	25,0	15,0	25,0
l_m	8,0	8,0	8,0	8,0
B	0,774	0,724	0,664	0,732
A	0,223	0,355	0,641	0,355
J	4,868	4,868	4,868	4,868
η	0,866	0,837	0,753	0,837
U	1,054	1,015	1,025	1,201
I_k	10,897	6,858	3,803	1,027
cosφ	0,931	0,965	0,983	0,955
V_m	96	168	120	661=168+493
X_d*	0,031	0,074	0,239	0,078
X_q*	0,031	0,074	0,238	0,078
σ	5,134	6,371	9,090	2,278
P_{cu}	168,1	258,5	452,3	258,5

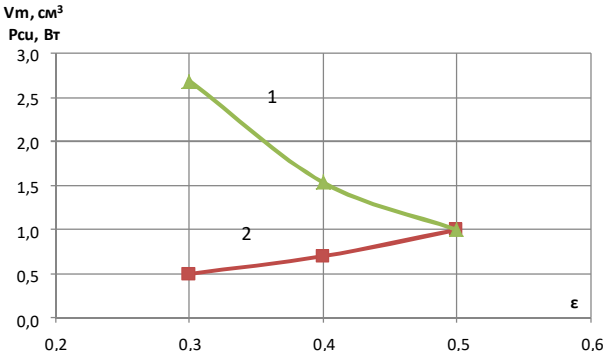


Рисунок 2 – Зависимости объема магнитов (1) и потерь в меди обмотки (2) от значения ε

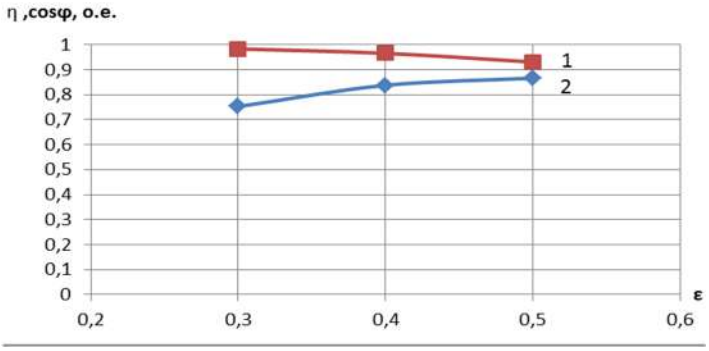


Рисунок 3 – Зависимость КПД и cosφ от значения ε

Рисунок 2 ясно показывает, что с уменьшением ε магнитная нагрузка машины усложняется, а электрическая нагрузка облегчается. Рисунок 3 также показывает рост КПД с увеличением ε.

В [13] для снижения коэффициента рассеяния предложено устанавливать дополнительно ортогональные магниты на боковых поверхностях сердечника ротора. В таблице 1 такой расчетный вариант представлен в столбце, обозначенном 0,4*. Коэффициент рассеяния действительно снижается значительно, однако необходимый для этого объем магнитов почти втрое превышает объем основных, не затрагивая коренным образом остальные характеристики машины.

Коэффициент мощности является важнейшей характеристикой, которая определяет характеристики как генератора, так и преобразователя, соединяющего ветрогенератор с системой. Преобразователь с принудительной коммутацией способен управлять нагрузкой генератора, изменяя угол нагрузки от ψ=0 (напряжение на зажимах выше индуктированной ЭДС и коэффициент мощности низок) до φ=0 (вектор тока по фазе совпадает с вектором напряжения и коэффициент мощности cosφ=1). Возможно и любое промежуточное положение, когда вектор фазного тока расположен между векторами индуктированной ЭДС

и вектором напряжения. В этом случае значения ЭДС и напряжения практически равны при равенстве углов φ=ψ. В [14] для сравнительных оценок машину с поперечным потоком предлагается оценивать в режиме управления при ψ=0. Коэффициент мощности рассчитывается по выражению

$$\cos\varphi = \frac{E_n - r_1 I}{U}.$$

При выборе высоты магнита по предложенному выражению получаем значения E_n=1,164, U=1,255 и cosφ=0,79 (при ψ=0,79), при ψ=0 cosφ=0,775, а при желаемой внешней характеристике En=1,136, U =1,015 и cosφ=0,99.

Таким образом, для снижения габаритных размеров преобразователя и генератора необходимо иметь на генераторе соответствующую характеристику.

В таблице 2 сопоставлены характеристики трех ветрогенераторов мощностью 5 кВт и одинаковыми номинальными данными, выполненных с тангенциальным (СГПМ-5-150Т), аксиальным (СГПМ-5-150А) и поперечным потоками СГПМ-5-150П).

Таблица 2 – Сравнение характеристик ветрогенератора мощностью 5 кВт, 400 В, 150 мин$^{-1}$, выполненного с тангенциальным, аксиальным и поперечным потоком

Конструкция	Тангенциальная (СГПМ-5-150Т)	Аксиальная (СГПМ-5-150А)	Поперечная (СГПМ-5-150П)
1	2	3	4
Основные размеры, мм			
Внутренний диаметр	550	550	580
Внешний диаметр	640	680	640
Полная длина	56	65	48
Воздушный зазор	4,0	4,0	4,0
Полюсное деление	43,2	48,3	49,3 (50)
Высота ярма	16	16	25
Обмоточные данные			
Тип обмотки	сосредоточенная	сосредоточенная	кольцевая
Число пазов на полюс и фазу	0,35	0,35	1
Число параллельных ветвей	2	2	2
Число пазов	42	42	40
Число слоев	2	2	1
Число последовательных витков в фазе	560	357	162 (104)
Диаметр элементарного проводника, мм	0,86/0,89	1,32/1,428	1,00/1,08
Число элементарных проводников в эффект.	2	1	1
Обмоточный коэффициент	0,953	0,953	1
Магнитная система			
Высота магнита, мм	56	59	21 (28)
Ширина магнита, мм	21,7	40,0	25
Длина магнита, мм	6,0	5,0	8
Остаточная индукция магнита, Тл	1,25	1,25	1,25
Коэрцитивная сила, кА/м	900	900	900
Коэффициент полюсной дуги геометр.	0,861	0,828	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Холостой ход			
Поток, мВб	1,94	1,51	23,2
Индукция в зазоре, Тл	0,86	0,582	0,774
Индукция в зубце, Тл	1,39		0,930
Индукция в ярме, Тл	0,64	1,56	0,930
Коэффициент рассеяния магнита	1,62	1,16	6,37(5,13)
Режим номинальной нагрузки			
Линейная нагрузка, А/см	156	88,9	35 (22)
Плотность тока в обмотке, А/мм^2	3,45	2,93	4,87
Тепловой фактор, А^2/мм^3	538	260	170 (110)
Коэффициент запаса магнита	1,23	1,15	
Потери и КПД			
Потери в меди статора, Вт	271	92	258 (168)
Потери в стали статора, Вт	51	97	18 (46)
Сумма потерь, Вт	380	262	326 (258)
КПД, %	92,9	95,0	86,6
Активные и индуктивные сопротивления, о.е.			
Активное фазы	0,052	0,018	0,157 (0,102)
Индуктивное взаимоиндукции			
по продольной оси	0,175	0,083	0,074 (0,031)
по поперечной оси	0,195	0,063	0,074 (0,031)
Индуктивное рассеяния	0,138	0,022	0,074 (0,031)
Массы и габариты			
Объем ротора, см^3	13305	8715	9833×3
Масса меди, кг	9,3	4,24	2,9×3
Масса стали, кг	19,7	20,7	18×3
Масса магнитов, кг	2,2	7,08	0,5×3

Сопоставление характеристик электрических машин с различной топологией магнитного потока, представленных в таблице 2, показывает, что машина с поперечным потоком не может превзойти по своим показателям машину с аксиальным потоком, выполненную согласно патенту Российской Федерации №2688204.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН (код научной темы 0081-2022-0007).

Выводы

1. Разработана оригинальная методика рационального выбора основных размеров машины с поперечным потоком и параметров ее обмотки по номинальным данным и ограничениям электромагнитных нагрузок.
2. Для снижения габаритов ветрогенератора и преобразователя необходимо проектировать ветрогенератор с поперечным потоком с внешней характеристикой реализующей заданное напряжение U+5%.
3. Снижение коэффициента рассеяния путем установки ортогональных магнитов является экономически неоправданным.
4. Машина с поперечным потоком не смогла превзойти по своим показателям машину с аксиальным потоком, выполненную согласно патенту Российской Федерации №2688204.

Список источников

1. Кирпичникова И.М., Соломин Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Энергетика. 2008. №26. С. 32–35.

2. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф., Иванова А.В., Миронов Б.Н. Автономная интегрированная ветроэнергоустановка с использованием наноструктурированных материалов для хранения и преобразования электрической энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2009. №4. С. 81–89.

3. Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Грозов А.Д., Иванова А.В. Оценка эффективности конструктивного исполнения постоянных магнитов для низкоскоростных синхронных генераторов на основе расчета магнитного поля // Электротехника. 2014. №2. С. 2–5.

4. Антипов В.Н. Построение размерного ряда ветрогенераторов для децентрализованной энергетики // Электричество. 2014. №3. С. 31–34.

5. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) // Электричество. 2016. №1. С. 55–65.

6. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф. Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1 (38). С. 68–79.

7. Хрисанов В.И., Дмитриев Б.Ф. Морская электроэнергетика с возобновляемыми энергоносителями. Ч.2. Аксиальные многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветряных и волновых офшорных электростанций // Электротехника. 2016. № 10. С. 6–12.

8. Bang D., Polinder H., Ferreira A. Comparative Design of Radial and Transverse Flux PM Generators for Direct-Drive Wind Turbine // 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2008). 2008. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4800027.

9. Pippuri J., Manninen A., Keränen J., Tammi K. Torque density of radial, axial and transverse flux permanent magnet machine topologies // IEEE Transactions on Magnetics. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 2339–2342.

10. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Design and analysis of a new axial flux permanent magnet synchronous generator for wind power // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012043.

11. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. Vol. 12. No. 4. 2016. P. 257–269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.

12. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J.S., Domínguez-Navarro J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14. 7173. DOI: 10.3390/en14217173.

13. Husain T., Hasan I., Sozer Y. Design Considerations of a Transverse Flux Machine for Direct-Drive Wind Turbine Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 3604–3615. DOI: 10.1109/TIA.2018.2814979.

14. Svechkarenko D. On Design and Analysis of a Novel Transverse Flux Generator for Direct-driven Wind Application. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden. 2010.

Антипов Виктор Николаевич, д-р техн. наук. Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), ведущий научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

Грозов Андрей Дмитриевич, Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

Иванова Анна Владимировна, канд. физ.-мат. наук, Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), старший научный сотрудник. Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2. e-mail: iann57@mail.ru. (812)328-16-91.

UCD 621.333

SYNCHRONOUS TRANSVERSE FLUX MACHINE FOR DECENTRALIZED WIND POWER

V.N. Antipov, A.D. Grozov, A.V. Ivanova

Russia, St. Petersburg, Russian Academy of Sciences, Institute of Silicate Chemistry

Summary. The analysis of the parameters of a synchronous machine with permanent magnets and a transverse flux for decentralized energy is carried out. A calculation method is proposed, leakage fluxes are investigated, and the power factor is analyzed. A comparison with similar machines with tangential and axial flux is given. The advantages of a synchronous generator with axial flux under RF patent No. 2688204 are noted.

Keywords: transverse magnetic flux, permanent magnets, synchronous wind generators, calculation method, parameter analysis

References

1. Kirpichnikova I.M., Solomin E.V. Vetroenergeticheskaya ustanovka s vertikal'noj os'yu vrashcheniya // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Seriya: Energetika. 2008. №26. S. 32–35.
2. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Hozikov Yu.F., Ivanova A.V., Mironov B.N. Avtonomnaya integrirovannaya vetroenergoustanovka s ispol'zovaniem nanostrukturirovannyh materialov dlya hraneniya i preobrazovaniya elektricheskoj energii // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2009. №4. S. 81–89.
3. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Ocenka effektivnosti konstruktivnogo ispolneniya postoyannyh magnitov dlya nizkoskorostnyh sinhronnyh generatorov na osnove rascheta magnitnogo polya // Elektrotekhnika. 2014. №2. S. 2–5.
4. Antipov V.N. Postroenie razmernogo ryada vetrogeneratorov dlya decentralizovannoj energetiki // Elektrichestvo. 2014. №3. S. 31–34.
5. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energosberegayushchie elektricheskie mashiny dlya privoda elektromobilej i gibridnyh avtomobilej (Obzor zarubezhnyh razrabotok) // Elektrichestvo. 2016. №1. S. 55–65.
6. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayahov I.F. Obzor konstrukcij diskovyh elektromekhanicheskih preobrazovatelej energii dlya razlichnyh oblastej primeneniya // Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy. 2018. №1 (38). S. 68–79.
7. Hrisanov V.I., Dmitriev B.F. Morskaya elektroenergetika c vozobnovlyaemymi energonositelyami. Ch.2. Aksial'nye mnogopolyusnye sinhronnye generatory s postoyannymi magnitami dlya vetryanyh i volnovyh ofshornyh elektrostancij // Elektrotekhnika. 2016. № 10. S. 6–12.
8. Bang D., Polinder H., Ferreira A. Comparative Design of Radial and Transverse Flux PM Generators for Direct-Drive Wind Turbine // 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2008). 2008. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4800027.
9. Pippuri J., Manninen A., Keränen J., Tammi K. Torque density of radial, axial and transverse flux permanent magnet machine topologies // IEEE Transactions on Magnetics. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 2339–2342.
10. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Design and analysis of a new axial flux permanent magnet synchronous generator for wind power // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012043.
11. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. Vol. 12. No. 4. 2016. P. 257–269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.
12. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J.S., Domínguez-Navarro J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14. 7173. DOI: 10.3390/en14217173.
13. Husain T., Hasan I., Sozer Y. Design Considerations of a Transverse Flux Machine for Direct-Drive Wind Turbine Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 3604–3615. DOI: 10.1109/TIA.2018.2814979.
14. Svechkarenko D. On Design and Analysis of a Novel Transverse Flux Generator for Direct-driven Wind Application. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden. 2010.

Antipov Victor Nikolaevich, Dr. of Sciences (Engineering), Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. Leading scientist. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

GrozovAndrei Dmitrievich, Scientist, Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: bht@mail.ru. (812)328-16-91.

Ivanova Anna Vladimirovna, PhD (Phys.-Math.), Senior scientist, Institute of Silicate Chemistry Russian Academy of Sciences. 2 admiral Makarov emb., Saint Petersburg, 199034, Russia. e-mail: iann57@mail.ru. 7(812)328-16-91.

УДК 621.314.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ОТ ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Коренков Д.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Тимохин В.А.
Россия, г. Орёл, АО «Орёлоблэнерго»

Аннотация. В статье рассмотрены сущность и основные источники гармонических искажений в электрических сетях, а также их влияние на работу электроустановок. Проведено экспериментальное исследование гармонических искажений в маломощной однофазной электрической сети, питающей импульсный преобразователь.

Ключевые слова: гармонические искажения, качество электрической энергии, импульсные преобразователи.

Формы кривых тока в реальных однофазных и трехфазных электрических сетях низкого напряжения могут существенно отличаться от синусоидальной. Математически они могут быть получены как суперпозиция отдельных гармоник, обладающих собственными частотами и амплитудами, в соответствии с разложением в ряд Фурье. Наложение высших гармоник тока на основную приводит к гармоническому искажению результирующей кривой тока. Следует отметить, что в электрических сетях одновременно могут существовать также и субгармоники и интергармоники. Высшие гармоники тока протекают по обмоткам трансформаторов и проводам линий электропередач, что приводит к возникновению соответствующих гармоник падения напряжения на данных элементах. Напряжение в конце линий, т.е. у потребителей, может быть найдено по второму закону Кирхгофа как разность синусоидальной ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов и гармоник падений напряжений на тех же обмотках и проводах. Таким образом, форма питающего электроприемники напряжения также претерпевает гармонические искажения, что влечет за собой падение качества электрической энергии во всем узле системы.

Высшие гармоники тока генерируются активными и пассивными двух- и четырехполюсниками с нелинейными вольтамперными характеристиками [1]. К наиболее распространенным промышленным источникам гармонических искажений относятся статические преобразователи (импульсные источники питания, выпрямители, тиристорные регуляторы, источники бесперебойного питания), электродуговые печи постоянного и переменного тока, сварочные аппараты, электродвигатели переменного тока с регулируемой скоростью вращения. В последние десятилетия не уменьшается актуальность проблемы снижения качества электрической энергии из-за гармонических искажений и в коммунально-бытовом секторе. Здесь четко прослеживается тенденция к росту использования цифровой техники, энергосберегающих светодиодных ламп и других устройств с импульсными преобразователями в качестве источников питания.

Наличие гармонических искажений тока и напряжения приводит к ряду проблем технического и энергетического характера. С энергетической точки зрения высшие гармоники проявляются в виде дополнительных потерь мощности в сетях и, соответственно,

© Коренков Д.А., Тимохин В.А., 2022

в виде снижения их пропускной способности, что не учитывается в стандартных методиках расчета при проектировании электрических сетей и систем электроснабжения, а также при выборе пускозащитных устройств. Формула для вычисления активной мощности электроустановки, оперирующая действующими значениями напряжения, тока и коэффициентом мощности не учитывает их изменения из-за гармонических искажений, хотя величина отклонений от расчетного значения может достигать 63 %, а дополнительные потери мощности могут доходить до 30 % [2]. Неправильный расчет мощности электроустановок с нелинейными вольтамперными характеристиками при проектировании может привести к существенному занижению пропускной способности питающих фидеров, а в последствии – к аварийным ситуациям. Ряд исследователей предлагает использовать специальный поправочный коэффициент, однако сложность его определения заключается в его очевидной зависимости от множества факторов, например, от уровня напряжения в сети, гармонического состава несинусоидальных искажений и др. Применительно к светодиодным источникам света специалисты рекомендуют увеличивать расчетный ток сети на 15 % или использовать специальные методики расчета [3].

Технические проблемы рассмотрены в работах [4] и связаны с нарушением работы и уменьшением срока службы электроприемников. Степень влияния высших гармоник на работу электрооборудования оценивается с помощью двух показателей качества электрической энергии, закрепленных в государственных стандартах [5]. Первый показатель – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U, отражающий долю суммарного напряжения высших гармоник в питающем напряжении электросети по отношению к напряжению основной частоты:

$$K_U = \frac{\sqrt{U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2 + \ldots + U_{(40)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% , \qquad (1)$$

где $U_{(1)}$ – действующее значение линейного или фазного напряжения первой гармоники;

$U_{(2)}$, $U_{(3)}$, $U_{(40)}$ – действующие значения линейного или фазного напряжения высших гармоник.

Второй показатель – коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, характеризует воздействие отдельно взятой гармоники:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100\% , \qquad (2)$$

где n – номер гармонической составляющей, кратной основной частоте, в спектре сетевого напряжения.

Нормально допустимые значения коэффициента $K_{U(n)}$ для каждой гармоники регламентированы в ГОСТ 32144-2013, а предельно допустимые значения в 1,5 выше. Так, например, $K_{U(5)}$ равен 6 % при напряжении 0,4 кВ. Тем не менее, уже при 5 % наблюдаются отклонения в работе индукционных счетчиков электрической энергии в виде дополнительной погрешности в 0,3 процента [6].

В данной работе проведено экспериментальное исследование коэффициента 3-й и 5-й гармонических составляющих напряжения, возникающих в маломощной однофазной электрической сети при работе импульсного преобразователя мощностью 150 Вт, питающего резистивную нагрузку при напряжении 12 В. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. В схеме используются: трехфазный источник (1); разделительный трансформатор (2); трехполюсный выключатель (3); блок мультиметров (4); трансформаторы тока и напряжения (5); блок ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов (6); персональный компьютер со специализированным программным обеспечением – виртуальным осциллографом с гармоническим анализатором (7); импульсный преобразователь (8), нагрузочный реостат (9). Разделительный маломощный трансформатор (2) мощностью 80 В·А введен в схему в качестве вторичного источника питания и позволяет

даже при относительно незначительной нелинейной нагрузке наблюдать эффект гармонических искажений кривой напряжения.

По показаниям виртуального осциллографа регистрировались кривые тока и напряжения вторичной обмотки трансформатора (2) и напряжения источника (1), а также коэффициенты $K_{U(n)}$ при помощи его встроенных функций. Прибором PA1 измерялось действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора, а прибором PA2 – ток нагрузки импульсного преобразователя (8). Нагрузка блока питания варьировалась таким образом, чтобы ток трансформатора (2) изменялся в диапазоне от 0 до $1{,}4 \cdot I_{ном}$.

На рисунке 2 показаны измеренные кривые тока и напряжений при максимально допустимой перегрузке трансформатора.

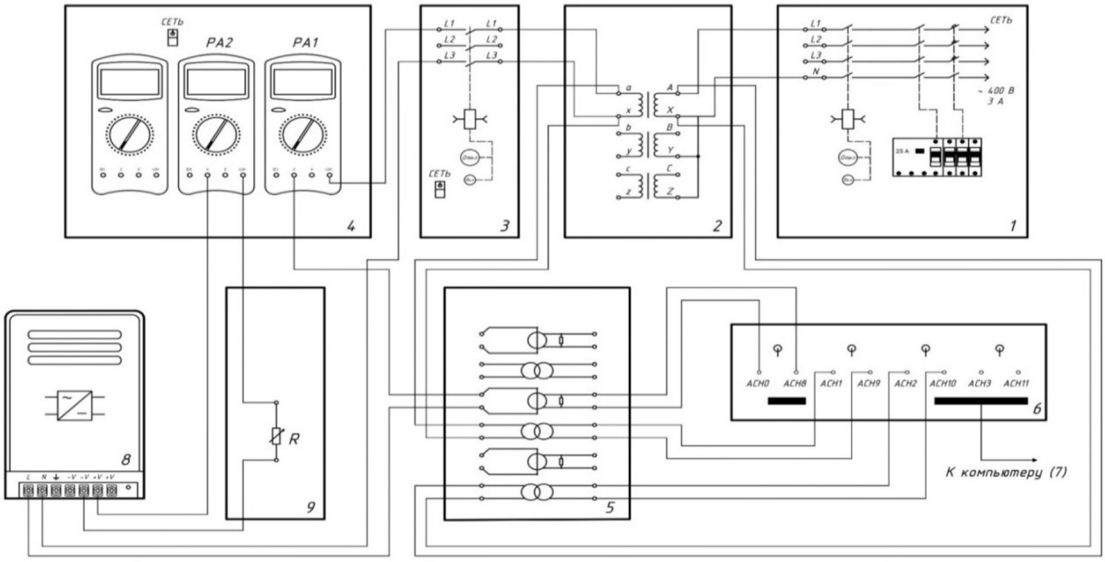


Рисунок 1 – Электрическая схема соединений экспериментальной установки

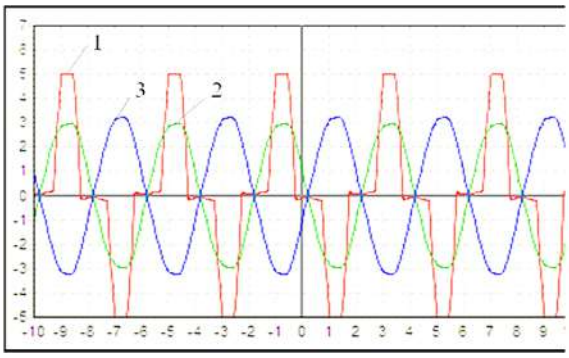


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжений

1, 2- ток и напряжение на вторичной обмотке трансформатора;
3 – напряжение источника (сети)

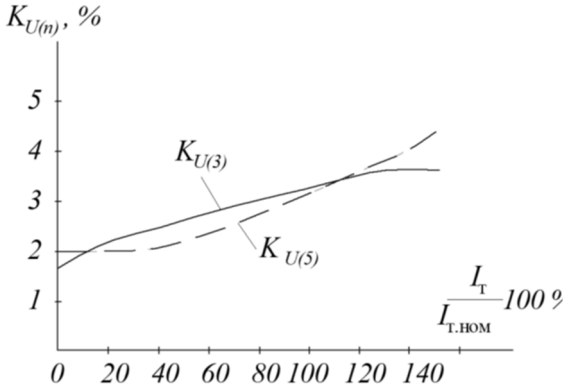


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов 3-ей (а) и 5-ой (б) гармонических составляющих напряжения от тока нагрузки

Из полученных осциллограмм видно, что импульсный блок питания вносит сильные гармонические искажения в кривую тока. Амплитуды третьей и 7-й гармоник тока составили соответственно 53 и 15 % от основной гармоники. Вместе с тем вторичное напряжение визуально не изменилось по форме, только по амплитуде на величину потерь напряжения в трансформаторе. Сохранение синусоидальности подтверждается и по результатам измерений коэффициентов третьей и 5-ой гармонических составляющих напряжения, представленных на рисунке 3. Остальные гармоники напряжений в эксперименте менялись не существенно и не превышали 1 %, поэтому не рассматривались. Анализ результатов показал, что с

увеличением тока нагрузки уровень исследуемых гармоник увеличился, но остался в пределах допустимых значений.

Также были проведены опыты по измерению уровней гармоник при подключении светодиодных светильников суммарной мощностью 100 Вт. Однако их воздействие на гармонический состав напряжения оказалось несущественным, что объясняется применением в светильниках резонансных LC фильтров, снижающих воздействие высших гармоник на сеть. Следует отметить, что применение LC фильтров является довольно эффективным средством [4], но присутствие в сети электроприемников генерирующих гармоники, на которые не настроены фильтры, может вызвать их перегрев и выход из строя.

На следующем этапе исследования планируется модернизация схемы путем введения модели линии электропередачи с целью изучения влияния её активных и реактивных сопротивлений на уровень гармоник напряжения и тока в месте подключения источника.

Список источников

1. Bhagyashri Ms., Patil S., Pawar V. S., Power Quality Effects on Nonlinear Loads // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2017. Vol. 4. – № 6. – p. 3244-3247.

2. Баран А. Н., Пашинский В. А., Липницкий Л. А. Светодиодные источники света и их влияние на питающую сеть // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2019. – №. – 4. – С. 91-99.

3. Гужов С. Оценка влияния источников питания светодиодных светильников на питающую сеть // Силовая электроника для светотехники. – 2009. – № 2. – С. 47-49.

4. Наумкин И.Б., Паскарь И.Н., Завьялов В.М. Влияние нелинейной нагрузки на качество электрической энергии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (110). – С. 75-82.

5. Королева Т.Г. Учет и контроль ПКЭ в системах электроснабжения // XI Международная научно-практическая интернет-конференция "Энерго и ресурсосбережение - XXI век". сб. науч. тр. – Орёл: Госуниверситет – УНПК, 2013. – С. 101–103.

6. Колломбет К., Люпен Ж.М., Шонек Ж. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – № 22. – 32 с.

Коренков Дмитрий Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

Тимохин Вячеслав Александрович, доктор электротехники, Заслуженный энергетик Российской Федерации, главный инженер АО «Орёлоблэнерго».302030, г. Орёл, площадь Поликарпова, 8, тел.: 8 (4862) 55 08 04.

UCD 621.314.6

INVESTIGATION OF VOLTAGE AND CURRENT HARMONIC DISTORTIONS OF PULSE POWER SUPPLIES

Korenkov D.A.

Russia, Oryol, the Orel state University named after I.S. Turgenev

Timokhin V.A.

Russia, Orel, JSC "Oreloblenergo"

Summary. The article discusses the essence and main sources of harmonic distortions in electrical networks, as well as their influence on the operation of electrical installations. An experimental study of harmonic distortions was carried out in a low-power single-phase electrical network supplying a pulse converter.

Keywords: harmonic distortions, quality of electric energy, pulse converters.

References

1. Bhagyashri Ms., Patil S., Pawar V. S., Power Quality Effects on Nonlinear Loads // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2017. Vol. 4. – № 6. – p. 3244-3247.

2. Baran A. N., Pashinskij V. A., Lipnickij L. A. LED light sources and their influence on the supply network // Journal of the Belarusian State University. Ecology. – 2019. – №. – 4. – p. 91-99.
3. Guzhov S. Assessment of the influence of power sources of LED lamps on the supply network // Power electronics for lighting engineering. – 2009. – № 2. – p. 47-49.
4. Naumkin I.B., Paskar' I.N., Zav'yalov V.M. Influence of nonlinear load on electric energy quality // Bulletin of Kuzbass State Technical University. – 2015. – № 4 (110). – p. 75-82.
5. Koroleva T.G. Accounting and Control of PKE in Power Supply Systems // XI International Scientific and Practical Internet Conference "Energy and Resource Saving - XXI Century, 2013. – p. 101–103.
6. Kollombet K., Lyupen Zh.M., Shonek Zh. Harmonic distortions in electrical networks and their reduction // Schneider Electric Technical Collection. – 2008. – № 22. – 32 p.

Korenkov Dmitry Andreevich, Candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department, Oryol state university of I.S. Turgenev, 302026, g. Oryol, ul. Komsomolskaya, d. 95, e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.
Timokhin Vyacheslav Aleksandrovich, Doctor of Electrical Engineering, Honored Power Engineer of the Russian Federation, Chief Engineer of JSC Oryoblenergo. 302030, Orel, Polikarpova Square, 8; tel.: 8 (4862) 55 08 04.

УДК 620.97

ЭНЕРГОРОУТЕР ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ С ОДНОФАЗНОЙ СЕТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА: СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Скурятин Ю.В., Белоусов А.В., Жилин Е.В., Саввин Н.Ю.
Россия, г. Белгород, БГТУ имени В.Г. Шухова

Аннотация. В работе представлены результаты синтеза управления энергороутером. Оценка эффективности полученного управления проводилась посредством моделирования в пакете Matlab. Результаты моделирования показали способность преобразователя передавать электроэнергию в прямом и обратном направлениях и выполнять функции активного фильтрокомпенсирующего устройства.
Ключевые слова: скользящий режим, широтно-импульсная модуляция, качество электроэнергии.

Решение экологических проблем и снижение зависимости от ископаемого топлива обусловили особый интерес исследователей к развитию распределенной генерации с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Вместе с тем широкое внедрение распределенной генерации требует перехода к новым парадигмам в энергетике [1], реализация которых в значительной степени зависит от наличия качественных устройств интегрирования ВИЭ в энергосистемы. Целью данной работы является синтез управления энергороутером для интегрирования ВИЭ с однофазной сетью переменного тока.

Энергороутер для интегрирования возобновляемых источников энергии с сетью однофазного переменного тока (рис. 1) содержит изолирующий DC-DC преобразователь, инвертор и интерфейсный фильтр. Изолирующий DC-DC преобразователь, собранный на транзисторах VT5 – VT12 и трансформаторе TV1, обеспечивает гальваническую развязку портов постоянного и переменного тока и согласование напряжения по уровням. Инвертор, собранный на транзисторах VT1 – VT4, осуществляет преобразование постоянного напряжения в переменное, параметры которого согласованны с сетью. К выводам порта переменного тока инвертор подключается через интерфейсный LCL-фильтр, собранный на индуктивностях L1, L2 и конденсаторе C1.

В качестве метода управления инвертором примем управление на скользящих режимах [2], эффективность которого продемонстрирована в ряде приложений силовой электроники [3, 4]. Математическое описание силовой части инвертора имеет вид:

© Скурятин Ю.В., Белоусов А.В., Жилин Е.В., Саввин Н.Ю., 2022

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{di_{L1}}{dt}=\frac{u_{in}}{L1}-\frac{u_{C1}}{L1}-i_{L1}\frac{R_{L1}}{L1}\\
&\frac{di_{L2}}{dt}=\frac{u_{C1}}{L2}-\frac{u_{con}}{L2}-i_{L2}\frac{R_{L2}}{L2}\\
&i_{L1}-i_{C1}-i_{L2}=0\\
&i_{C1}=C1\frac{du_{C1}}{dt}
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где u_{con} – управление

$$u_{con}=\begin{cases}+U_{C2} & with \quad (s\ge a)\vee\left((-a\le s\le a)\wedge\left(\frac{ds}{dt}<0\right)\right),\\ -U_{C2} & with \quad (s\le a)\vee\left((-a\le s\le a)\wedge\left(\frac{ds}{dt}>0\right)\right),\end{cases}$$

претерпевающее разрывы на поверхности, заданной уравнением s=0.

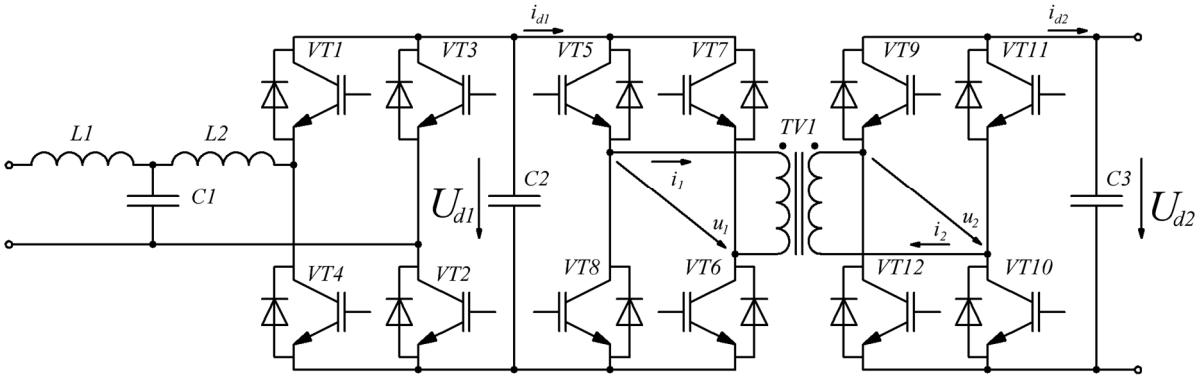


Рисунок 1 – Электрическая принципиальная схема силовой части энергороутера

Как следует из (1), любая переменная состояния системы описывается дифференциальным уравнением третьего порядка. Поэтому в качестве поверхности разрыва примем линейную комбинацию ошибки, ее первой и второй производных. С учетом (1) уравнение для поверхности разрыва, на которой должен существовать скользящий режим, будет иметь вид:

$$s=i_{L1}^{*}+\lambda_1\frac{di_{L1}^{*}}{dt}+\lambda_2\frac{d^2i_{L1}^{*}}{dt^2}-i_s-\lambda_1\frac{u_{L1}}{L1}-\lambda_2\left(\frac{1}{L1}\frac{du_{in}}{dt}-\frac{i_{C1}}{L1C1}-\frac{R1u_{L1}}{L1^2}\right)=0 \qquad (2)$$

Функциональная схема, удовлетворяющая (1), (2), показана на рисунке 2.

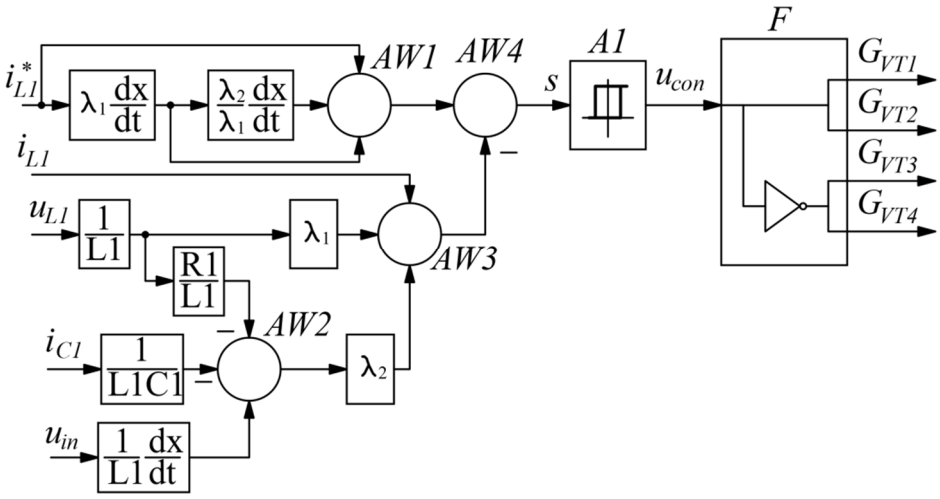


Рисунок 2 – Функциональная схема системы управления инвертора

Среди основных методов управления изолирующим DC-DC преобразователем выделяют: Square Waves Phase Shift, Triangular Current Mode, Trapezoidal Current Mode [5, 6]. Учитывая, что первый метод характеризуется высоким уровнем реактивной мощности, а второй имеет повышенную кратность импульсов тока к среднему значению, наиболее перспективным является регулирование в режиме трапецеидальных импульсов тока. В этом случае преобразователь может работать при любом соотношении уровней входного и выходного напряжений. Кроме того, может быть обеспечена минимизация реактивной мощности и оптимальная кратность импульсов тока по отношению к среднему значению последнего.

Функциональная схема системы управления DC-DC преобразователя показана на рисунке 3. Генератор прямоугольных импульсов ГПИ формирует прямоугольные импульсы напряжения U_{rect} и инверсные им U_{rect_inv} с частотой $f_{шим}$ (рис. 3). Генератор пилообразного напряжения ГПН формирует на своем выходе пилообразное напряжение $U_{ГПН}$ с частотой $2f_{шим}$. Тактируется ГПН напряжением с выхода ГПИ. Сигнал с ГПН поступает на входы формирователя импульсов блокировки ФИБ, модулятора входного инвертора М1, модулятора выходного инвертора М2. Формирователь импульсов блокировки формирует импульсы, в течение которых блокируются импульсы управления вентилями (dead time).

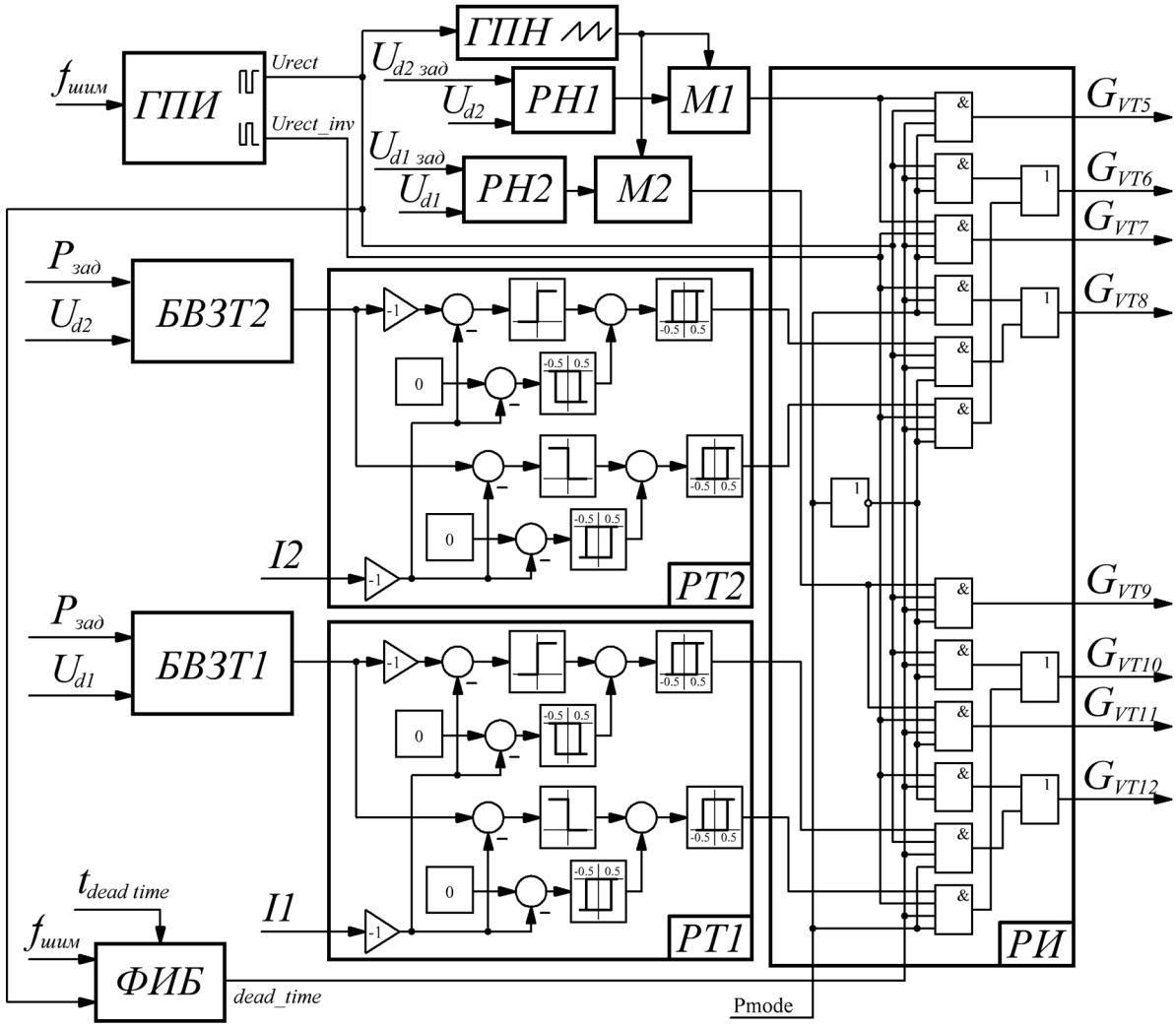


Рисунок 3 – Функциональная схема системы управления DC-DC преобразователя

Модулятор М1 в соответствии со значением управляющего сигнала U_{y1} с регулятора напряжения РН1 определяет длительность импульсов напряжения, которое прикладывается к первичной обмотке трансформатора, в режиме прямого направления потока мощности.

Модулятор М2 в соответствии со значением управляющего сигнала U_{y2} с регулятора напряжения РН2 определяет длительность импульсов напряжения, которое прикладывается ко вторичной обмотке трансформатора, в режиме обратного направления потока мощности. Сигнал пропорциональный передаваемой мощности и сигнал пропорциональный напряжению звена постоянного тока U_{d1} поступают на вход блока вычисления сигналов задания токов первичной обмотки БВЗТ1, который вычисляет задание на ток, поступающий на соответствующие входы регулятора тока РТ1. Последний осуществляет регулирования тока первичной обмотки трансформатора при прямом направлении потока мощности. Сигнал пропорциональный передаваемой мощности и сигнал пропорциональный напряжению звена постоянного тока U_{d2} поступают на вход блока вычисления сигналов задания токов вторичной обмотки БВЗТ2, который вычисляет задание на ток, поступающий на соответствующие входы регулятора тока РТ2. Последний осуществляет регулирования тока вторичной обмотки трансформатора при обратном направлении потока мощности. Направление потока мощности определяется состоянием входа P_{mode}. Распределитель импульсов РИ в функции сигналов с ГПИ, ФИБ, М1, М2, РТ1, РТ2 и состояния входа P_{mode} распределяет импульсы управления вентилями VT5 – VT12.

Для оценки эффективности управления выполним моделирование в пакете Matlab. Работоспособность алгоритма управления DC-DC преобразователя при прямом и обратном направлении потока мощности подтверждают временные диаграммы, представленные на рисунке 4.

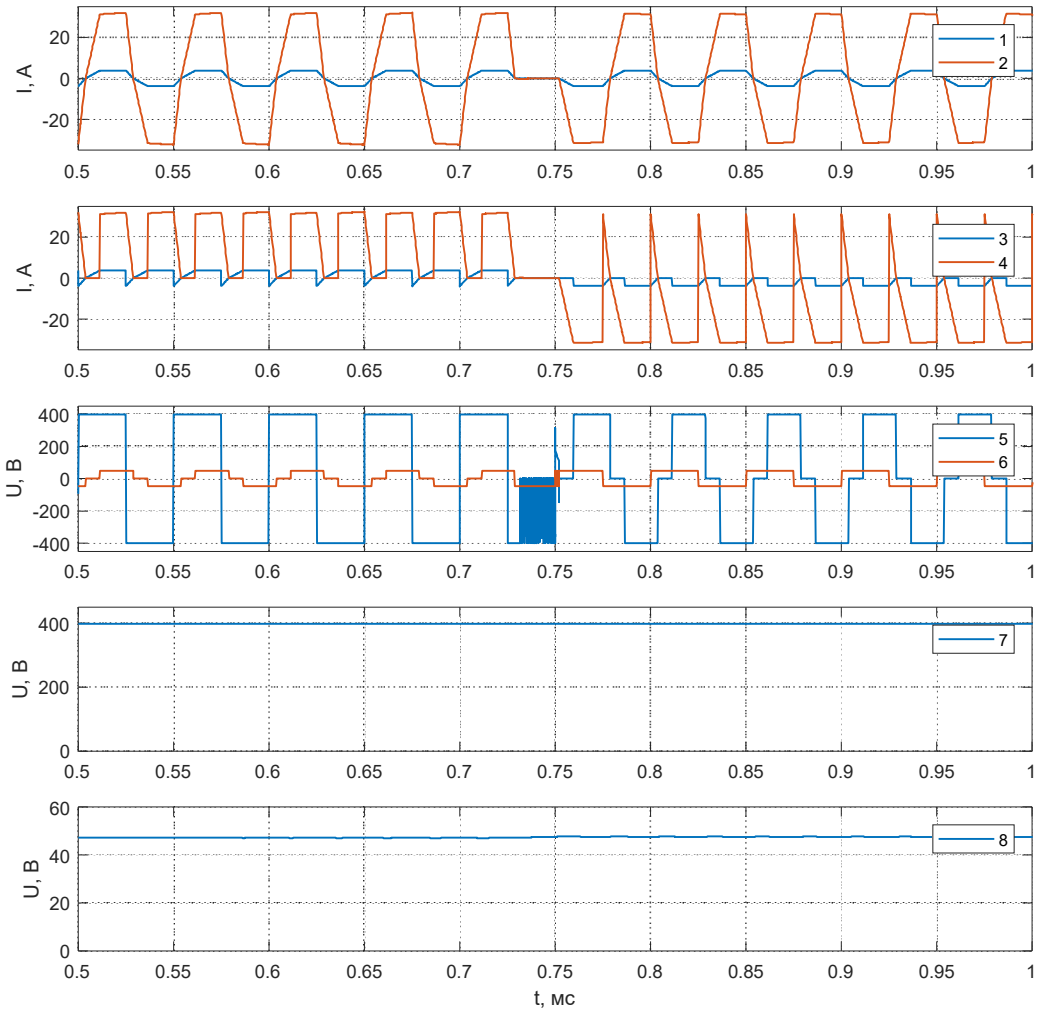


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы DC-DC преобразователя:
1 – i_1; 2 – i_2; 3 – i_{d1}; 4 – i_{d2}; 5 – u_1; 6 – u_2.5 – u_{d1}; 6 – u_{d2}.

Преобразователь вступает в работу в режиме прямого направления потока мощности. Средние значения токов i_{d1}, i_{d2} положительные, что свидетельствует о прямом направлении потока мощности. В момент времени t=0,728 мс преобразователь переводится в режим обратного направления потока мощности. Средние значения токов i_{d1}, i_{d2} отрицательные, что свидетельствует об обратном направлении потока мощности. Токи обмоток среднечастотного трансформатора имеют трапецеидальную форму. При этом вершина импульса токов в зависимости от соотношения уровней напряжений на обмотках трансформатора может быть как нарастающей, так и спадающей.

На рисунке 5 показаны временные диаграммы работы инвертора при подключении к однофазной сети переменного тока. Параметры сети: f=50 Гц, U=220 В. Параметры интерфейсного фильтра: L1=2 мГн, L1=1 мГн, C1=20 мкФ. Начальное значение напряжения на конденсаторе звена постоянного тока равно U_{C1}=400В. Ширина петли гистерезиса релейного элемента системы управления равна 2a=5.

В начальный момент времени инвертор включается в режиме активного выпрямителя, что соответствует прямому направлению потока мощности (от сети к DC-DC преобразователю). Сигнал задания тока имеет гармоническую форму и совпадает по фазе с напряжением сети $i_{L1}^{*} = 4.5\sqrt{2}\sin(2\pi 50 - 0)$. Инвертор с высокой точностью отрабатывает формирование тока сети (сигнал задания тока и фактический ток сети практически совпадают). В момент времени t_1=33.35 мс инвертор переводится в режим инвертирования, что соответствует обратному направлению потока мощности (от DC-DC преобразователя в сеть). Инвертор без колебаний и перерегулирования отрабатывает изменение задания тока и в установившемся режиме с высокой точностью формирует сетевой ток в противофазе с напряжением сети. В момент времени t_2=66.54 мс скачком изменяется фазовый сдвиг сигнала задания тока относительно напряжения $i_{L1}^{*} = 4.5\sqrt{2}\sin(2\pi 50 - \pi/6)$, что соответствует режиму потребления активной и реактивной мощности. Инвертор отрабатывает изменение задания с высокой точностью. В момент времени t_3=105.872 мс скачком изменяется фазовый сдвиг сигнала задания тока относительно напряжения $i_{L1}^{*} = 4.5\sqrt{2}\sin(2\pi 50 + \pi/6)$, что соответствует режиму потребления активной и генерации реактивной мощности. И в этом случае инвертор с высокой точностью отрабатывает задание без колебаний и перерегулирования.

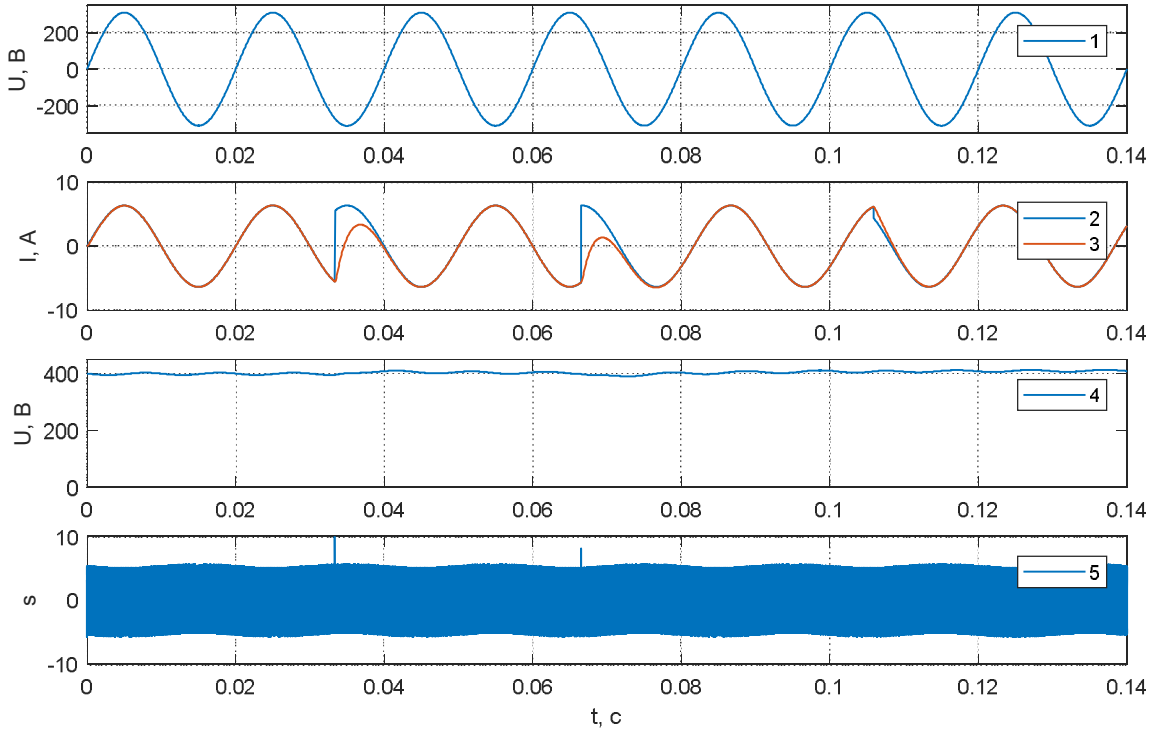


Рисунок 5 – Временные диаграммы работы инвертора: *1 – u_{in}; 2 – i_{L1}^{*}; 3 – i_{L1}; 4 – u_{C2}; 5 – s.*

Во всех установившихся режимах ток сети имеет гармоническую форму (THD_i<0.36%), при этом коэффициент гармоник напряжения в точках подключения преобразователя к сети THD_u<0.0036%, что соответствует высокой степени электромагнитной совместимости преобразователя с сетью.

Таким образом, в работе получено управление, обеспечивающее любое направление потока мощности, высокую точность формирования параметров электроэнергии и высокую степень электромагнитной совместимости с сетью. Сетевой инвертор энергороутера способен выполнять функции активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Список источников

1. Huang, A. Q., Crow, M. L., Heydt, G. T., Zheng, J. P., & Dale, S. J. (2011). The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet. *Proceedings of the IEEE, 99*(1), 133-148. doi:10.1109/JPROC.2010.2081330

2. Уткин, В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В. И. Уткин. М.: Наука, 1974. 272 с.

3. Скурятин, Ю. В. Параллельный силовой активный фильтр с управлением на скользящих режимах / Ю. В. Скурятин, А. В. Белоусов, Н. А. Денисевич // Проблемы региональной энергетики. 2018. №. 2 (37). С. 20–30. https://doi.org/10.5281/zenodo.1343408

4. Белоусов, А. В. Двухконверторный силовой активный фильтр с пониженными динамическими потерями: синтез управления и моделирование / А. В. Белоусов, Ю. В. Скурятин, Н. А. Денисевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, No 5. С. 398–411. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-398-411

5. Ruiz Allende F., Perez M.A., Espinosa J.R., Gajowik T., Stynski S., Malinowski M. Surveying Solid-State Transformer Structures and Controls: Providing Highly Efficient and Controllable Power Flow in Distribution Grids. *IEEE Industrial Electronics Magazine,* 2020, vol. 14, no. 1, pp. 56-70.

6. Schibli N. Symmetrical multilevel converters with two quadrant DC-DC feeding. p. 294, 2000. [Online]. Available: http://infoscience.epfl.ch/record/32696

Скурятин Юрий Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им. В. Г. Шухова. 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: yvs-work@mail.ru.

Белоусов Александр Владимирович, кандидат технических наук, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем БГТУ им. В. Г. Шухова. 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: ntk@intbel.ru.

Жилин Евгений Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им. В. Г. Шухова. 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: zhilinevg@mail.ru.

Саввин Никита Юрьевич, канд. техн. наук, ст. преп. кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им. В. Г. Шухова. 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: n-savvin@mail.ru.

UDC 620.97

ENERGY ROUTER FOR INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH A SINGLE-PHASE AC NETWORK: CONTROL SYNTHESIS AND MODELING

Skuriatin Y. V., Belousov A. V.,* Zhilin *E.V.*, Savvin *N.Y.

Russia, Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhov

Summary. The results of the synthesis control of energy router are shown. Evaluation of the effectiveness of the resulting control was carried out by modeling in the Matlab package. The simulation results showed the ability of the converter to transmit electricity in the forward and reverse directions and perform the functions of an active filter-compensating device.

Keywords: sliding mode, pulse width modulation, power quality.

References

1. Huang, A. Q., Crow, M. L., Heydt, G. T., Zheng, J. P., & Dale, S. J. (2011). The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet. *Proceedings of the IEEE, 99*(1), 133-148. doi:10.1109/JPROC.2010.2081330

2. Utkin V.I. Skol'zyashchie rezhimy i ikh primenenie v sistemakh s peremennoy strukturoy. Moscow, Nauka, 1974. p. 272.

3. Skuriatin, Y. V. Sliding Mode Control Based Shunt Active Power Filter / Y. V. Skuriatin, A. V. Belousov, N. A. Denysevych // Problemele Energeticii Regionale. 2018. Vol. 2 (37). P. 20–30. https://doi.org/10.5281/zenodo.1343408.

4. Belousov A. V., Skuriatin Y. V., Denysevich N. A. (2022) Dual-Converter Active Power Filter with Reduced Dynamic Losses: Control Synthesis and Modeling. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 398–411. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-398-411 (in Russian)

5. Ruiz Allende F., Perez M.A., Espinosa J.R., Gajowik T., Stynski S., Malinowski M. Surveying Solid-State Transformer Structures and Controls: Providing Highly Efficient and Controllable Power Flow in Distribution Grids. *IEEE Industrial Electronics Magazine,* 2020, vol. 14, no. 1, pp. 56-70.

6. Schibli N. Symmetrical multilevel converters with two quadrant DC-DC feeding. p. 294, 2000. [Online]. Available: http://infoscience.epfl.ch/record/32696

Skuriatin Yurii Vasil'evich, Ph.D. (Engineering), associate professor of BSTU named after V.G. Shukhov. 308012, Belgorod, 46 Kostyukova street. E-mail: yvs-work@mail.ru.
Belousov Aleksandr Vladimirovich, Ph.D. (Engineering), Director of the Institute of Energy, Information Technologies and Control Systems of BSTU named after V.G. Shukhov. 308012, Belgorod, 46 Kostyukova street. E-mail: ntk@intbel.ru.
Zhilin Evgenii Vitalevich Ph.D. (Engineering), Associate Professor of BSTU named after V.G. Shukhov. 308012, Belgorod, 46 Kostyukova street. E-mail: zhilinevg@mail.ru.
Savvin Nikita Yurievich Ph.D. (Engineering), Senior teaching of BSTU named after V.G. Shukhov. 308012, Belgorod, 46 Kostyukova street. E-mail: n-savvin@mail.ru.

УДК 621.31/622.69

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СКВАЖИН ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМИ УЭЦН

Мезенцева А.В.
Россия, г. Нижневартовск, Нижневартовский государственный университет

Аннотация. Приводятся комплексные энергоэффективные решения применения погружного оборудования в нефтедобывающей промышленности, рассмотрены возможности применения УЭЦН повышенной надежности в условиях эксплуатации геотермальных скважин. Результаты работы позволяют усовершенствовать технологию разработки и эксплуатации скважин, эксплуатировать скважины с различной продуктивности, обеспечивая максимальную эффективность.

Ключевые слова: установки электроцентробежных насосов, погружной электродвигатель, скважина, добыча нефти, энергоэффективность, надежность, эксплуатация.

Повышение энергоэффективности нефтедобычи на сегодняшний день является одной из наиболее важных и актуальных вопросов как в России, так и во всем мире. Доля затрат на электрическую энергию в общей структуре себестоимости добычи энергоресурсов, согласно статистическим данным, возрастает в среднем за год на 3-4%. Подъем скважинной продукции механизированным способом добычи влечет за собой более 50% расходов на электрическую энергию. В сегменте механизированной нефтедобычи на долю России приходится около 28,3 млрд кВт-ч в год энергопотребления [1].

В последнее время возрастает доля энергии, получаемой из альтернативных источников, среди них растет и доля геотермальных станций. За период 2010-2015 гг.

© Мезенцева А.В., 2022

значительно увеличилось производство энергии на основе геотермальных источников, ее объем возрос с 48,5 МВт до 71 МВт, в планах по развитию на 20-е годы запланировано увеличение до 95 МВт (рисунок 1) [2].

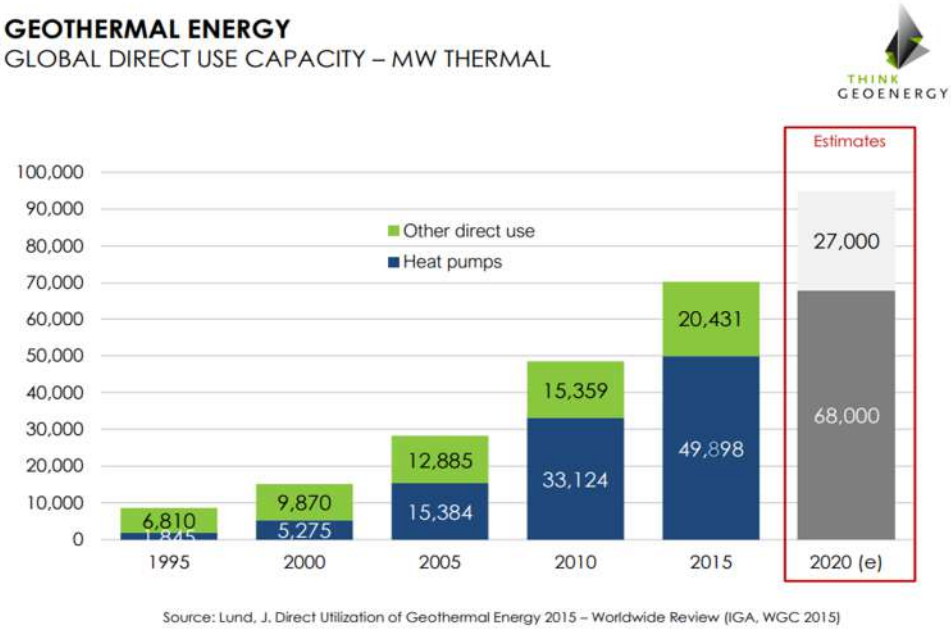


Рисунок 1 – Прогнозирование развития геотермальной энергетики [2]

В связи с увеличением объемов добычи и снижением пластовых давлений геотермальная энергетика сталкивается с рядом проблем. Применение техники поддержания пластового давления (ППД) ограничено из-за высоких температур пластовых вод и необходимости нести большие капитальные затраты на строительство инфраструктуры. Рассматриваемый способ добычи нефти с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) представляет собой универсальный, надежный и экономически эффективный вариант, который дает возможность осуществлять эксплуатацию скважин с разной продуктивностью и производить подъем на поверхность энергетического носителя с различных глубин.

Исследования и применение новых технологий в установках насосов электроцентробежного действия решают, в основном, индивидуальные проблемы на нефтедобывающих скважинах. Для производства геотермальной энергии пока еще не разработано комплексного решения, в которых бы УЭЦН работала надежно. Высокие температуры перекачиваемой пластовой воды и, соответственно, окружающей среды оказывают влияние на сохранность оборудования. Для решения проблематики применения УЭЦН компания «Новомет-Пермь» (далее Компания) предлагает самые современные технологические решения для эксплуатации геотермальных скважин [3]:

- сохранность свойств эластомеров на весь гарантийный срок службы обеспечивается заменой всех резинотехнических уплотнений УЭЦН на аналогичные высокотемпературные изделия на основе NBR, HNBR (HSN), Viton, AFLAS, EPDM,VMQ и других каучуков;

- при эксплуатации после производства монтажа насосных установок и их спуска на запланированную технологическую глубину из-за высоких пластовых температур в них увеличивается объем масла, что вызывает необходимость применения тандемной гидрозащиты, которая позволяет компенсировать утечки масла в погружных электродвигателях (ПЭД) и тепловые изменения объема масла в них при работе и остановке двигателя. Благодаря данной технологии гидрозащиты увеличивается запас прочности из-за наличия большого числа торцевых уплотнений. Также запасной осевой подшипник служит резервом при отказе основного подшипника;

- применение специальных моторных синтетических масел высокого класса вязкости,

используемых в УЭЦН, работающих в условиях повышенных температур, дает возможность при различных скважинных параметрах обеспечивать достаточно высокую диэлектрическую проницаемость среды и поддерживать стабильность смазочных свойств;

- у специально разработанных ПЭД внедрен ряд технических решений, повышающих надежность изоляционных свойств материалов в течение регламентированного срока эксплуатации. Обмотки статора погружного электродвигателя пропитываются эпоксидной высокотемпературной смолой немецкого производства LORD, что обеспечивает хорошие защитные свойства изоляции. В результате полной заливки обмоток статора компаундом происходит 10-тикратное увеличение эффективности их изоляционных свойств, снижается механический и электрический износ и уменьшается перегрев электродвигателя;

- технологический опыт и собственное кабельное производство Компании позволяет делать строительную длину без сростки с удлинителем, тем самым устраняя слабое место кабельной линии.

- также методом уменьшения влияния скважинных условий и пластовых параметров на ПЭД является замена традиционно применяемых специальных асинхронных электродвигателей вентильными электрическими двигателями (ВЭД), что обеспечивает лучшие энергетические показатели и повышает эффективность эксплуатации УЭЦН, которые имеют меньшие габариты и повышенные напорные характеристики. Решить проблему высокого энергопотребления позволяют энергоэффективные насосные установки электроцентробежного действия с высоким КПД до 79% и подачей в номинальном режиме 3000 $м^3$/сут, что снижает потребление электрической энергии и сокращает затраты, связанные с эксплуатацией скважин [4].

В качестве электрического привода энергоэффективных насосных установок применены серийно выпускаемые высокооборотные вентильные погружные электрические двигатели ВЭД серии ПВЭДН3 с номинальной скорость вращения до 5820 об/мин. Ротор ПЭД данных типов двигателей конструктивно выполнен в виде четырехполюсного магнита из высокотемпературного спеченного магнитотвердого материала с низким тепловыделением. Благодаря такой технологии удельные тепловые потери двигателя уменьшаются, тем самым снижается удельное энергопотребление и, соответственно, затраты на электрическую энергию. КПД ПВЭДН достигает более 95% (рисунок 2).

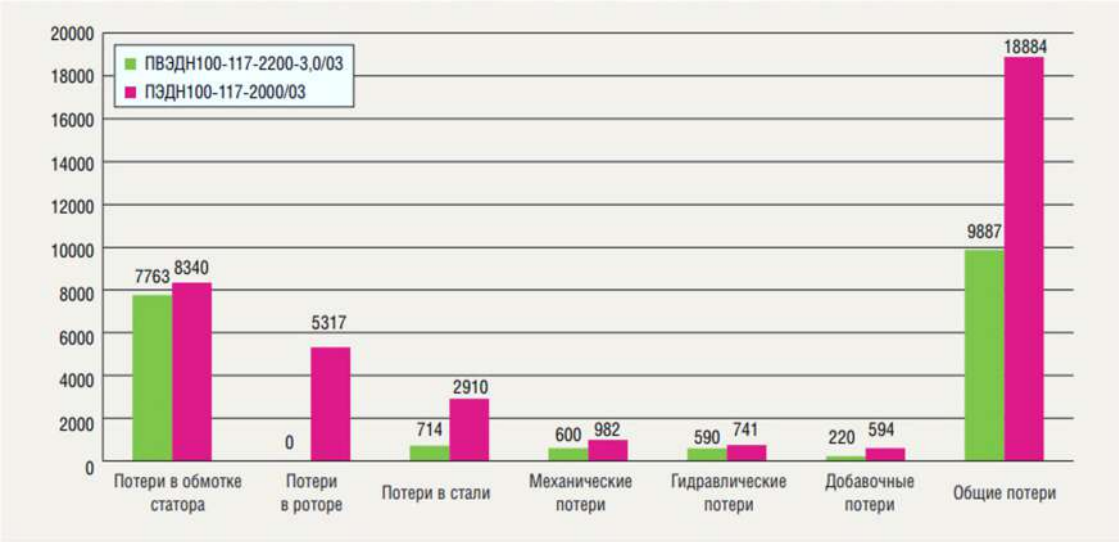


Рисунок 2 – Сравнение энергетических показателей в вентильных и асинхронных электродвигателях (потери, Вт) [4]

Экспериментальные исследования вновь вводимого оборудования проводятся на базе испытательной скважины ОКБ БН КОННАС, в которой поддерживается температура в 210° С, что позволяет тестировать промысловое оборудование перед вводом в эксплуатацию. Кроме того, делается упор на постоянные разработки нового технологичного оборудования. Таким образом, есть возможность практически мгновенно тестировать разработки и

своевременно готовить комплексные решения для надежной работы УЭЦН в геотермальной среде.

На текущий момент по всему миру эксплуатируется 14 скважин с температурой выше 120° С, средняя наработка на отказ скважинных насосов составляет 410 суток. В Турции запущено 3 скважины с наработками 110, 15 и 3 суток. Все насосы выдают расчетные параметры и показывают стабильную работу (рисунок 3) [3].

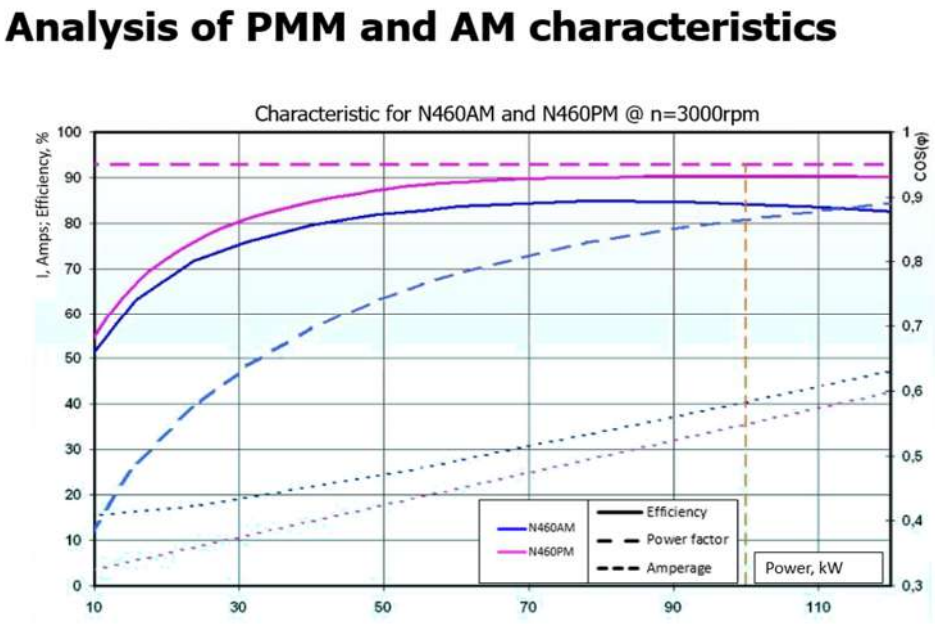


Рисунок 3 – Эффективность и коэффициент мощности различных типов насосов [3]

Выводы.

Современные и энергоэффективные решения дают возможность осуществлять комплексный подход и эффективно решать проблемы эксплуатации высокотемпературных геотермальных скважин. Широкий рабочий диапазон насосов и обширный каталог разрабатываемого оборудования позволяет подобрать погружное оборудование, индивидуально подходящее к каждой скважине, что обеспечивает максимальную эффективность, защиту оборудования, повышая его надежность и снижая материальные затраты.

Список источников

1. Энергосберегающие насосные системы - ключ к снижению себестоимости добычи нефти. URL: https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/331456-energosberegayushchie-nasosny e-sistemy-klyuch-k-snizheniyu-sebestoimosti-dobychi-nefti/ (дата обращения: 22.10.2022).

2. Lund, J. Direct Utilization of Geothermal Energy - Worldwide Review (IGA, WGC 2015). 2015. p.66-93.

3. Столбов А.В., Мезенцева А.В. Эксплуатация геотермальных скважин с помощью центробежного насоса с погружным электродвигателем // Проблемы повышения энерго-эффективности топливно-энергетического комплекса России: Материалы всероссийского с международным участием научно-практического семинара. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет. 2019. С. 122–125.

4. Карпюк А.В. Повышение энергоэффективности добычи. Энергоэффективные УЭЦН с вентильными электродвигателями // Инженерная практика. 2017. № 5. С. 14–19.

Мезенцева Антонина Викторовна, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики НВГУ. 628602, Ханты-Мансийский Автономный округ - Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина, д.56. E-mail: mezentseva_a@bk.ru.

UDC 621.31/622.69

ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS FOR WELLS OPERATED BY ESP

Mezentseva A.V.
Russia, Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University

Summary. Comprehensive energy-efficient solutions for the use of submersible equipment in the oil industry are presented, the possibilities of using high-reliability ESPs in the operating conditions of geothermal wells are considered. The results of the work make it possible to improve the technology of well development and operation, to operate wells with different productivity, ensuring maximum efficiency.

Keywords: installations of electric centrifugal pumps, submersible electric motor, well, oil production, energy efficiency, reliability, operation.

References

1. Ehnergosberegayushchie nasosnye sistemy - klyuch k snizheniyu sebestoimosti dobychi nefti. URL: https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/331456-energosberegayushchie-nasosny e-sistemy-klyuch-k-snizheniyu-sebestoimosti-dobychi-nefti/ (data obrashcheniya: 16.10.2022).
2. Lund, J. Direct Utilization of Geothermal Energy - Worldwide Review (IGA, WGC 2015). 2015. r.66-93.
3. Stolbov A.V., Mezentseva A.V. Ehkspluatatsiya geotermal'nykh skvazhin s pomoshch'yu tsentrobezhnogo nasosa s pogruzhnym ehlektrodvigatelem // Problemy povysheniya ehnergo-ehffektivnosti toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa Rossii: Materialy vserossiiskogo s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskogo seminara. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskii gosudarstvennyi universitet. 2019. S. 122–125.
4. Karpyuk A.V. Povyshenie ehnergoehffektivnosti dobychi. Ehnergoehffektivnye UEHTSN s ventil'nymi ehlektrodvigatelyami // Inzhenernaya praktika. 2017. № 5. S. 14–19.

Mezentseva Antonina Viktorovna, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy of NVSU. 628602, Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra, Nizhnevartovsk, Lenin str., 56. E-mail: mezentseva_a@bk.ru

---

УДК 621.311

СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОТТЕДЖА

Походных М.С.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

Аннотация. В статье автор рассматривает возможность электроснабжения частного жилого дома от гибридной солнечной электростанцией применительно к условиям Орловской области.

Ключевые слова: солнечная электростанция, применение.

В данной работе будет рассмотрена сама возможность использования солнечной электростанции (СЭС) для электроснабжения частного жилого дома на территории Орловской области в качестве основного источника электроснабжения, необходимое оборудование и режимы электропотребления, как по мощности, так и периодичности в разные сезоны года [1].

Выбор параметров СЭС был произведен после аудита электропотребления, в результате которого была выявлена присоединенная мощность, максимальная среднесуточная нагрузка и суточное потребление в самый энергозатратный зимний месяц. Суточный график токовых нагрузок, измеренных электроанализатором Metrel MI 2492, показан на рисунке 1.

© Походных М.С., 2022

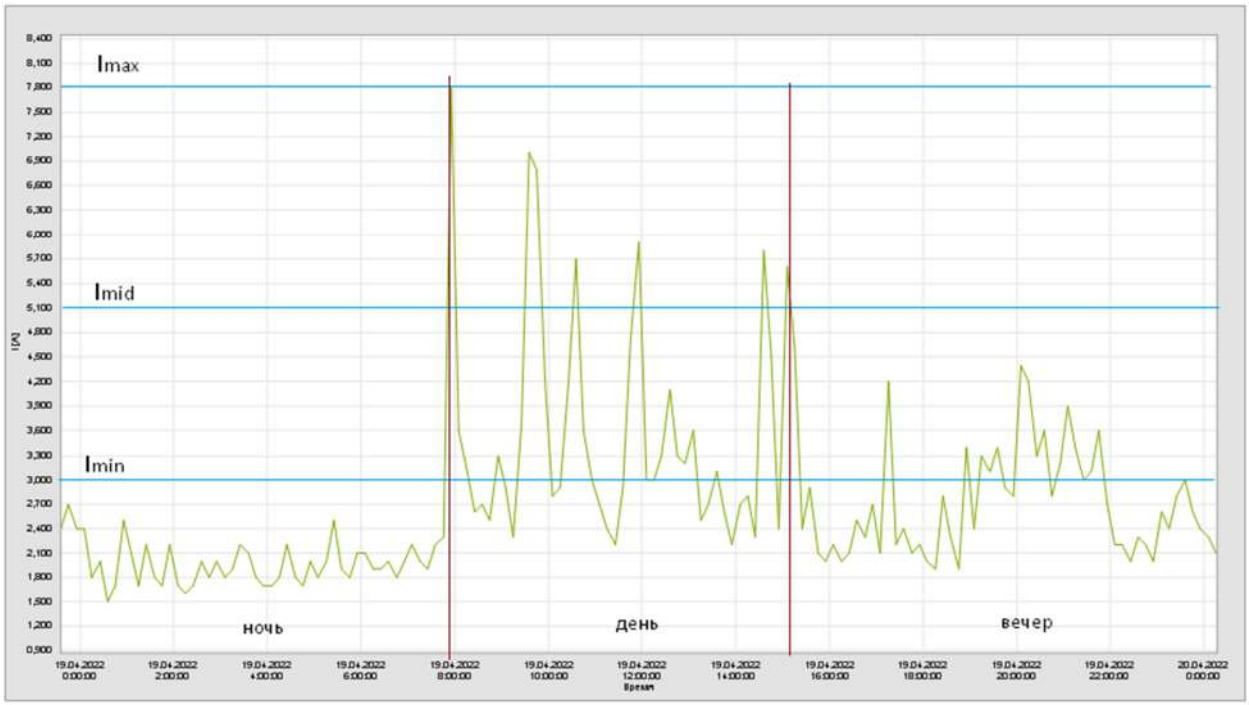


Рисунок 1 - Суточный график токовых нагрузок

Потребляемую мощность можно разделить на три уровня до 0,7 кВт/час – минимальный (ночное время суток), до 1,1 кВт/час – средний (дневное), до 2 кВт/час максимальный (утро в период с 8 до 10 часов). Потребление составило:

$$W_{ночь} = W_1 + \ldots W_8 = 3{,}5 \text{ кВт};$$

$$W_{день} = W_1 + \ldots W_9 = 7{,}9 \text{ кВт};$$

$$W_{вечер} = W_1 + \ldots W_7 = 4{,}2 \text{ кВт}.$$

Суточное потребление составило:

$$W_{сут.} = W_{ночь} + W_{день} + W_{вечер} = 15{,}6 \text{ кВт}.$$

Для определения мощности электростанции был произведен расчет потребления электроэнергии частного дома по месяцам, который представлен в таблице 1

Таблица 1 - Годовое потребление электроэнергии по месяцам

Месяцы	Потребление, кВт·ч
Январь	483,7
Февраль	399,9
Март	375,7
Апрель	340,3
Май	291,0
Июнь	234,7
Июль	241,2
Август	266,7
Сентябрь	322,3
Октябрь	349,1
Ноябрь	375,9
Декабрь	405,9

Принцип работы солнечной панели основан на преобразовании энергию солнечного излучения в электрическую. Луч воздействует на частицы кремния, которые являются основой состава батарей (солнечной панели) [2].

Таблица 2 – Параметры для выбора СЭС

Месяцы	Потребление, кВт·ч	Генерация СЭС, кВт·ч	Солнечная инсоляция, кВт·ч/м^2
Январь	483,7	548,0	1,98
Февраль	399,9	767,4	3,07
Март	375,7	1016,3	4,08
Апрель	340,3	1146,3	4,28
Май	291,0	1256,2	5,34
Июнь	234,7	1277,6	5,30
Июль	241,2	1266,5	5,20
Август	266,7	1175,7	4,72
Сентябрь	322,3	916,0	3,42
Октябрь	349,1	680,8	2,46
Ноябрь	375,9	509,7	1,73
Декабрь	405,9	431,7	1,56

По расчетному энергопотреблению выбрано 9 фотоэлектрических панелей, мощность каждой 170 Вт. Общая мощность элементов составила 1530 Вт·ч. Солнечная инсоляция взята для Орла по наблюдениям за последние 2 года.

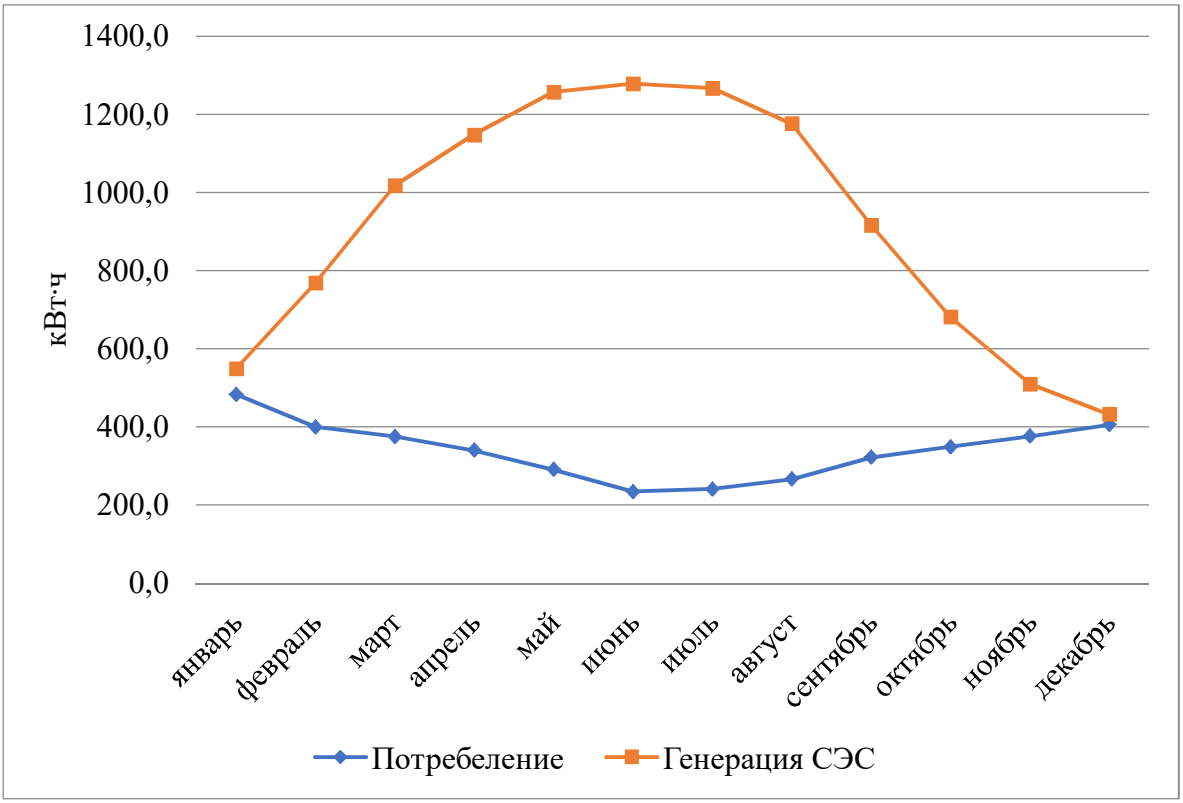


Рисунок 2 – Годовой график электрической нагрузки коттеджа и генерации СЭС

В данном случае солнечная генерация полностью перекрывает потребности в электроэнергии за год, в случае недостатка энергии от генерации СЭС, питание будет

производиться от энергосети. Избыток энергии в летний период может быть полезно потреблен электрическим бойлером горячей воды или отдан в сеть по зеленому тарифу [3].

Для работы СЭС применен гибридный инвертор мощностью 3 кВ·А, совмещающий в себе контроллер, зарядное устройство до 50 А, с возможностью выбора приоритетов зарядки и нагрузки. Инвертор может использовать энергию от аккумуляторов, заряжаемых от возобновляемого источника энергии, одновременно с энергией от сети/генератора, не отключаясь от сети [4].

Гибридный инвертор является универсальным инструментом в работе солнечной фотоэлектрической станции для обеспечения надежного электроснабжения. Он, совмещает в себе несколько устройств одновременно, а именно:

- солнечный котроллер (управляет режимом заряда АКБ)
- инвертор (преобразует постоянный ток низкого напряжения в переменный ток промышленной частоты напряжением 220 вольт)
- устройство автоматического ввода резерва (АВР) при пропадании сетевого напряжения. Если СЭС выбрана как резервная.
- устройство автоматического ввода резерва (АВР) электро-бензогенератора при отсутствии сетевого напряжения и понижении напряжения АКБ ниже допустимого.

Все эти устройства связаны алгоритмом работы, выбранным пользователем и учитывает все нюансы собственной выработки электрической энергии и режимов потребления.

Приоритет отдается какому-то одному источнику, а второй находится как резерв и подключается в случае потери напряжения.

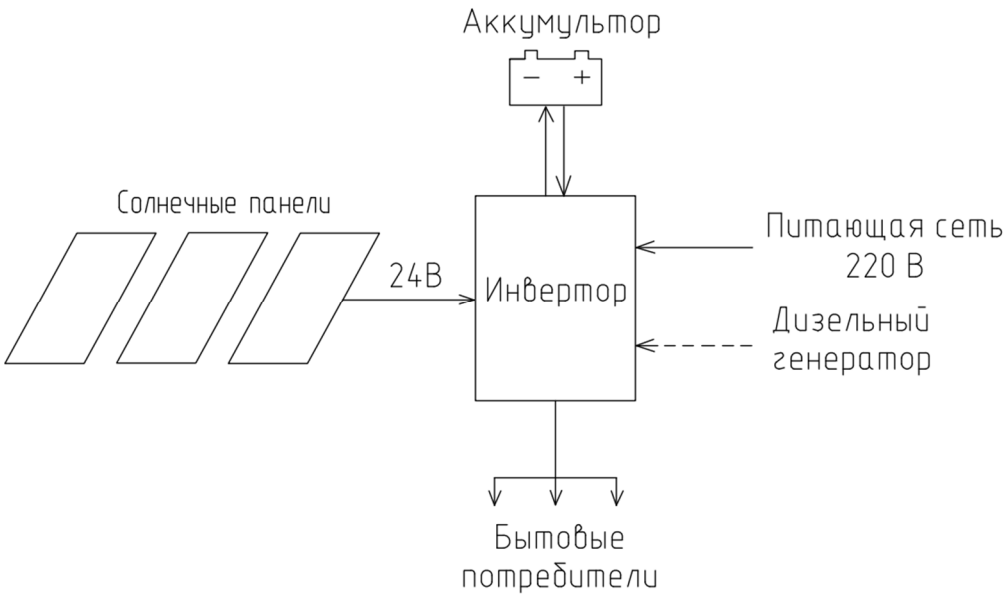


Рисунок 3 – Схема подключения СЭС

В связи с тем, что солнечная генерация зависит от величины солнечной энергии, получаемой солнечными панелями и неравномерна в течение суток, их разделяют три промежутка:

- день. В этот период энергия солнца попадает на фотоэлемент, преобразуется в электричество и подается к инвертору для преобразования. На выходе получается напряжение, соответствующее бытовой сети. После этого устройство питает электрическую сеть дома, заряжает АКБ, а при чрезмерном заряде отдает «лишнее» в общую сеть по «зеленому» тарифу.
- вечер, ночь. С учетом выбранного режима гибридный инвертор подает напряжение на дом от АКБ или от энергосистемы.

Благодаря переключению режимов, обеспечивается круглосуточная подача электричества в бытовую сеть без сбоев (даже при потере одного из источников питания).

Гибридный инвертор работает с аккумуляторами разных типов на напряжение 24 В [5]. Емкость АКБ выбирается в соответствии с суточным графиком (рисунок 1), необходимо обеспечивать нагрузку 0,3 кВт в ночное время 8 часов. Расчет аккумулятора:

$$T = U_{бат} \cdot E_{ак} \cdot K \cdot \eta \cdot K_p \cdot K_g / P_{нагр} \quad (1),$$

$$T = 12 \cdot 200 \cdot 2 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}97/300 = 12{,}2.$$

где T – время автономной работы источника бесперебойного питания, ч; $U_{бат}$ – напряжение аккумуляторной батареи, В; $E_{ак}$ – емкость аккумуляторной батареи, А·ч; K – количество аккумуляторов в цепи; η – КПД преобразователя (η = 0,75 – 0,98); K_p – коэффициент глубины разряда 0,8 – 0,98; K_g – коэффициент доступной емкости, 0,97 $P_{нагр}$ – мощность нагрузки, 300 Вт. Время работы от АКБ перекрывает потребности СЭС в ночной период зимнего месяца. В соответствии с расчетом принимаем два аккумулятора по 12 Вольт, 200 А/час.

Список источников

1. Земсков, В. И. Возобновляемые источники энергии в АПК. Учебное пособие / В.И. Земсков. - М.: Лань, 2014. - 368 с.

2. Паращук, Д. Ю. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии: препринт / Д. Ю. Паращук; МГУ. - М.: УНЦ ДО НИИЯФ МГУ, 2009. - 20 с.

3. Кашкаров, Андрей Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / Андрей Кашкаров. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 144 с.

4. Кашкаров, А. П. Автономное электроснабжение частного дома / А.П. Кашкаров. - М.: Феникс, 2015. - 144 с.

5. Кашкаров, Андрей Аккумуляторы. Справочник / Андрей Кашкаров. - М.: АВТОР, 2014. - 187 с.

Походных Михаил Сергеевич студент, ОГУ И.С. Тургенева г. Орёл, 302015, E-mail: pohodnih16@gmail.com, тел: +79534737692.

UDC 621.311

SOLAR POWER PLANT FOR COTTAGE POWER SUPPLY

Pokhodnykh M.S.

Russia, Orel, Oryol State University named after I.S. Turgenev

Summary. In the article, the author considers the possibility of power supply to a private residential building from a hybrid solar power plant in relation to the conditions of the Orel region.

Keywords: solar power plant, application.

References

1. Zemskov, V. I. Renewable energy sources in agriculture. Textbook / V.I. Zemskov. - M.: Lan, 2014. - 368 p.

2. Parashchuk, D. Yu. Modern photovoltaic and photochemical methods of solar energy conversion: preprint / D. Yu. Parashchuk; MSU. - M.: UNC TO NIIYAF MSU, 2009. - 20 p.

3. Kashkarov, Andrey Wind generators, solar panels and other useful structures / Andrey Kashkarov. - Moscow: DMK Press, 2012. - 144 p.

4. Kashkarov, A. P. Autonomous power supply of a private house / A.P. Kashkarov. - M.: Phoenix, 2015. - 144 p.

5. Kashkarov, Andrey Accumulators. Directory / Andrey Kashkarov. - M.: AUTHOR, 2014. - 187 p.

Pokhodnykh Mikhail Sergeevich, student, OGU I.S. Turgeneva, Orel, 302015, E-mail: pohodnih16@gmail.com , tel: +79534737692.

УДК: 621.316.9

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО ОДНОПРОВОДНЫМ ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 10 кВ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Чернышов В.А., Головин Р.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева"

Аннотация. В статье представлено теоретическое обоснование целесообразности использования системы временного электроснабжения по однопроводным воздушным линиям электропередачи 10 кВ в условиях чрезвычайных ситуаций. Предлагается эффективное схемотехническое решение по реализации однопроводной системы высоковольтного электроснабжения с описанием специфики его функционирования.

Ключевые слова: Система временного электроснабжения, однопроводные воздушные линии электропередачи 10 кВ, смешанная» система распределения электроэнергии, статический конденсатор, трансформатор.

Как показывает история, все этапы развития человеческого общества неразрывно связаны со стихийными бедствиями, авариями и катастрофами. По данным Международного Комитета Красного креста, чрезвычайные ситуации (ЧС) природного характера унесли в двадцатом столетии более 11 млн. жизней и нанесли колоссальный материальный ущерб инфраструктуре [1]. На современном этапе развития, человеческая цивилизация все чаще и чаще сталкивается с ЧС природного или техногенного характера. Для эффективного противостояния ЧС необходимо не только иметь огромный запас материально-технических ресурсов, но и крайне важно развивать новые энергоэффективные технологии противодействия ЧС, в том числе направленные на оперативное восстановление утраченных систем электроснабжения. Как известно, для ликвидации ЧС необходимы различные электрифицированные инструменты и приспособления, такие как электропилы, электролебедки, электронасосы, тепловые пушки, радиостанции и т.п. [2]. Данное оборудование получает питание от автономных источников энергии (дизельных или бензиновых электрогенераторов). Следует отметить, что мощность автономных электростанций ограничена, а продолжительность их работа определяется запасом жидкого топлива. Кроме того, данные источники питания имеют ограниченный ресурс работы и требуют высококвалифицированного обслуживания и ремонта. В условиях ЧС, характеризующиеся большим количеством пострадавших, отмеченные недостатки могут стать причиной гибели и страданий людей и существенным образом затруднят проведении спасательной операции.

Авторы данной публикации полагают, что в отдельных случаях, в качестве более мощного и стабильного источника энергии может послужить быстро развертываемая однопроводная система высоковольтной электропередачи, использующая в качестве второго токопровода землю. По сравнению с классической трехпроводной высоковольтной системой электроснабжения она позволяет существенно (до 67 %) снизить расход проводов и изоляторов, а также значительно минимизировать массогабаритные размеры несущих конструкций. При этом, в случае использования изолированного провода, изоляция которого обладает большим запасом диэлектрической прочности, появляется заманчивая возможность полностью отказаться от изоляторов и несущих конструкций. Это позволит существенно сократить материальные, трудовые и временные затраты при развертывании данной системы электропередачи и при необходимости увеличить ее протяженность практически в 10 раз по сравнению с протяженностью обычной высоковольтной линии электропередачи, что крайне важно в условиях возникновения ЧС.

Идеей для использования однопроводной системы высоковольтного электроснабжения в условиях возникновения ЧС послужили материалы научной статьи

© Чернышов В.А., Головин Р.А. 2022

«Электропередачи с использованием однопроводных переносных линий» опубликованные инженером В.М. Дмитриевым и доцентом В.А. Шустовым в 1950 году в 11 номере журнала «Электричество» [3].

Знакомство с материалами данной статьи позволило установить, что в 30-40-х годах прошлого столетия наряду с классической трехпроводной системой электропередачи 6 кВ, дошедшей до наших дней и высоковольтной системой электропередачи передачи «Два провода-земля», позволяющей до 33% экономить на расходе проводов изоляторов, широкое распространение получила, и так называемая смешанная система высоковольтного распределения электрической энергии. Данная система использовалась для электропитания маломощных сельскохозяйственных потребителей, т.к. обладала рядом немаловажных достоинств [4]. Во-первых, она позволяла упростить конструкцию понижающих подстанций, сократив их количество на объекте, при наличии однофазных отпаек от высоковольтных линий электропередачи. Во-вторых, обеспечивала сведение к минимуму протяжённость сетей низкого напряжения, в результате чего они могли быть выполнены исключительно одно проволочными стальными проводами. В-третьих, при смешанной системе высоковольтного распределения электрической энергии, один из проводников заменяется землей, в результате чего, трехпроводные системы электропередачи превращаются в двухпроводные, а двухпроводные в однопроводные. Это позволяло экономить провод и сокращает паразитные потери электрической энергии. В силу низкого коэффициента использования смешанных сетей, стационарные варианты их реализации, не нашли широкого применения, поэтому они сооружались в переносном виде. Переносные трехпроводные и двухпроводные воздушных линий, опытные образцы которых тестировались, в то время, лабораторией электрификации полеводства (ВИЭСХ) не получили широкого распространения, в связи с опасностью схлестывания проводов, требующей дальнейшего усложнения их конструкции. А так как проблема схлестывания проводов полностью разрешалась, в случае прокладки по опорам только одного провода, наиболее востребованными в сельском хозяйстве стали однопроводные варианты переносных сетей. В частности, они активно применялись в полеводстве для электропитания мобильных пунктов электромолотьбы, позволяя обслужить площадь обмолота в 10 раз большую, чем обычные стационарные трехпроводные пинии электропередачи.

Также из материалов статьи следует, что один из ее авторов (В. М. Дмитриев) в 1944 г. реализовал весьма интересный проект электроснабжения строительных работ при сооружении небольшой гидростанции. Электроснабжение строительной площадки которой осуществлялось от трансформаторной подстанции с однофазным трансформатором, удаленной от гидростанции на 1,5 км. Передача электрической энергии осуществлялась по однопроводной линии 6 кВ, выполненной одножильным стальным проводом диаметром 5 мм. Экспериментальная линия запитывала имеющийся на стройплощадке трехфазный трансформатор типа ТМ-50/6 на напряжение 6 000/230 В. Питание подавалась через трубчатый предохранитель на один из выводов первичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме «звезда», а между двумя оставшимися выводами, через трубчатые предохранители были подключены два статических конденсатора напряжением 6 кВ и емкостью 10 кВАр каждый, количество которых устанавливалось в зависимости от нагрузки на вторичной обмотке трансформатора. От вторичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме «треугольник» отходила линия низковольтного напряжения 220 В, запитывающая одновременно два транспортера с трехфазными асинхронными электродвигателями (АД) мощностью 3,5 кВт, два питателя с АД мощностью 2,2 кВт и один копер с АД мощностью2,5 кВт. Опыт эксплуатации описанной системы электрификации строительных работ при строительстве гидростанции в течении всего летнего сезона показал полную пригодность предлагаемой системы электроснабжения, так как все механизмы работали нормально и без аварий до окончания строительства гидростанции.

Вышеизложенное схемотехническое решение заслуживает особого внимания, т.к. при незначительной доработке оно позволит осуществлять электроснабжение мощных

трехфазных нагрузок, в том числе и электродвигательных, коими могут являться дренажные насосы, электролебедки, кислородные станции, использующиеся при проведении спасательных и аварийно-восстановительных работ в зоне ЧС.

На рисунке 1 представлен вариант реализации однопроводной системы электроснабжения 10 кВ. Единственным ее отличием от той, которая впервые была реализована в далеком 1944 году, является то, что передаваемое по однопроводной линии напряжение составляет 10 кВ, а обмотки силового трансформатора соединены по схеме треугольник/звезда. Данное изменение позволяет снизить тепловые потери в питающей однопроводной сети, а также использовать поврежденные стихией воздушные ЛЭП 10 кВ, имеющие хотя бы одну их уцелевших фазных цепь, а также задействовать, имеющиеся потребительские трансформаторные подстанции, обесточенные в связи с действием ЧС.

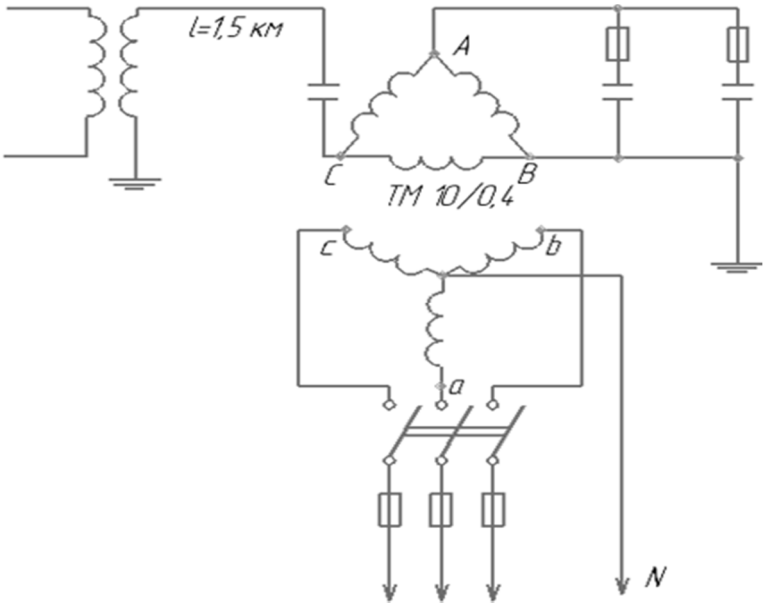


Рисунок 1 – Однопроводная система электроснабжения 10 кВ

Очевидно, что достоинством предлагаемой схемы электроснабжения является простота и дешевизна ее реализации, что позволяет в условиях возникновения ЧС быстро организовать передачу электрической энергии на большие расстояния.

Такими образом, авторами данной публикации обоснована целесообразность применения нового и хорошо забытого старого, инженерно-технического решения, позволяющего оперативно восстановить утраченное при ЧС электроснабжение и повысить эффективность проведения аварийно-спасательных работ.

Список источников

1. Официальный сайт МККК [Электронный ресурс]. https://www.icrc.org/ru (дата обращения: 01.11.2022).

2.Омельянович, А.С. Предпосылки создания, особенности и перспективы применения нового моторного подогревателя МП-20 / А.С. Омельянович, В.А. Чернышов // Вестник аграрной науки. 2018. № 3 (72). С. 101-106.

3. Дмитриев, В.М. Электропередачи с использованием однопроводных переносных линий / В.М. Дмитриев, В.А. Шустов // Электричество, №11. – 1950. – С.38-41

4. Захарин, А.Г. Смешанная система распределения электроэнергии в сельском хозяйстве / А. Г. Захарин, И. А. Будзко // Электричество, № 1. – 1939. – С.21-27

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 228л, тел. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Головин Роман Александрович, магистрант 2-го курса, направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89202873435, E-mail: golowin.roma2010@yandex.ru.

UDC: 621.316.9

JUSTIFICATION OF THE EXPEDIENCY OF USING TEMPORARY POWER SUPPLY SYSTEMS VIA SINGLE-WIRE OVERHEAD POWER LINES OF 10 kV IN EMERGENCY SITUATIONS

Chernyshov V.A., Golovin R.A

Russia, g. Orel, FGBOU VO "OGU im. I.S. Turgeneva"

Summary. The article presents a theoretical justification for the expediency of using a temporary power supply system via single-wire overhead power lines 10 kV in emergency situations. An effective circuit design solution for the implementation of a single-wire high-voltage power supply system with a description of the specifics of its operation is proposed.

Keywords: Temporary power supply system, 10 kV single-wire overhead power lines, mixed power distribution system, static capacitor, transformer

References

1. Official website of the ICRC [Electronic resource]. https://www.icrc.org/ru (date of access: 01.11.2022).
2. Omelyanovich, A.S. Prerequisites for the creation, features and prospects for the use of a new MP-20 motor heater / A.S. Omelyanovich, V.A. Chernyshov // Bulletin of agrarian science. 2018. No. 3 (72). pp. 101-106.
3. Dmitriev, V.M. Power transmission using single-wire portable lines / V.M. Dmitriev, V.A. Shustov // Electricity, No. 11. - 1950. - P.38-41
4. Zakharin, A.G. Mixed power distribution system in agriculture / A. G. Zakharin, I. A. Budzko // Electricity, No. 1. - 1939. - P. 21-27

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru

Golovin Roman Alexandrovich, 2nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89202873435, E-mail:golowin.roma2010@yandex.ru

---

УДК: 621.316.9

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОТЫСКАНИЯ НОВЫХ РЕШЕНИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6-10 кВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С.

Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.Тургенева»

Аннотация. В центре внимания статьи находится научная теоретическая постановка проблемы, мешающей эффективному функционированию современных систем электроснабжения 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Рассматриваются современные реалии их технологической отсталости и предпосылки возникновения. Представлен критический анализ практикующихся способов отыскания однофазных замыканий на землю, обуславливающих высокую вероятность возникновения двойных замыканий на землю и нарушения надежности электроснабжения потребителей. Обосновывается необходимость разработки и внедрения новых эффективных схемотехнических решений, позволяющих воздушным электрическим сетям 6-10 кВ вернуть утраченное преимущество режима изолированной нейтрали.

Ключевые слова: воздушная электрическая сеть 6-10 кВ с изолированной нейтралью; однофазное замыкание на землю; двойное замыкание на землю; перенапряжение; шаговое напряжение; оперативно-выездная бригада; надежность электроснабжения потребителей.

© Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С., 2022

Как известно, из истории развития отечественной электроэнергетики, прародителями современных воздушных распределительных электрических сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью, являлись электрические сети напряжением 6,6 - 19 кВ [1]. Они впервые появились более века назад, когда первые ручейки всеобщей электрификации, преодолевая бескрайние просторы Советской России, несли свет и тепло в удаленные от цивилизации сельскохозяйственные, захолустные районы. Изолированный режим работы данных электрических сетей, был принят не случайно, а с целью обеспечения надежности электроснабжения сельских потребителей, при возникновении в сети однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ). Это было оправдано тем, что, при возникновении ОЗНЗ, межфазное напряжение на первичных обмотках потребительских подстанций не изменялось и питающееся от них сельскохозяйственное электрооборудование (молотильные станы, водокачки, крупорушки и др.) продолжало работу в штатном режиме. Обратной стороной медали, при этом, являлось формирование опасного шагового напряжения, зона действия которого распространялась на 8-10 метров от места возникновения ОЗНЗ, а также повышение напряжения относительно земли в √3 раз, на неповрежденных фазах электрически связанной сети [2]. Очевидно, что с увеличением времени существования ОЗНЗ в воздушной электрической сети, увеличивалась и вероятность возникновения событий связанных с электропоражением людей и животных, в зонах действия шагового напряжения. Также очевидно, что с увеличением времени существования перенапряжений в электрической сети, увеличивалась вероятность возникновения режима двойного замыкания на землю (ДЗНЗ), сопровождающегося нарушением электроснабжения потребителей. Однако, высокий запас прочности мало изношенной линейной изоляции, а также небольшие, на тот момент времени, протяженность и разветвленность воздушных электрических сетей 6,6-19 кВ, позволяли электромонтерам быстро отыскивать и устранять ОЗНЗ, в большинстве случаев, еще до наступления, выше рассмотренных негативных последствий. Субъективные человеческие факторы: идеологический настрой, зашкаливающий энтузиазм, серьезное отношение к делу, также содействовали оперативности отыскания ОЗНЗ, даже несмотря на то, что правилами безопасности и правилами устройства для электроэнергетических сооружений сильных токов низкого и высокого напряжений, изданными в 1921 году [3], время отыскания ОЗНЗ не нормировалось. Только, почти 30 лет спустя первое издание ПУЭ, изданное двумя частями в 1949 и 1950 годах [3], стало регламентировать время, отводимое для отыскания ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ не более двух часов.

На сегодняшний день ситуация кардинально изменилась. Казалось бы, все хорошо, и научно-технический прогресс щедро одарил отечественную электроэнергетику разными инновационными технологиями и прогрессивными инженерно-техническими решениями. Чего только стоит тепловизорный мониторинг ВЛЭП, осуществляемый при помощи беспилотных летательных аппаратов [4], или высокоэффективная коммутация токов в вакууме [5], не говоря уже о возможностях интеллектуальных систем управления и контроля, выполненных на базе цифровых технологий [6]. Однако статистика аварийности и электротравматизма в современных распределительных сетях 6-10 кВ, общая протяженность которых превышает 1 миллион километров, печально свидетельствует о том, что их работу вряд ли можно считать высокоэффективной и этому есть соответствующие причины [7].

Для качественного и своевременного выполнения, полного объема ремонтно-восстановительных робот, соответствующего указанной протяженности, даже в рамках текущей эксплуатации, ежегодно требуются колоссальные материальные, трудовые и денежные ресурсы, не говоря уже о ресурсах, необходимых для проведения их своевременной реконструкции и модернизации [8].

В советские годы, благодаря государственной политике планирования народного хозяйства, финансирование мероприятий, направленных на развития воздушных электрических распределительных сетей 6-10 кВ было достаточным. В смутные 90-е годы политические и экономические потрясения в стране привели к тому, что новым собственникам электроэнергетического комплекса было не до того, чтобы заниматься

техническим перевооружением воздушных электрических сетей. В настоящее время, мы имеем физически и морально изношенную инфраструктуру 6-10 кВ, в которой новоиспеченная фея Цифровизация, к сожалению, еще не успела облететь каждую подстанцию. Поэтому неконтролируемые ОЗНЗ зачастую приводят к отключениям ВЛЭП релейной защитой, в связи с возникновением на них ДЗНЗ. В частности, это происходит и тогда, когда на подстанции срабатывает устройство неселективной сигнализации и ее дежурный персонал, или, прибывший в ее расположение, персонал ОВБ, по заданию диспетчера, оперативно реализуют проверенный временем «дедовский» метод поиска, «с игровым азартом» производя поочередное кратковременное выключение и включение отходящих ВЛЭП, в надежде с нескольких попыток угадать номер поврежденного присоединения. При этом, они руководствуются тем, что при отключении ВЛЭП с ОЗНЗ, устройство неселективной сигнализации перестает действовать на сигнал. Согласно действующим правилам организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики [9], процесс отыскания места повреждения изоляции на ВЛЭП 6-10 кВ проводится исключительно при снятом напряжении. До недавнего времени персоналу ОВБ разрешалось производить поиск ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ под напряжением, при помощи переносных приборов: «Поиск», «Волна», «Зонд», при неукоснительном соблюдении правил техники безопасности [10]. Конечно, отыскание места возникновения ОЗНЗ, на отключенной ВЛЭП 6-10 кВ, в полной мере обеспечивает безопасность персонала ОВБ, а также позволяет предотвратить негативное воздействие перенапряжений на линейную изоляцию. Однако данный поиск является весьма сложным и специфичным видом работ, он может растянуться на весьма продолжительный период времени, зависящий от многочисленных факторов: времени суток, времени года, погодных условий, рельефа местности, протяженности ВЛЭП, а также уровня профессионализма персонала ОВБ. Следует упомянуть, что в целях облегчения и ускорения процесса отыскания ОЗНЗ персонал ОВБ практикует способ, позволяющий сузить зону поиска и установить участок ВЛЭП с ОЗНЗ. Для этого по согласованию с диспетчером, он разделяет ВЛЭП с ОЗНЗ на две части и, связавшись по рации с дежурным подстанции или оставшимся на подстанции членом ОВБ, просит кратковременно подать напряжение на ВЛЭП с ОЗНЗ. В случае, если устройство контроля изоляции по-прежнему формирует сигнал, делается вывод о том, что ОЗНЗ находится на участке ВЛЭП до места разделения, соответственно если сигнала нет, то ОЗНЗ находится на участке ВЛЭП после места разделения. Несмотря на то, что рассмотренный способ существенно ускоряет процесс отыскания ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ, он весьма негативно влияет на питающихся от этой линии потребителей, которые в ожидании стабильного электроснабжения испытывают дополнительные социальные потрясения, т.к. это может вывести из строя имеющееся у них электрооборудование. При этом, данный способ может привести к возникновению ДЗНЗ на этой, или любой другой ВЛЭП, спровоцировав пробой изоляции одной из разноименных фаз.

Учитывая рассмотренные в статье сложности, связанные с идентификацией ОЗНЗ в современных системах электроснабжения 6-10 кВ, следует, что основное преимущество режима изолированной нейтрали, заложенное родоначальниками отечественной энергетики, на сегодняшний, день полностью утрачено. В этой связи, весьма актуальным и востребованным является разработка новых способов, позволяющих предотвращать возникновение ДЗНЗ в воздушных электрических сетях 6-10 кВ, имеющих однофазное повреждений изоляции и обеспечивать высокий уровень надежности электроснабжения потребителей. На сегодняшний день, коллектив кафедры электрооборудования и энергосбережения активно работает в данном направлении. Результатом этой работы является разработка нескольких радикальных схемотехнических решений, по материалам которых, в настоящее время, оформляются заявки на предполагаемое изобретение. Ожидается, что данные схемотехнические решения, позволят сетям с изолированной нейтралью избавиться от груза технологической отсталости и вернуть ранее заложенное в них предназначение.

Список источников

1. Электрификация СССР. Сборник документов и материалов 1926-1932 гг. – М.: Экономика, 1966. – С.52-59.

2. Барг, И.Г. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности / И.Г, Барг, В.И. Эдельман. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 258 с

3. Грудинский, П.Г.100-летие правил правила устройства электротехнических установок / П.Г. Грудинский, А.Л. Фаерман // Электричество, №12. – 1983. – С. 64-67

4. Арбузов, Р.С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи / Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников. – Новосибирск: Наука, 2009. – 135 с.

5. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств: учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.

6. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития / под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 300 с.

7. Качанов А.Н., Повышение надежности, безопасности и эффективности функционирования воздушных электрических сетей 10 кВ при возникновении однофазных замыканий на землю / А.Н. Качанов, Б.Н. Мешков Б.Н., А.Е. Печагин , М.Ш. Гарифуллин // Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты». – 2021. – С. 23-28

8. Мешков, Б.Н. Анализ влияния инвестиций в техническое обслуживания на частоту аварийных отказов ВЛ 6-10 кВ / Б.Н. Мешков, В.А. Чернышов // Агротехника и энергообеспечение, № 3 (3). – 2014. – С. 54-63

9. Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Последняя редакция. – М.: ЦЕНТРМАГ, 2022. – 388 с.

10. Арцишевский, Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью /Я. Л. Арцишевский // М: Высш. Шк., 1988. − 94 с.

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Лукьянов Геннадий Владимирович, магистрант 1 курса, направления подготовки 13.04.02 «электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.Тургенева», г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел: 89532929906, E-mail: lukyanov220@mail.ru.

Даровых Алина Сергеевна, магистрант 1 курса, направления подготовки 13.04.02 «электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.Тургенева», г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел: 89803676427, E-mail: alinkadarovyh1@gmail.com.

UDC: 621.316.9

JUSTIFICATION OF THE NEED TO FIND NEW SOLUTIONS INCREASING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS 6-10 kV IN THE OCCURENCE OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT

Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darovykh A.S.

Russia, Oryol, FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev»

Summary. The focus of the article is the scientific theoretical formulation of the problem, which interferes with the effective functioning of modern 6-10 kV power supply systems with an isolated neutral. The modern realities of their technological backwardness and the prerequisites for their occurrence are considered. A critical analysis of the practiced methods of finding single-phase earth faults, which cause a high probability of occurrence of double earth faults and a violation of the reliability of consumer power supply, is presented. The necessity of development and implementation of new effective circuit solutions is substantiated, allowing 6-10 kV overhead electrical networks to regain the lost advantage of the isolated neutral mode.

Keywords: overhead electrical network 6-10 kV with isolated neutral; single-phase earth fault; double short to ground; overvoltage; step voltage; operational team; reliability of power supply to consumers.

References

1. Electrification of the USSR. Collection of documents and materials 1926-1932. - M.: Economics, 1966. - S.52-59.
2. Barg, I.G. Overhead power lines: Issues of operation and reliability / I.G., Barg, V.I. Edelman. - M.: Energoatomizdat, 1985. - 258 p.
3. Grudinsky, P.G. Grudinsky, A.L. Faerman // Electricity, No. 12. - 1983. - S. 64-67
4. Arbuzov, R.S. Modern methods for diagnosing overhead power lines / R.S. Arbuzov, A.G. Ovsyannikov. - Novosibirsk: Nauka, 2009. - 135 p.
5. Nabatov, K.A. High-voltage vacuum switches of distributing devices: study guide / K.A. Nabatov, V.V. Afonin. - Tambov: Publishing House of GOU VPO TSTU, 2010. - 96 p.
6. Digital energy: a new paradigm of functioning and development / ed. N.D. Rogalev. - M .: MPEI Publishing House, 2019. - 300 p.
7. Kachanov A.N., Improving the reliability, safety and efficiency of 10 kV air power networks in the event of single-phase ground faults / A.N. Kachanov, B.N. Meshkov B.N., A.E. Pechagin, M.Sh. Garifullin // International Scientific and Practical Conference "Electric Networks: Reliability, Safety, Energy Saving and Economic Aspects". - 2021. - S. 23-28
8. Meshkov, B.N. Analysis of the impact of investment in maintenance on the frequency of emergency failures of 6-10 kV overhead lines / B.N. Meshkov, V.A. Chernyshov // Agricultural technology and energy supply, No. 3 (3). - 2014. - S. 54-63
9. Rules for the organization of maintenance and repair of electric power facilities. Last edition. – M.: TSENTRMAG, 2022. – 388 p.
10. Artsishevsky, Ya.L. Determining the places of damage to power lines in networks with isolated neutral / Ya. L. Artsishevsky // M: Higher. Shk., 1988. - 94 p.

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.
Lukyanov Gennady Vladimirovich, 1nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89532929906, E-mail: lukyanov220@mail.ru.
Darovykh Alina Sergeevna, 1nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89803676427, E-mail: alinkadarovyh1@gmail.com.

УДК: 621.313

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЧЕТА ВРЕМЕНИ ВЫЯВЛЕНИЯ, СУЩЕСТВОВАНИЯ, ОТЫСКАНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 10 кВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Гребенников А.А., Чернышов В.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева"

Аннотация. Рассматривается новая методика определения оптимального объема эксплуатационных затрат, инвестируемых в эксплуатируемые, проектируемые и модернизируемые воздушные электрические сети 10 кВ с изолированной нейтралью. Методика позволяет эффективно сбалансировать составляющие материальных, трудовых и финансовых ресурсов, необходимых для обеспечения оптимальных продолжительностей временных событий, таких как развитие, существование, отыскание и устранение однофазных замыканий на землю. Учитывая, что данные события во многом определяют уровень безопасности, надежности и экологичности электросетевой инфраструктуры, то методика ориентирована на повышение эффективности ее функционирования. Ожидается, что разработанный новый методический подход сможет заинтересовать специалистов ПАО «Росссети», занимающихся вопросами технико-экономического планирования при проектировании, реконструкции и модернизации воздушных электрических сетей данного класса напряжения.

© Гребенников А.А., Чернышов В.А., 2022

Ключевые слова: воздушные электрические сети 10 кВ с изолированной нейтралью, эффективность функционирования, эксплуатационные затраты, развитие, существование, отыскание и устранение однофазных замыканий на землю.

Обзор разделов технико-экономического характера, представленных в научно-исследовательских работах, посвященных вопросам усовершенствования воздушных электрических сетей разного класса напряжения, а также анализ существующих методик определения их технико-экономических показателей, указывают на то, что капитальные вложения, эксплуатационные затраты, годовая экономия и срок окупаемости является пожалуй одними из основных технико-экономических показателей [1].

Авторы данной публикации имеют основания полагать, что такой подход, применительно к воздушным электрическим сетям напряжением 10 кВ, работающим с изолированной нейтралью, не достаточно корректен, т.к. при оценке технико-экономической эффективности он не учитывает продолжительность следующих событий, таких как: существование, отыскание и устранение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Оптимизация процесса определения факта возникновения, поиска места и времени устранения ОЗЗ является важной научно-практической задачей, направленной на дальнейшее повышение уровня надежности и безопасности воздушных электрических сетей, рассматриваемого класса напряжения, а также улучшения экологической обстановки в зоне их эксплуатации [2].

На основании выше изложенного, при определении эксплуатационных затрат предлагается использовать следующую многофункциональную зависимость:

$$\sum_{i=1}^{a} З_{э\ i\ (\Delta t)} = f(T_{сущ.\ перенапр.}, T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ}, T_{пер.\ раб.}, T_{устр.\ ОЗЗ}) \rightarrow \min \qquad (1)$$

С учетом следующих, обязательных ограничений:

$$T_{сущ.\ перенапр.\ (\Delta t)} = \sum_{i=1}^{b} (T_{разв.\ ОЗЗ\ i} + T_{сущ.\ ОЗЗ\ i})_{(\Delta t)} \leq \sum_{1}^{b} T_{сущ.\ перенапр.\ макс.\ доп.\ (\Delta t)}; \qquad (2)$$

$$T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ\ (\Delta t)} = \sum_{i=1}^{c} (T_{сущ.\ напр.\ прик.\ (шаг.)\ i})_{(\Delta t)} \leq \sum_{1}^{c} T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ\ макс.\ доп.\ (\Delta t)}; \qquad (3)$$

$$T_{пер.\ раб.\ (\Delta t)} = \sum_{i=1}^{d} (T_{пер.\ раб.\ пл.\ i} + T_{пер.\ раб.\ ав.\ i})_{(\Delta t)} \leq \sum_{1}^{d} T_{пер.\ раб.\ макс.\ доп\ (\Delta t)}; \qquad (4)$$

$$T_{устр.\ ОЗЗ\ (\Delta t)} = \sum_{i=1}^{e} (T_{поиск\ ОЗЗ\ i} + T_{ликвид.\ ОЗЗ\ i})_{(\Delta t)} \leq \sum_{1}^{e} T_{устр.\ ОЗЗ\ макс.\ доп\ (\Delta t)}, \qquad (5)$$

где $\Delta t = t_1 \ldots t_2$ – рассматриваемый период времени функционирования воздушной электрической сети 10 кВ, например, час, декада, месяц, год [3];

$\Sigma З_{э\ (\Delta t)}$ – совокупные эксплуатационные затраты, обеспечивающие функционирование воздушной электрической сети за рассматриваемый период времени Δt;

$i = 1 \ldots a$ – количество операций в воздушной электрической сети, определяющие суммарные эксплуатационные затраты за рассматриваемый период времени Δt;

$i = 1 \ldots b$ – количество случаев превышений времени существования перенапряжений при ОЗЗ в воздушной электрической сети за рассматриваемый период времени Δt; (с учетом степени износа электрической сети);

$i = 1 \ldots c$ – количество случаев превышений времени действия потенциально опасных шагового напряжения и напряжения прикосновения при ОЗЗ в воздушной электрической сети за рассматриваемый период времени Δt; (зависит от плотности населения, проживающего вдоль трасс линий);

i = 1…d – количество случаев отключений линий (плановых и аварийных) за рассматриваемый период времени Δt;

i = 1…e – количество операций, связанных с устранением ОЗЗ за рассматриваемый период времени Δt;

$T_{сущ.ОЗЗi(\Delta t)}$ – суммарное время существования ОЗЗ, включающее этапы развития деффекта изоляции ($T_{разв.\ ОЗЗ}$) и устойчивого пробоя ($T_{уст.\ ОЗЗ}$) в воздушной электрической сети за рассматриваемый период времени Δt;

$\Sigma T_{сущ.\ перенапр.\ макс.\ доп._{(\Delta t)}}$ – суммарная, максимально допустимая продолжительность перенапряжений в электрической сети за рассматриваемый период времени Δt; (зависит от степени износа линейной изоляции).

$T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ_{(\Delta t)}}$ – продолжительность существования потенциальной опасности ОЗЗ, обусловленное действием напряжения прикосновения ($T_{сущ.\ напр.\ прик.}$), и (или) шагового напряжения ($T_{сущ.\ напр.\ шаг.}$) за рассматриваемый период времени Δt; $\Sigma T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ\ макс.\ доп._{(\Delta t)}}$ – суммарная максимально допустимая продолжительность потенциальной опасности ОЗЗ в воздушной электрической сети за Δt;

$T_{пер.\ раб._{(\Delta t)}}$ – продолжительность перерывов в работе линий электрической сети в результате плановых её выключений ($T_{пер.\ раб..пл.}$) и (или) аварийных выключений ($T_{пер.\ раб.\ ав.}$) за рассматриваемый период времени Δt;

$\Sigma T_{пер.\ раб.\ макс.\ доп_{(\Delta t)}}$ – суммарная, максимально допустимая продолжительность перерыва работы электрической сети за рассматриваемый период времени Δt; (зависит от категории надежности электроснаюбжения);

$T_{устр.\ ОЗЗ_{(\Delta t)}}$ – продолжительность устранения ОЗЗ в сети, включающая этапы поиска ОЗЗ ($T_{поиска\ ОЗЗ}$) и ликвидации ОЗЗ ($T_{ликвид.\ ОЗЗ}$) за рассматриваемый период времени Δt; $\Sigma T_{устр.\ ОЗЗ\ макс.\ доп_{(\Delta t)}}$ – суммарная, максимально допустимая продолжительность работ по устранению ОЗЗ за рассматриваемый период времени Δt; (регламентируется нормативными документами);

Согласно [4], (п.3.2.9) в воздушных электрических сетях 10 кВ, находят свое применение следующие устройства защиты от ОЗЗ: селективная защита, устанавливающая поврежденное направление и действующая на сигнал; селективная защита, устанавливающая поврежденное направление (местоположение), действующая на отключение, для обеспечения требований безопасности; неселективное устройство контроля изоляции, при котором отыскание поврежденного элемента осуществляться специальными устройствами, при этом допускается отыскание поврежденного элемента методом поочередного отключенияприсоединений.

Таким образом, для идентификации ОЗЗ могут быть справедливы следующие равенства:

- при поиске ОЗЗ на воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) 10 кВ, отключеной релейной защитой или персоналом оперативно-выездной бригады:

$$T_{пер.\ раб.} = T_{устран.\ ОЗЗ} \quad (6)$$

- при идентификации ОЗЗ на ВЛЭП 10 кВ посредством современной системы защитной автоматики, выполненной как правило на микропроцессорной базе:

$$T_{развит.\ ОЗЗ} = T_{поиск.\ ОЗЗ} \quad (7)$$

- при поиске ОЗЗ на функционирующей ВЛЭП 10 кВ

$$T_{поискОЗЗ} = T_{сущ.\ перенапр.} = T_{сущ.\ ОЗЗ} \quad (8)$$

Используя рассмотренные выше временные интервалы: $T_{сущ.\ перенапр.}$, $T_{сущ.\ ОЗЗ}$, $T_{пер.\ раб.}$, $T_{устр.\ ОЗЗ}$, можно выразить затраты, связанные с обеспечением

процесса функционирования воздушной электрической сети 10 кВ, применительно к каждому из выше рассмотренных вариантов защиты от ОЗЗ:

$$\sum_{1}^{a} З_{э.\ i\ (\Delta t)} = \sum_{1}^{f} З_{экспл.\ i\ (\Delta t)} + \sum_{1}^{g} З_{инвест.\ i\ (\Delta t)} + \sum_{1}^{h} З_{ущерб\ i\ (\Delta t)} + \ldots \quad (9)$$

$$\ldots + \sum_{1}^{i} З_{компенсац.\ i\ (\Delta t)} + \sum_{1}^{j} З_{проч.\ i\ \Delta t)} + \sum_{1}^{k} З_{упущ.\ выг.\ i\ (\Delta t)},$$

где 1…a (f, g, h, i, j, k) – количество операций, сопровождающиеся затратами соответствующего типа за рассматриваемый период времени Δt;

$ЗЗ_{экспл.i\ (\Delta t)}$ – сумма затрат на эксплуатацию воздушной электрической сети 10 кВ, включая все составляющие эксплуатации (заработная плата персонала, амортизация, налоги, запасные части, топливо, электроэнергия, потери электроэнергии и т.д.) за рассматриваемый период времениΔt;

$ЗЗ_{инвест.i\ (\Delta t)}$ – сумма затрат на инвестирование в воздушную электрическую сеть 10 кВ с изолированнойнейтралью (модернизацию, реконструкцию), включая все составляющие инвестиций за рассматриваемый период времениΔt;

$ЗЗ_{ущерб.i\ (\Delta t)}$ – сумма затрат на покрытие ущерба, возникающего при отказе воздушной электрической сети 10 кВ, включая все составляющие ущерба (ущерб от недоотпуска электроэнергии, ущерб от недополучения оплаты за электроэнергию, ущерб от аварий, прочие виды ущерба) за рассматриваемый период времени;

$ЗЗ_{компенсац.i\ (\Delta t)}$ – сумма компенсационных затрат, возникающих при работе воздушной электрической сети 10 кВ, включая все составляющие компенсаций (компенсации потребителям за перерывы в электроснабжении и некачественную электроэнергию, компенсации за инвалидность и гибель при несчастных случаях, штрафы и другие виды компенсаций) за рассматриваемый период времени[5];

$ЗЗ_{проч.i\ (\Delta t)}$ – сумма прочих затрат, возникающих при работе воздушной линии электрической сети 10 кВ, включая все составляющие прочих издержек (природоохранные проекты, научно-исследовательская работа, представительские расходы и т.д.) за рассматриваемый период времени;

$ЗЗ_{упущ.\ выг.i\ (\Delta t)}$ – сумма затрат, возникающих вследствие упущенной выгоды при работе воздушной электрической сети 10 кВ, включая все составляющие (упущенная выгода от несвоевременного выполнения реконструкции, модернизации и т.д.) за рассматриваемый период времени.

Необходимо отметить, что эксплуатационные затраты по характеру влияния могут быть условно разделены на две основные группы.

Первая группа $ЗЗ_{стимул.}$ – это затраты, стимулирующие к выполнению требований указанных выше обязательных ограничений, к ним относятся следующие виды затрат: $З_{ущерб\ i\ (t1\ldots t2)}$, $З_{компенсаці\ (t1\ldots t2)}$, $З_{упущ.\ выг.i\ (t1\ldots t2)}$, $З_{проч\ i\ (t1\ldots t2)}$, которые могут быть выражены в следующем виде:

$$ЗЗ_{стимул.} = (ЗЗ_{ущерб.i\ (t1\ldots t2)} + ЗЗ_{компенсац.i\ (t1\ldots t2)} + ЗЗ_{уп.\ выг.i\ (t1\ldots t2)} + \ldots$$
$$\ldots + ЗЗ_{проч.\ i\ (t1\ldots t2)}) = f(\Sigma(T_{пер.\ раб.пл.i} + {}_{впер.\ раб.\ ав.i})) = f(\Sigma T_{пер.\ раб.\ факт.}), \quad (10)$$

где $ЗЗ_{стимул.} = f(\Sigma T_{пер\ раб.\ факт.})$ – стимулирующие эксплуатационные затраты;

$\Sigma T_{пер.\ раб.\ факт} = \Sigma(T_{пер.\ раб.\ пл.i} + T_{впер.\ раб.\ ав.i})$ – фактическое время перерывов в электроснабжении.

Аналогичным образом получается зависимость:

$$ЗЗ_{стимул.} = f(\Sigma T_{сущ.перенапр.}) \text{ и } ЗЗ_{стимул.} = f(\Sigma T_{устран.\ ОЗЗ}) \quad (11)$$

Каждый вид эксплуатационных затратданной группы можно по отдельности выразить в виде зависимости от: $\Sigma T_{сущ.\ перенапр.\ факт.}$, $\Sigma T_{сущ.\ опасн.\ ОЗЗ\ факт.}$, $\Sigma T_{пер.\ раб.\ факт.}$,$\Sigma T_{устр.\ ОЗЗ\ факт.}$, с уменьшением которых, затраты$ЗЗ_{ущерб\ i\ (\Delta t)}$, $ЗЗ_{комп\ i\ (\Delta t)}$, $ЗЗ_{уп.\ выг.i\ (\Delta t)}$, $ЗЗ_{проч.\ i\ (\Delta t)}$, а следователно и их сумма $ЗЗ_{стимул.}$ будут сокращаться.

Вторая группа $\Sigma З_{обесп.}$– это затраты, обеспечивающие выполнение отмеченных выше обязательных ограничений, они вкючают в себя следующие виды затрат: $\Sigma З_{экспл.\ i\ (\Delta t)}$, $\Sigma З_{инвест.\ i\ (\Delta t)}$.

Их зависимость от $\Sigma Т_{пер.\ раб.\ факт.}$ является обратной, т.к. при сокращении $\Sigma Т_{пер.\ раб.\ факт.}$обеспечивающие затраты$\Sigma З_{обесп.}$будут увеличиваться.

На рисунке 1 приведены графические зависимости стимулирующих и обеспечивающих затрат от продолжительных событий характеризующих возникновение, существование, отыскание и устранение ОЗЗ. Для упрощения вомприятия данные зависиморсти имеют линейный характер, хотя как показали результаты проведенных исследований, зависимости $\Sigma З_{стимул.}= f(\Sigma Т_{пер.раб.факт.})$, $\Sigma З_{обесп.}= f(\Sigma Т_{пер.раб.факт.})$ являются нелинейными.

На графике цветом выделено три характерных области: красная I, зеленая II и желтая III. Сравнивая характер распределения эксплуатационных затрат, можно утверждать, что оптимальной технико-экономический эффект можно быть гарантирован только в зеленой области II, для которой характерно оптимальное время существования всех возможных событий, связанных с ОЗЗ в электрической сети.

В частности, рассматривая зависимость $\Sigma З_э = f(\Sigma Т_{пер.\ раб.\ факт.})$, видно что фактически допустимое время перерывов в электрической сети 10 кВ может быть больше ($\Sigma Т_{пер.\ раб.\ доп.\ норм.1}$) или меньше ($\Sigma Т_{пер.\ раб.\ доп.\ норм.2}$) оптимального времени ($\Sigma Т_{пер.\ раб.опт.}$) при заданной сумме затрат $З_э$. Для областей I и III требуется корректировка одной из составляющих $З_э(\Sigma З_{стимул.}= f(\Sigma Т_{пер.раб.факт.})$ или $\Sigma И_{обесп.}= f(\Sigma Т_{пер.раб.факт.})$), заключающаяся в увеличении выплат, в связи с превышением времени перерывов в электроснабжении, или в снижении уровня обеспечивающих затрат, путем уменьшения эксплуатационных затрат, в результате внедрения новых технологий и оборудования.

Область II характеризуется минимальным временем перерывов в работе электрической сети при котором достигается оптимальное соотношение обеспечивающих и стимулирующих затрат, поэтому корректировка зависимостей не потребуется.

Результаты приведенного анализа справедливы и для других зависимостей, представленных на рисунке 1.

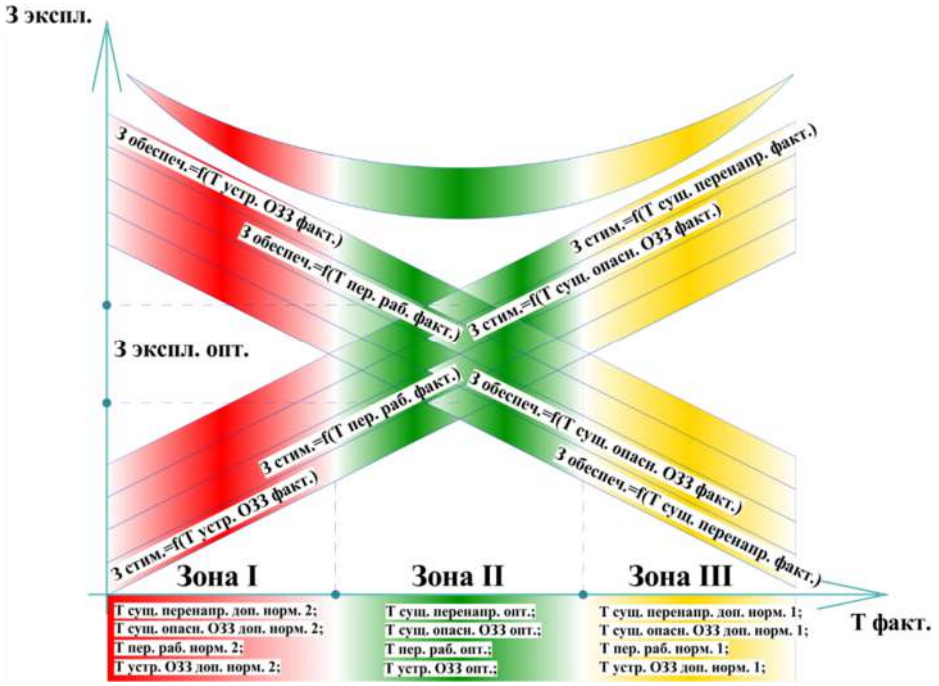


Рисунок 1 – Зависимости эксплуатационных затрат (З экспл.) от фактической продолжительности (Т факт) событий, связанных с ОЗЗ в воздушных электрических сетях 10 кВ с изолированной нейтралью

Из вышеизложенного следует, что проблемы низкой эффективности функционирования воздушных электрических электрических сетей 10 кВ, обусловленны неприемлемым временем существования, отыскания и устранения ОЗЗ. Данное обстоятельство в первую очередь связано с отсутствием сбалансированности между стимулирующими и обеспечивающими эксплуатационными затратами.

На сегодняшний день разработанная методика успешно апробирована при подготовке магистерской НИРС на тему «Совершенствование способа дистанционного мониторинга ВЛ-10 кВ, посредством беспилотного летательного аппарата». Данное направление является актуальным для ПАО «Россети», на сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются на воздушных линиях электропередачи среднего класса напряжения 10 кВ. В частности, их используют при проведении оптического и телевизорного мониторинга, позволяющего выявить и предотвратить аварийные повреждения, такие как развитие дефекта изолятора и (или) его пробой, а также недопустимое зарастание трассы древесно-кустарниковой растительностью и др. Разработанная методика расчета, в рамках НИРС позволила установить оптимальный уровень инвестиций в программу внедрения БПЛА в электросетевом комплексе 10 кВ, позволяющую оптимизировать временные интервалы, касающиеся ОЗЗ в пределах их допустимых значений.

В заключении стоит отметить, что учитывая тот факт, что в ПАО «Россети», в рамках крупномасштабной программы «Цифровая трансформация» активно проводятся коренные структурные изменения, а также пересматриваются подходы к хозяйственной деятельности и к логике технологических и корпоративных процессов управления компанией, в том числе и на основе проведения бизнес-аналитики с использованием больших данных (Big Data). Разработанная методика может заинтересовать специалистов компании, занимающихся вопросами стратегического бизнес-планирования, направленного, в частности, и, на повышение эффективности функционирования проектируемых, эксплуатируемых и реконструирукемых воздушных электрических сетей 10 кВ с изолированной нейтралью.

Список источников

1. Хорольский, В.Я. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей. / В.Я. Хорольский М.А. Таранов, Д.В. Петров// Ростов-на-Дону, изд. «Терра Принт» 2009. - 132 с.

1. Качанов, А.Н. Оценка эффективности работы ЛЭП 6-10 кВ с учетом времени существования, отыскания и устранения однофазных замыканий на землю/ А.Н. Качанов, В.А. Чернышов // Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты» матер. конф. (Казань 22 апреля 2022 г.). – Казань: Казан гос. энерг. ун-т, 2022. – С. 142-146

3. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. - Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2010. - 464 с.

4. Официальный сайт ПАО «Россети» [Электронный ресурс]. https://rosseti.ru (дата обращения: 31.10.2022).

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 228л, тел. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Гребенников Андрей Александрович, магистрант 2 курса, направление подготовки 13.04.02 "электроэнергетика и электротехника" ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89534138034, E-mail: Andreyka.grebennikov.2000@mail.ru.

UDC: 621.313

CIRCUIT IMPLEMENTATION OF STANDARD LIGHTING AND TECHNOLOGICAL AUDIO AND STROBOSCOPIC ALARM IN POTENTIALLY DANGEROUS SECTIONS OF 10 kV OVERHEAD ELECTRIC NETWORK

Grebennikov A.A., Chernyshov V.A.,

Rossiya, g. Orol, FGBOU VO "OGU im. I.S. Turgeneva"

Summary. A new method for determining the optimal amount of operating costs invested in operated, designed and modernized 10 kV overhead electrical networks with isolated neutral is considered. The technique allows you to effectively balance the components of material, labor and financial resources necessary to ensure the optimal duration of temporary events, such as the development, existence, search and elimination of single-phase earth faults. Given that these events largely determine the level of safety, reliability and environmental friendliness of the power grid infrastructure, the methodology is focused on improving the efficiency of its operation. It is expected that the developed new methodological approach will be of interest to specialists of Rossseti PJSC involved in technical and economic planning in the design, reconstruction and modernization of overhead electrical networks of this voltage class.

Keywords: overhead electrical networks 10 kV with isolated neutral, efficiency of operation, operating costs, development, existence, search and elimination of single-phase earth faults.

References

1. Khorolsky, V.Ya. Technical and economic calculations of distribution electrical networks. / V.Ya. Khorolsky M.A. Taranov, D.V. Petrov // Rostov-on-Don, ed. "Terra Print" 2009. - 132 p.
2. Kachanov, A.N. Evaluation of the efficiency of 6-10 kV power transmission lines, taking into account the lifetime, search and elimination of single-phase ground faults / A.N. Kachanov, V.A. Chernyshov // International Scientific and Practical Conference "Electric Networks: Reliability, Security, Energy Saving and Economic Aspects" mater. conf. (Kazan April 22, 2022). - Kazan: Kazan state. energy un-t, 2022. - S. 142-146
3. Rules for the installation of electrical installations: all current sections of PUE-6 and PUE-7. - Novosibirsk: Sib. univ. publishing house, 2010. - 464 p.
4. Official website of PJSC Rosseti [Electronic resource]. https://rosseti.ru (date of access: 31.10.2022).

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.
Grebennikov Andrey Aleksandrovich, 2nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89534138034, E-mail: Andreyka.grebennikov.2000@mail.ru.

УДК: 621.316.9

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕЖУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ И СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКАХ ВОЗДУШНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10 кВ

Чернышов В.А., Коренков Д.А., Чернышова Л.А.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева"

Аннотация. Обоснована необходимость использования дежурного освещения и технологической звуковой и стробоскопической сигнализации на потенциально опасных участках воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) напряжением 10 кВ в сетях с изолированной нейтралью. Рассматриваются три эффективных схемотехнических решения, не требующие существенных затрат при практической реализации и вместе с тем, позволяющих в значительной степени повысить электробезопасность ВЛЭП 10 кВ. Первое из них позволяет осуществлять отбор мощности от провода ВЛЭП 10 кВ для питания светодиодного прожектора, звуковой сирены и устройства управляющего ими. Второе базируется на использовании микропроцессорной системы управления, позволяющей изменять яркость, частоту пульсаций светового потока и интенсивность звуковых колебаний посредством широтно-импульсной модуляции питающего напряжения, при этом она также позволяет произвести выбор необходимых режимов работы как дистанционно, так и по месту. Третье заключается в возможности осуществления диспетчеризации световых и звуковых режимов работы, обеспечивающей удаленный и локальный доступ к интерфейсу.

© Чернышов В.А., Коренков Д.А., Чернышова Л.А., 2022

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, однофазное замыкание на землю, шаговое напряжение, напряжение прикосновения, потенциально опасный участок, устройство отбора мощности, дежурное освещение, звуковая сигнализация, стробоскопическая сигнализация, диспетчеризация, электробезопасность.

При возникновении обрывов проводов и пробоев изоляторов в воздушных электрических сетях напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью, вероятность возникновения бытового и производственного электротравматизма, вследствие воздействия шагового напряжения и напряжения прикосновения, весьма высока.

Наибольшую опасность для гражданских лиц и работников ОВБ представляют воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) 10 кВ с однофазными замыкания на землю в темное время суток или в сложных погодно-климатических условиях. В этой связи, разработка и внедрение эффективных инженерно-технических мероприятий, обеспечивающих повышение электробезопасности данных электрических сетей, является крайне важной задачей, особенно если их трассы проходят по агропромышленным районам с высокой плотностью населения [1].

Авторы данной публикации полагают, что обеспечение дежурного освещения и технологической звуковой и стробоскопической сигнализации на потенциально опасных участках электрической сети может являться рациональным решением существующей, проблемной ситуации [2]. Для практической реализации данного мероприятия, требуется решение целого ряда сложных организационно-технических задач, наиболее трудными из которых является разработка системы электропитания для светотехнических и звуковых устройств, а также разработка системы управления режимами их работы.

Работая над решением указанных задач, в настоящее время у авторов публикации уже имеются конкретные схемотехнические решения, которые будут рассмотрены далее.

Для электропитания устройств обеспечивающих дежурное освещение на потенциально-опасных участках ВЛЭП напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью, а также формирующих звуковое и стробоскопическое сигнализирование, в случае возникновении на них потенциальной опасности поражения электрическим током, предполагается использовать устройство отбора мощности. Схема его подключения к одному из проводов ВЛЭП 10 кВ изображена на рисунке 1.

Устройство отбора мощности содержит первичный преобразователь 2, образованный замкнутым магнитопроводом 3 с размещенным на нем вторичной обмоткой 4. В центральное отверстие замкнутого магнитопровода 3 пропущен фазный провод 1 ВЛЭП, при этом выводы обмотки 4 образуют выходные зажимы первичного преобразователя 5 и 6. Выходные зажимы вторичной обмотки первичного преобразователя подключены к входным зажимам преобразователя-регулятора напряжения 7 через последовательно включенный неполярный конденсатор 8. К выходным зажимам 9 и 10 преобразователя-регулятора подключается компактный светодиодный прожектор 11, оснащенный индивидуальной системой управления. При протекании электрического тока в проводе ВЛЭП 10 кВ, в сердечнике магнитопровода возбуждается электромагнитное поле, напряженность которого определяется соотношением:

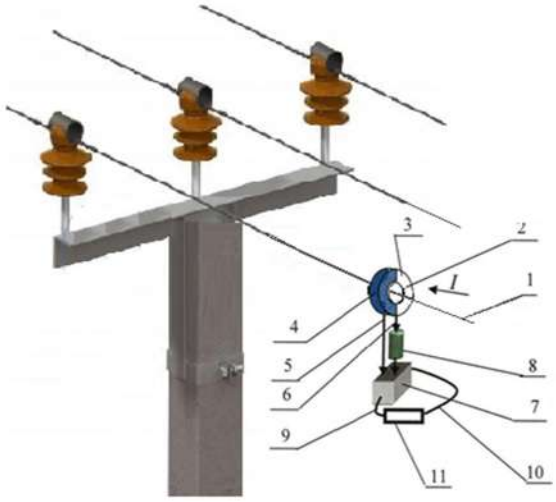


Рисунок 1 - Схема подключения устройства отбора мощности к одному из проводов ВЛЭП 10 кВ

$$H \approx I / l_{cp}, \qquad (1)$$

где I - значение силы тока в фазном проводе; l_{cp} - средняя линия замкнутого магнитопровода.

Напряженность магнитного поля наводит на зажимах вторичной обмотки напряжение, пропорциональное числу витков:

$$W = \frac{U \cdot l_{cp}}{222S \cdot k \cdot I_{\min}}, \qquad (2)$$

где U - действующее значение выходного напряжения первичного преобразователя в режиме холостого хода;

S - поперечное сечение магнитопровода;

k - производная линейного участка основной кривой намагничивания материала магнитопровода;

$I_{\min}$ - минимальное значение силы тока в фазном проводе.

Рассмотренный источник питания позволяет отбирать мощность от фазного провода ВЛЭП 10 кВ, достаточную для функционирования дежурного освещения и работы звуковой и стробоскопической сигнализации, при этом он имеет небольшие массогабаритные размеры, что позволяет подвешивать его на проводах ВЛЭП 10 кВ.

Светодиодный прожектор, звуковая сирена, а также устройство управления ими, размещаются в компактном, герметичном корпусе, образующий моноблок.

Принципиальная электрическая схема устройства управления изображенная на рисунке 2. Она может функционировать как в ручном, так и в автоматическом режиме, с использованием различных датчиков, позволяющих активизировать предварительно заданные световые и звуковые сценарии работы, поступающие как централизованно (от

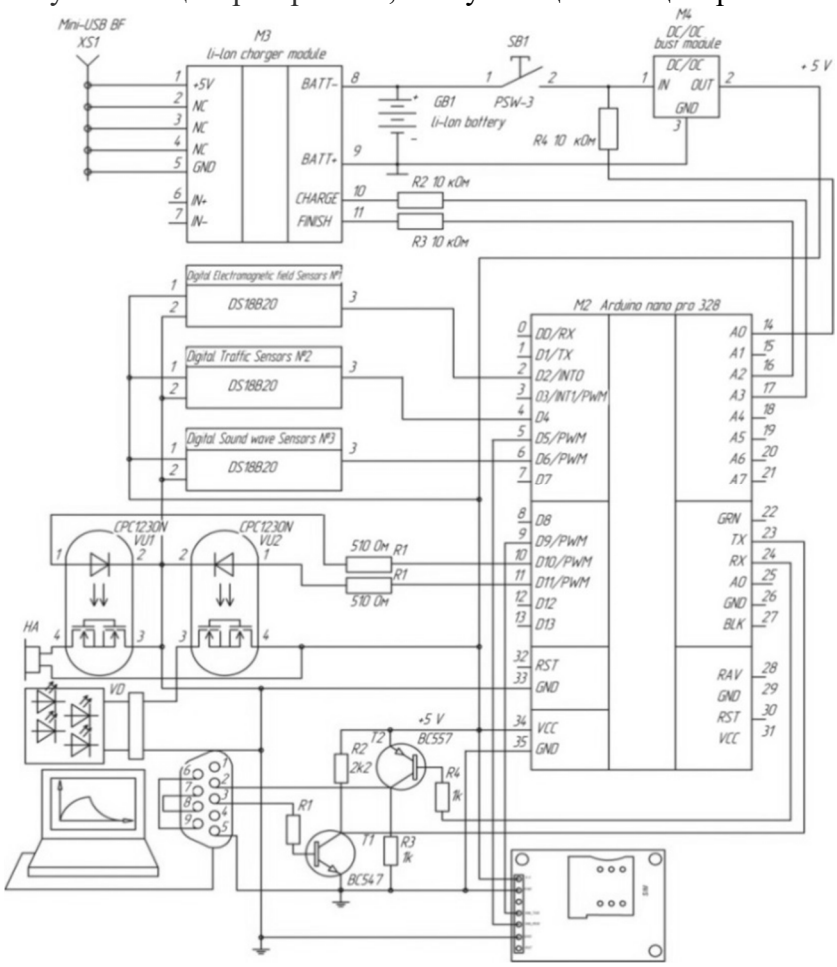


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема управления дежурным освещением и технологической звуковой и стробоскопической сигнализацией

диспетчера), так и по месту (от персонала ОВБ). Изменение яркости и частоты пульсаций светового потока и интенсивности звуковых колебаний, осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции питающего их напряжения.

На принципиальной электрической схеме (см. рисунок 3), в верхней ее части изображен блок питания, далее слева изображена плата микроконтроллера с подключенными к ней следующими элементами:

- тремя микросхемными датчиками, являющимися стабилитронами с малым дифференциальным сопротивлением (менее 1 Ом) и напряжением стабилизации, пропорциональным абсолютной температуре;
- двумя мощными фототранзисторами, управляемых посредством гальванической развязки, один из которых управляет режимами работы светодиодного прожектора (включено/выключено, дежурное освещение/стробоскопическое сигнализирование), а другой управляет работой звуковой сиреной (включено/выключено, низкая интенсивность/высокая интенсивность).

Разработанная функциональная схема диспетчеризации режимов работы дежурного освещения и технологической звуковой и стробоскопической сигнализации изображена на рисунке 3.

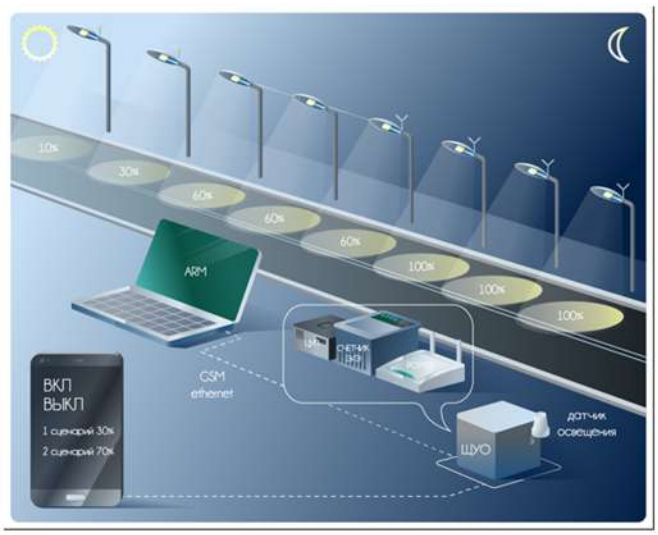


Рисунок 3 – Функциональная схема диспетчеризации режимов работы дежурного освещения и технологической звуковой и стробоскопической сигнализации

Все моноблоки объединяются в единую сеть и передают и принимают радиосигналы (на частоте 2,4 Гц) на сервер обработки данных, который имеет соответствующий интефейс для индивидуального управления режимами работы каждого из моноблоков. Доступ к интерфейсу может быть как локальный, так и удаленный по сети wifi, Internet в т.ч. и посредством использования GSM модема.

Диспетчеризация режимов работы позволяет реализовать следующие варианты управления моноблоками: управление отдельным моноблоком; объединение моноблоков в любую логическую группу (1 через 1, первые 3, первый и последний и т.д.); объединение групп в зоны. Для удобства управления дежурным освещением и технологической сигнализацией может быть задействована мнемосхема трассы ВЛЭП 10 кВ, с указанием мест дислокации светотехнических и сигнализирующих устройств.

Список источников

1. Чернышов, В.А. Обоснование целесообразности сигнализирования однофазных замыканий на землю на опорах ВЛ 6-10 кВ / В.А. Чернышов, Д.А. Коренков, Л.А. Чернышова // Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты» матер. конф. (Казань 22 апреля 2022 г.). – Казань: Казан гос. энерг. ун-т, 2022. – С. 308-314

2. Пат. 2320062 Российской Федерации, МПК H02J13/00,G01R 31/08. Способ повышения безопасности при возникновении замыканий на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью / Гавриченко А.И., Чернышов В.А., Чернышова Л.А., Чернышов А.А.; патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. № 2006138514/09; заявл. 31.10.2006; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8. 5 с.

3. Чернышов В.А. Повышение электробезопасности и эффективности функционирования воздушных электрических сетей 6-10 кВ в густонаселенных сельскохозяйственных районах / В.А.

Чернышов, Л.А. Чернышова // Охрана труда и техника безопасности в сельском хозяйстве. 2011. №3. С. 37-39.

4. Чернышов В.А. Обоснование комплексной целесообразности применения дежурного освещения и световой стробоскопической сигнализации на потенциально опасных участках ЛЭП 10 кВ/ В.А. Чернышов // Вестник аграрной науки. – 2018. - №2(71). – С.65-73.

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 228л, тел. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Коренков Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 228л, тел. E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.

Чернышова Людмила Александровна, магистрант 2-го курса, направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО "ОГУ имени И.С. Тургенева", г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89536131155, E-mail: lyudmilamyskina@mail.ru.

UDC: 621.316.9

CIRCUIT IMPLEMENTATION OF STANDARD LIGHTING AND TECHNOLOGICAL AUDIO AND STROBOSCOPIC ALARM IN POTENTIALLY DANGEROUS SECTIONS OF 10 kV OVERHEAD ELECTRIC NETWORK

Chernyshov V.A., Korenkov D.A., Chernyshova L.A.
Rossiya, g. Orol, FGBOU VO "OGU im. I.S. Turgeneva"

Summary. The necessity of using emergency lighting and technological sound and stroboscopic signaling on potentially dangerous sections of an overhead power transmission line (OHTL) with a voltage of 10 kV in networks with an isolated neutral is substantiated. Three effective circuit solutions are considered that do not require significant costs in practical implementation and, at the same time, allow to significantly increase the electrical safety of 10 kV overhead power lines. The first of them allows you to take power from the wire of the 10 kV overhead power line to power the LED spotlight, the sound siren and the device that controls them. The second is based on the use of a microprocessor control system that allows you to change the brightness, pulsation frequency of the light flux and the intensity of sound vibrations by means of pulse-width modulation of the supply voltage, while it also allows you to select the necessary operating modes both remotely and locally. The third is the possibility of scheduling light and sound modes of operation, providing remote and local access to the interface.

Keywords: overhead power line, single-phase ground fault, step voltage, touch voltage, potentially dangerous area, power take-off device, emergency lighting, sound alarm, stroboscopic alarm, dispatching, electrical safety.

References

1. Chernyshov, V.A. Justification of the expediency of signaling single-phase earth faults on supports of 6-10 kV overhead lines / V.A. Chernyshov, D.A. Korenkov, L.A. Chernyshova // International Scientific and Practical Conference "Electric Networks: Reliability, Security, Energy Saving and Economic Aspects" mater. conf. (Kazan April 22, 2022). - Kazan: Kazan state. energy un-t, 2022. - 308 p.

2. Pat. 2320062 RF, IPC H02J13/00, G01R 31/08. A method for improving safety in the event of ground faults in electrical networks with isolated neutral / Gavrichenko A.I., Chernyshov V.A., Chernyshova L.A., Chernyshov A.A.; Patent holder Oryol State Agrarian University. No. 2006138514/09; dec. October 31, 2006; publ. 03/20/2008, Bull. No. 8. 5 p.

3. Chernyshov V.A. Improving the electrical safety and efficiency of the operation of 6-10 kV air power networks in densely populated agricultural areas / V.A. Chernyshov, L.A. Chernyshova // Occupational health and safety in agriculture. 2011. №3. pp. 37-39.

4. Chernyshov V.A. Substantiation of the complex expediency of using emergency lighting and light stroboscopic signaling on potentially dangerous sections of 10 kV power lines / V.A. Chernyshov // Bulletin of agrarian science. - 2018. - No. 2 (71). - P.65-73.

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru

Korenkov Dmitry Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru
Chernyshova Lyudmila Alexandrovna, 2nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89536131155, E-mail: lyudmilamyskina@mail.ru

УДК 62-52

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АИИСКУЭ КАК ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Юрьев Ю.Н., Павлов Ю.В., Миронов Е.А.
Россия, г. Орёл, ООО «Орловский энергосбыт»

Аннотация. Произведен ретроспективный анализ применения и опыта использования систем АИИСКУЭ в отечественной и зарубежной практике. Рассмотрены современные принципы построения АИИСКУЭ, обоснована целесообразность установки таких систем с точки зрения экономической эффективности, технологической надежности и функциональности.

Ключевые слова: АИИСКУЭ, RS-485, PLC+RF, ZigBee, прибор учета электроэнергии, беспроводная передача информации, ООО «Орловский энергосбыт»

В течение XIX века были сделаны открытия, составляющие основу современной электротехники. Эти открытия явились теми самыми обстоятельствами, предопределившими развитие и внедрение электричества во все сферы жизни человечества. Первой областью, где электричество нашло массовое применение, стало освещение улиц, а затем и жилых домов, которое, однако, могли себе позволить только зажиточные люди.

Тем не менее, научно-технический прогресс не стоял на месте. Появление новых принципов и технологий построения электротехнического оборудования позволило сделать электричество более доступным для использования в широких слоях населения. С тех пор как появился новый вид продукт, подлежащий продаже – электроэнергия – возникла необходимость вести её учёт и определить цену. Однако возникла проблема с выбором единых принципов измерения и системы единиц, в которых следует вести учет электроэнергии.

Первые счётчики электроэнергии, работающие на переменном токе, были разработаны в конце XIX века и являлись электромеханическими, которые строились на индукционном принципе. Такие счетчики имели неоспоримые достоинства: надёжность и малую себестоимость, вследствие чего получили широкое распространение и до сих пор с их помощью производят большую часть измерений электроэнергии. С момента появления первого счетчика электроэнергии, её учет осуществлялся путем записи показаний счетного механизма и занесения их в соответствующий документ. Однако многолетняя практика применения такой системы организации учета электроэнергии выявила существенные недостатки, заключающиеся в зависимости от внешних обстоятельств и человеческого фактора.

Идея применения технических средств для автоматизированного дистанционного снятия показаний счетчиков не нова. Теоретическое обоснование таких систем автоматизации учета появилось практически одновременно с появлением счетчиков электроэнергии, но предлагаемые технические варианты воплощения были слишком сложны и дороги для широкого использования. Появление полупроводниковых устройств и развитие электроники во второй четверти XX века привело к появлению принципиально новых

© Юрьев Ю.Н., Павлов Ю.В., Миронов Е.А., 2022

систем, основанных на совершенно иных способах управления.

Практическая реализация этих систем началась в промышленно развитых странах в 70–80-е годы XX века вместе с появлением интегральных технологий, устройств сбора данных, электронных счетчиков импульсов. Это позволило сделать технические решения экономически приемлемыми для массового применения. Так появилось первое поколение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Волна компьютеризации привела к появлению и быстрой смене новых поколений АСКУЭ. В таблице 1 приведены этапы развития систем АСКУЭ [1].

Таблица 1 – Этапы развития систем АСКУЭ

Год появления на рынке	Основные особенности	Тип архитектуры, протоколы	Примеры реализации
Первое поколение АСКУЭ, 1980	Электроиндукционные счетчики классов точности 2.0 и 1.0, устройства формирования импульсов, счетчики импульсов	Два уровня, ПЭВМ отсутствует	ИИСЭ 1-48 (завод ВЗЭТ)
Второе поколение АСКУЭ, 1990	Электроиндукционные счетчики классов точности 2.0 и 1.0, электронные счетчики I поколения, устройства сбора данных, контроллеры, ПЭВМ, кабельные и телефонные линии связи. Применяются ОС MS-DOS, Windows, QNX, OS-9 и др.	Два и три уровня, ПЭВМ, архивы данных ведутся в ПЭВМ	ИИСЭ-3 4 ЦТ-5000 (завод Точмаш), КТС «Энергия», ИВК «Метроника», КТС «Телескоп»
Третье поколение АСКУЭ, 1995	Электронные счетчики II поколения, контроль количества и качества электроэнергии, устройства сбора данных с архивами данных, контроллеры, ПЭВМ, кабельные, телефонные и оптоволоконные линии связи, развитые системы протоколов открытых систем – OPC client/server, DDE client/server.	Два и три уровня, на верхнем уровне ПЭВМ, две сети – две ОС	АСКУЭ «Омь», АСКУЭ «Альфа СМАРТ», АСКУЭ КТС «Энергия», КТС «Сименс» «Лэндис и Гир» АСКУЭ «Сикон», КТС «Ток-3» КТС «Ток-С»
Четвертое поколение АСКУЭ, 2000	Электронные счетчики III поколения, контроль количества и качества электроэнергии, цифровые технологии, кабельные, телефонные, электрические, оптоволоконные и сотовые линии связи, развитые системы протоколов открытых систем для корпоративных СУ SQL/ODBC, Интернет/интранет. Поддержка астрономического времени, ФОРЭМ	Три и более уровней, на верхнем уровне ПЭВМ, корпоративная сеть, дублированные каналы связи	АСКУЭ КТС «Энергия» Плюс, ПО в. 6.0 АСКУЭ «Альфа Центр» АСКУЭПР Москва, КТС «Ток-С»

В 1970-е годы в СССР, как и за рубежом, происходило развитие автоматизации учета электроэнергии, однако оно происходило в иных условиях и под влиянием других движущих сил. В условиях единого народного хозяйства с дешевой энергией, рабочей силой и перекрестным субсидированием различных отраслей экономики автоматизации учета электроэнергии имела слабые экономические стимулы. Главным стимулом являлось наличие Единой энергетической системы (ЕЭС СССР) и необходимость снижения ее пиковых

мощностей за счет регулирования нагрузки потребителей в часы максимума нагрузки энергосистемы. Поэтому создание АСКУЭ началось в те годы с крупных промышленных предприятий – основных потребителей электроэнергии и потенциальных регуляторов нагрузки энергосистемы. Работы по созданию и внедрению АСКУЭ в энергосистемах на регулярной основе были закреплены в 1986 г. приказом Минэнерго СССР № 180, которым определялись основные направления и планы выполнения работ. Совместно с различными научными организациями, был разработан и выпущен целый ряд основополагающих нормативно-методических документов по АСКУЭ. В 1987-1991 г. были приняты в эксплуатацию первые очереди АСКУЭ более чем в 20 энергосистемах.

В 1991 г., вместе с распадом СССР и плановой экономики, закончилась эпоха дешевых и практически неограниченных энергоресурсов, когда их доля в себестоимости продукции составляла всего лишь несколько процентов. С тех пор произошло несколько волн удорожания энергоресурсов и на сегодняшний день их доля в себестоимости продукции для многих промышленных предприятий может составлять 20–30 %, а для наиболее энергоемких производств – 40 % и более. Находящиеся под давлением рынка потребители приходят к пониманию, что первым шагом в энергоэффективности, экономии энергоресурсов и снижении финансовых потерь является точный учет, который невозможен без применения АСКУЭ. С начала развития оптового рынка в России для систем учета закрепилось наименование АИИСКУЭ (автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии) взамен устаревшего, широко употреблявшегося наименования АСКУЭ. Изменение терминологии произошло ввиду наличия наработанной метрологической базы для информационно-измерительных систем.

Развитие электронной промышленности, микропроцессорных систем и цифровых технологий привело к появлению электронных счетчиков с цифровыми интефейсами, за чем последовали качественные изменения: измерительная информация стала неопределенно долго храниться в точке учета - в энергонезависимой памяти самого счетчика, причем в цифровом формате с фиксированной точностью. Благодаря цифровому интерфейсу стал возможен неограниченный доступ к этой информации, с учетом высоких требований точности и достоверности при её передаче. Система АИИСКУЭ претерпела эволюционные изменения. Современная концепция коммерческого учета электроэнергии основывается на принципе построения систем энергоучета, которые сводят к минимуму участие человека на этапе измерения, сбора и обработки данных и обеспечивают оперативный, достоверный, точный и гибкий, способный адаптироваться к различным тарифным системам учет как со стороны поставщика, так и со стороны потребителя.

Применение современных АИИСКУЭ позволяет:

1. На предприятиях-потребителях:

– отказаться от необходимости ручного снятия показаний счётчиков электроэнергии;

– облегчить ведение многотарифного учёта электроэнергии;

– облегчить прогнозирование затрат на электроэнергию;

– обеспечить контроль качества электроэнергии;

– обеспечить возможность автоматической передачи данных о потреблённой электроэнергии в энергосбытовую организацию.

2. В генерирующих организациях:

– поддерживать оптимальные режимы работы оборудования и не допускать перерасхода энергоносителей за счет повышенной частоты снятия показаний со счётчиков электроэнергии.

3. В сетевых организациях:

– повысить достоверность учета потерь электроэнергии в трансформаторах и линиях электропередачи;

– повысить оперативность получения данных, используемых для коммерческих расчетов на оптовом рынке электроэнергии Российской Федерации;

– обеспечить информацией об объемах поступившей и отпущенной электроэнергии в технологическом процессе функционирования единой национальной электрической сети (ЕНЭС).

4. В энергосбытовых организациях:

– обеспечить достоверность получаемой информации о потреблении электроэнергии для расчетов с потребителями;

– предотвратить и устранить разногласия с потребителями;

– автоматизировать выставление потребителям счетов за электроэнергию;

В мировом масштабе наибольшее количество систем АИИСКУЭ было внедрено в США, где фактическая доля их реализации составляет более 50% от всех видов счетчиков. Потребители в США имеют возможность сравнить работу различных коммунальных предприятий, обслуживающих одни и те же дома. Ускорение темпов внедрения систем стало наблюдаться в Европе в последние годы. За рубежом точный аналог, который бы в полной мере передавал смысл общего термина, как «АИИСКУЭ», отсутствует. В конкретных областях применяются различные фирменные обозначения типа, например STOM (Serial Transmition of Original Meter Values – последовательная передача оригинальных показаний счетчиков) фирмы «Landis&Gir». Наиболее близкой к термину «АИИСКУЭ» является широко используемая аббревиатура AMR – Automatic Meter Reading (автоматическое считывание счетчиков), а к термину «автоматизация энергоучета» – automation of powermetering (of energymetering) или automation of metering of electric power and energy (автоматизация измерения электрической мощности и энергии), или automation of metering of energy carrier (автоматизация измерения энергоносителей). Двунаправленная связь, используемая в качестве основы «умных сетей электроснабжения» SG (англ. Smart Grid), осуществляется на основе инфраструктуры интеллектуальных счётчиков AMI (англ. Advanced Metering Infrastructure). В отличие от AMR она включает в себя несколько усовершенствованные технологии, такие как интеллектуальные счётчики SM (англ. Smart Meter), домашние сети HAN (англ. Home Area Network), региональные сети WAN (англ. Wide Area Network) и районные сети NAN (англ. Neighborhood Area Network), промышленные сети IAN (англ. Industrial Area Network) и сети зданий BAN (англ. Building Area Network) [2, 3]. Структура сети связи AMI в электроэнергетической системе представлена на рисунке 1, она состоит из 6 уровней:

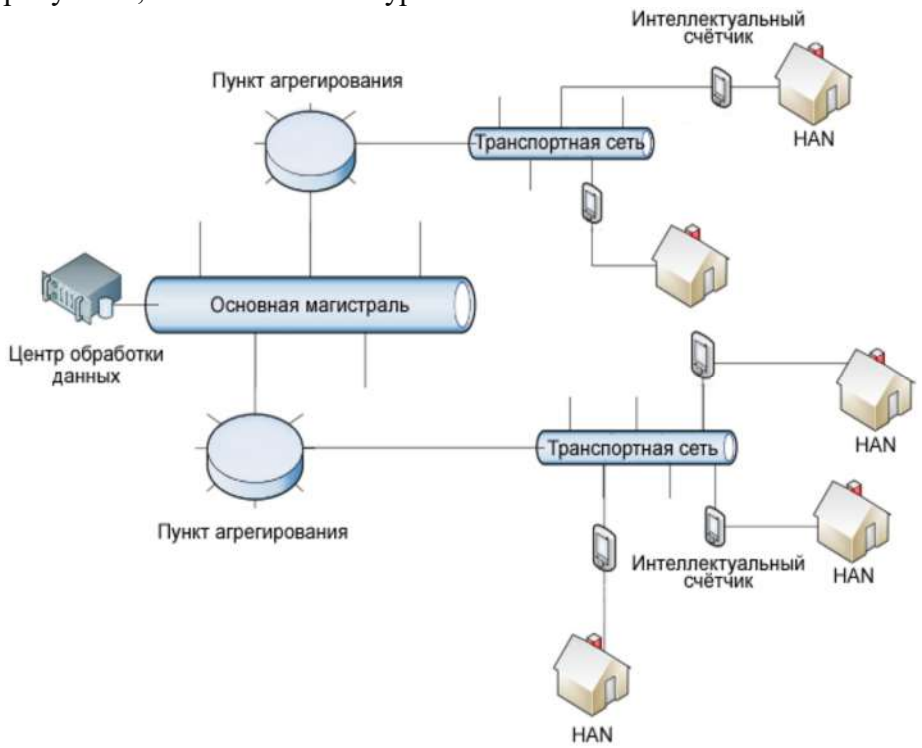


Рисунок 1 – Структура сети AMI в электроэнергетической системе

1) центр обработки данных;
2) основная магистраль;
3) пункты агрегирования;
4) транспортные сети связи;
5) точки доступа – интеллектуальные счётчики;
6) внутренние сети – HAN.

В качестве точек доступа для внутренних сетей, как правило, выступают интеллектуальные счётчики, информация от которых передается через транспортные сети связи в пункты агрегирования, размещающиеся на трансформаторных подстанциях. Затем, через основную магистраль информация поступает в центральное управление сетью для дальнейшей обработки. Внутренняя сеть, расположенная внутри помещений потребителя, представляет собой интеллектуальные устройства, которые обмениваются информацией как между собой, так и с сетью поставщика коммунальных услуг через интеллектуальные счётчики. Так как обычно конечными точками AMI являются интеллектуальные счётчики, то внутренние сети в инфраструктуре интеллектуальных счётчиков не обязательны. В AMI могут задействоваться электрические, водяные и другие сети. Все данные от интеллектуальных устройств во внутренней сети сводятся в центральный информационный дисплей IHD (англ. In-home Display) [4], что упрощает потребителю получение информации. Исследования подтверждают, что применение IHD позволяет добиться снижение потребления: при обычных планах составляет 7 %, а при планах по предоплате – 14 % [5]. Информация о стоимости услуг, предоставляемая поставщиком энергоносителя, может быть использована устройствами управления нагрузкой для регулировки и оптимизации потребления на основе предварительно заданных параметров и критериев. Обнаружение пожара и мониторинг с помощью мобильных приложений, еще больше повышает ценность сетей SG и AMI. Наиболее популярными для внутренних сетей являются технологии связи WiFi, Bluetooth, ZigBee и HomePlug.

На сегодняшний день инфраструктура интеллектуальных счётчиков является наиболее перспективным научным направлением и упоминается во многих научных работах за рубежом. Следует признать, что российская наука отстает в этом направлении от стран Западной Европы и Северной Америки, которые достигли наибольшего прогресса, как в самих научных исследованиях, так и в реализации AMI на реальных объектах.

В России систему АИИСКУЭ, являющуюся довольно дорогостоящей и сложной, обязаны иметь те, кто покупает и продаёт электроэнергию на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ), который начал свое функционирование с 2005 года – момента начала реформы электроэнергетики. Кроме того, крупные потребители на розничном рынке электроэнергии, которые имеют максимальную мощность свыше 670 кВт, обязаны обеспечить почасовой учёт (то есть в том или ином виде АИИСКУЭ) по контуру своего потребления.

С 1 июля 2020 года вступили в силу изменения в Федеральный закон от 26.03.2003 г. 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [6], согласно которым обязанности по обеспечению коммерческого учет электрической энергии (мощности) на розничных рынках, а также по установке и замене электросчетчиков перешли к сетевым организациям и гарантирующим поставщикам. С 1 января 2022 года разрешено устанавливать только интеллектуальные приборы учета (т.е. соответствующие минимальному функционалу интеллектуальных систем учёта энергии (мощности) согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 19.06.2020 г. № 890 [7]) взамен вышедших из строя или за межповерочный интервал. Поэтому гарантирующие поставщики вовлечены в процесс поэтапной замены приборов учета, и на них возложена обязанность приемки и ввода в эксплуатацию интеллектуальных счетчиков, установленных в новых жилых домах.

Для выполнения требований действующего законодательства в рамках гарантийных обязательств по замене приборов учета в многоквартирных домах, возложенных Федеральным законом № 522 от 27.12.2018 г., ООО «Орловский энергосбыт» использует

оборудование, произведенное компаниями ООО «Тайпит – ИП» (электросчетчики «НЕВА»), которое вводится в эксплуатацию АИИСКУЭ на основе ZigBee – технологии беспроводной передачи данных, позволяющей организовывать саморегулируемые и самовосстанавливающиеся сети с ретрансляцией сообщений, отличающейся простотой в установке, эксплуатации и модернизации (рисунок 2). Такой способ построения АИИСКУЭ полностью исключает проводные каналы данных, в отличие от устаревшей сети передачи данных на основе интерфейса RS-485, которая строится на системе приемопередатчиков, связанных между собой при помощи витой пары. Система на основе технологии ZigBee, в общем случае, состоит из контроллера, маршрутизатора и конечного устройства, расположенного в приборе учета. Её преимуществом является то, что конечное устройство большую часть времени находится в спящем режиме, поэтому не может передавать информацию с другого оборудования. Это позволяет сэкономить ресурс батарей, тем самым исключая их частую замену.

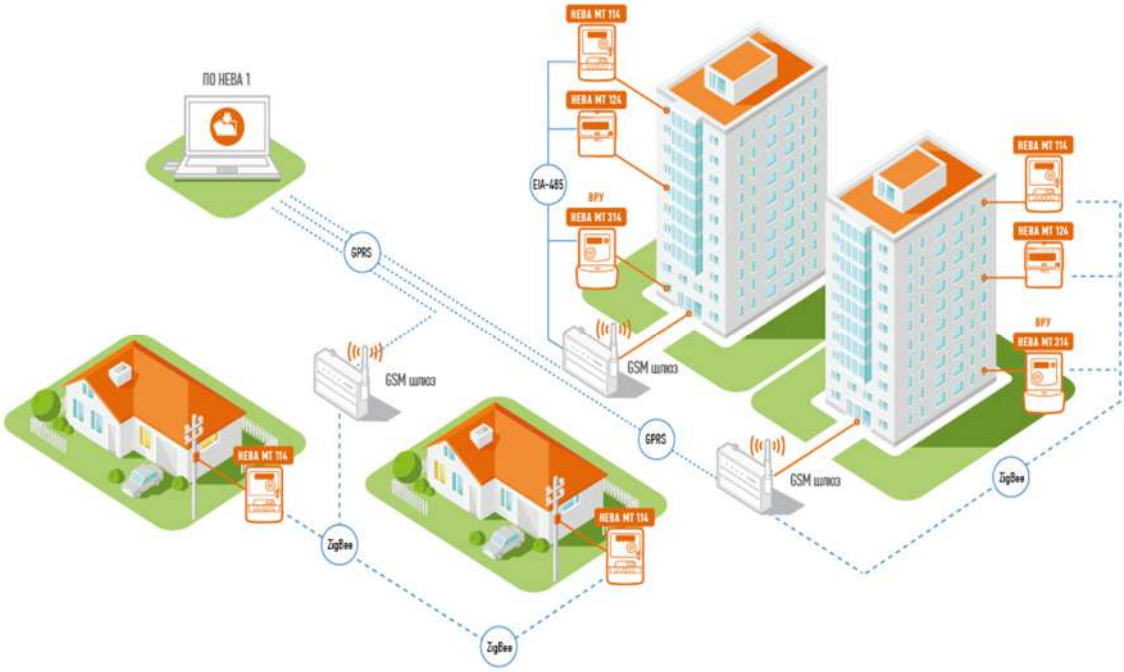


Рисунок 2 – Топология АИИСКУЭ на базе технологии ZigBee

В рамках оказания коммерческих услуг ООО «Орловский энергосбыт» проводит работу по консультированию потребителей относительно выбора приборов учета с оптимальными характеристиками, а также работы по монтажу АИИСКУЭ.

ООО «Орловский энергосбыт» ведет сотрудничество с АО «Электротехнические заводы «Энергомера» [8]. Продукция завода, как в плане соответствия требованиям действующего законодательства, так и в части надежности, долговечности работы и стоимости оборудования, в полной мере отражает возможности и выполняет задачи современного интеллектуального учета. Современным и перспективным способом построения АИИСКУЭ является организация передачи данных на базе гибридного канала связи PLC+RF представляющий собой комбинированный радиоканал RF (Radio Frequency) 433 МГц и PLC технологии НЕРО (рисунок 3), являющийся дальнейшим развитием PLC (Power Line Communication) – телекоммуникационной технологии, основанной на использовании электросетей для высокоскоростного обмена информацией.

АИИСКУЭ, построенная на гибридном канале связи имеет ряд преимуществ в местах частного сектора и плотной застройки, где счетчики, располагаясь на достаточно близком расстоянии друг от друга, выступают ретрансляторами, передавая информацию посредством таких технологий связи как PLC и RF. Технология PLC основана на отправке информации по линиям электропередач, а RF – каналам радиочастоты. Комбинация обоих способов передачи данных позволяет сочетать в себе их преимущества и нивелировать недостатки.

Большое количество зданий, неровности окружающей местности, зашумленность нелицензируемых частотных диапазонов, промышленные источники помех отрицательно влияют на надежность передачи данных. Технология RF дополняет PLC в местах повышенных помех в линии электропередач. Программа сбора данных позволяет отслеживать сигналы о возникшей проблеме в режиме реального времени и выделять номер прибора учета, который требует внимания специалиста. С точки зрения обслуживания такая система является выгодной инвестицией в точный интеллектуальный учет. Она не требует частого профилактического обслуживания (лишь периодическая замена элементов питания), не несет в себе рисков дополнительных потерь электроэнергии, способна оперативно передавать большие объемы данных, обладает высокой помехоустойчивостью, за счет гибридного канала что позволяет обеспечить корректный сбор данных.

Рисунок 3 – Топология АИИСКУЭ на базе гибридного канала связи PLC+RF

В XXI веке, благодаря инновациям и разработкам в области электроники, приборов, коммуникаций и обработки данных, произошли большие технологические достижения в области распределения и использования электрической энергии. Эти достижения сталкиваются со многими проблемами, требующими новых инструментов и подходов для их решения. Инфраструктура интеллектуальных счётчиков в системе АИИСКУЭ является одним из таких инструментов, который может осуществлять сбор и передачу данных в реальном времени и отдавать исполнительные команды потребителям. Этот ценный инструмент позволяет коммунальным компаниям и поставщикам энергии получать достоверную информацию о состоянии своей сети в целях планирования и оптимизации производительности. К сожалению, на данный момент далеко не все потребители подключены к данной системе.

Российская программа полного оснащения интеллектуальными приборами учёта электроэнергии должна завершиться в течение 16 лет, т.е. того периода, пока последние из установленных в 2020-2021 годах обычных приборов учёта не выйдут за межповерочный интервал. В перспективе данная программа должна подтолкнуть к изменениям и установке умных приборов в других секторах ресурсоснабжения – горячее/холодное водоснабжение, тепло- и газоснабжение, что позволит организовать интеллектуальную систему внутри отдельно взятого дома или квартиры в концепции «умного дома». В будущем

интеллектуальные счётчики смогут стать «умным хабом» для концентрации информации со всех устройств дома или квартиры, что должно привести к организации эффективного энергоменеджмента с использованием средств обработки больших данных и статистики под управлением «искусственного интеллекта».

Уже сегодня можно с уверенностью сказать, что интеллектуальные приборы учёта изменят нашу будущую жизнь, где все электрические устройства смогут стать единым, самоорганизующимся организмом, который служит целям удобства, комфорта и эффективной деятельности человека.

Список источников

1. Дягилев, А. А. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) / А. А. Дягилев, П. П. Новиков, В. В. Бутушин. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2018. – № 7 (193). – С. 33-36. – URL: https://moluch.ru/archive/193/48370/ (дата обращения: 03.11.2022).

2. Siano P. Demand Response and Smart Grids – a Survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 30, pp. 461–478. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.022

3. Fangxing L.,Wei Q., Hongbin S., Hui W., Jianhui W., Yan X., Zhao X., Pei Z. Smart Transmission Grid: Vision and Framework. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, vol. 1, pp. 168–177. DOI: 10.1109/TSG.2010.2053726

4. In-Home Displays. Smartmeters. Available at: http://www.smartmeters.vic.gov.au/interactive-devices/in-home-displays

5. Faruqui A., Sergici S., Sharif A. The Impact of Information Feedback on Energy Consumption – a Survey of the Experimental Evidence. Energy, 2009, vol. 35, pp. 1598–1608. DOI: 10.1016/j.energy.2009.07.042

6. Федеральный закон от 27 декабря 2018 г. № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации»

7. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.06.2020 г. № 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)».

8. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) / АО «Концерн Энергомера» // [Электронный ресурс] – URL: http://www.energomera.ru/ru/products/askue/about (дата обращения: 10.11.2022).

Юрьев Юрий Николаевич – генеральный директор ООО «Орловский энергосбыт»; адрес: 302020, г. Орёл, ул. Полесская, 28к; тел. 8(4862)734473; e-mail: secretary@interrao-orel.ru.

Павлов Юрий Васильевич – начальник управления по коммерческим услугам ООО «Орловский энергосбыт»; адрес: 302020, г. Орёл, ул. Полесская, 28К; тел. 8(4862)545955; e-mail: pavlov_yv@interrao-orel.ru.

Миронов Евгений Андреевич – магистр, инспектор технического контроля ООО «Орловский энергосбыт»; адрес: 302020, г. Орёл, ул. Полесская, 28к; тел. 89066612444; e-mail: mironov_ea@interrao-orel.ru.

UCD 62-52

ANALYSIS OF THE USE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF AMR SYSTEMS AS AN EFFECTIVE WAY OF ORGANIZING COMMERCIAL METERING OF ELECTRICITY

Yuryev Yu.N., Pavlov Yu.V., Mironov E.A.
Russia, Oryol, LLC «Orel energy distribution»

Summary. A retrospective analysis of the application and experience of using AMR systems in native and foreign practice was performed. The modern principles of AMR construction are considered, the expediency of installing such systems from the point of view of economic efficiency, technological reliability and functionality is substantiated.

Keywords: AMR, RS-485, PLC+RF, ZigBee, electricity metering device, wireless information transmission, LLC "Orel energy distribution"

References

1. Dyagilev, A. A. Automated system for commercial electricity metering (ASKUE) / A. A. Dyagilev, P. P. Novikov, V. V. Butushin. – Text: direct // Young scientist. - 2018. - No. 7 (193). - S. 33-36. – URL: https://moluch.ru/archive/193/48370/ (date of access: 03.11.2022).

2. Siano P. Demand Response and Smart Grids – a Survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 30, pp. 461–478. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.022

3. Fangxing L.,Wei Q., Hongbin S., Hui W., Jianhui W., Yan X., Zhao X., Pei Z. Smart Transmission Grid: Vision and Framework. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, vol. 1, pp. 168–177. DOI: 10.1109/TSG.2010.2053726

4. In-Home Displays. Smartmeters. Available at: http://www.smartmeters.vic.gov.au/interactive-devices/in-home-displays

5. Faruqui A., Sergici S., Sharif A. The Impact of Information Feedback on Energy Consumption – a Survey of the Experimental Evidence. Energy, 2009, vol. 35, pp. 1598–1608. DOI: 10.1016/j.energy.2009.07.042

6. Federal Law No. 522-FZ of December 27, 2018 “On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with the Development of Electricity (Power) Metering Systems in the Russian Federation”

7. Decree of the Government of the Russian Federation of June 19, 2020 No. 890 "On the procedure for providing access to the minimum set of functions of intelligent metering systems for electrical energy (power)".

8. Automated system for the commercial accounting of electricity (ASKUE) / JSC Concern Energomera // [Electronic resource] - URL: http://www.energomera.ru/ru/products/askue/about (date of access: 10.11.2022).

Yuryev Yury Nikolaevich – CEO of LLC «Orel energy distribution»; address: 302020, Orel, st. Polesskaya, 28k; tel. 8(4862)734473; e-mail: secretary@interrao-orel.ru

Pavlov Yury Vasilievich – Head of the Commercial Services Department of LLC «Orel energy distribution»; address: 302020, Orel, st. Polesskaya, 28k; tel. 8 (4862) 54-59-55; e-mail: pavlov_yv@interrao-orel.ru.

Mironov Evgeniy Andreevich – Master, Inspector of technical control of LLC «Orel energy distribution»; address: 302020, Orel, st. Polesskaya, 28k; tel. 89066612444; e-mail: mironov_ea@interrao-orel.ru.

УДК: 621.316.9

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА НЕЙТРАЛИЗАЦИЮ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 10 КВ

Чернышов В.А., Даровых А.С., Лукьянов Г.В.

Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

Аннотация. В статье рассматривается специфика функционирования воздушных электрических сетей напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью в условиях возникновения однофазных замыканий на землю, а также изложен алгоритм отыскания данных повреждений. На основании особенностей современного развития электроэнергетики обосновывается необходимость разработки простых и вместе с тем эффективных инженерно-технических решений, не использующих цифровые технологии и интеллектуальные системы управления, но способные при этом обеспечивать надежную работу электросетевой инфраструктуры 10 кВ с однофазным повреждением изоляции, в том числе и в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: воздушная электрическая сеть 10 кВ с изолированной нейтралью; однофазное замыкание на землю; шаговое напряжение, электротравматизм; перенапряжение изоляции; двойное замыкание на землю, надежность и бесперебойность электроснабжения.

© Чернышов В.А., Даровых А.С., Лукьянов Г.В., 2022

Воздушные электрические сети с изолированной нейтралью используются в единой энергетической системе России на протяжении долгого периода времени. В настоящее время значительная часть повреждений в таких сетях вызвана однофазными замыканиями на землю (ОЗНЗ) [1], которые происходят из-за обрывов проводов и пробоя изоляции, при этом фазное напряжение у потребителей не изменяется, что позволяет им продолжать работу в штатном режиме. Следует отметить, что при возникновении ОЗНЗ в электрической связанной сети возникают опасные перенапряжения, которые, в свою очередь, являются причиной возникновения двойного замыкания на землю (ДЗНЗ). Также возникновение ОЗНЗ является причиной формирования потенциально-опасной зоны действия шагового напряжения, в месте повреждения изоляции. Современные циркуляры обязывают диспетчеров незамедлительно отключать линию при установлении факта возникновения повреждения ее изоляции, и организовывать отыскание места повреждения при снятом напряжении [2]. На первый взгляд, эти мероприятия направленны на предупреждение электротравматизма [3] людей и животных, оказавшихся вблизи места повреждения изоляции, а также на устранение возникших в электрической сети перенапряжений изоляции. Но вместе с тем, данные мероприятия значительно осложняют оперативно-выездной бригаде процесс поиска ОЗНЗ, а также негативно сказываются на жизнедеятельности различных агропромышленных потребителей, испытывающих в это время перебой в электроснабжении. На современных модернизированных подстанциях существует дежурный персонал, который в случае возникновения ОЗНЗ на одной из воздушных линий, отходящих от подстанции, получает сигнал от устройства неселективной сигнализации и приступает к отысканию поврежденного направления, путем поочередного выключения и включения высоковольтных выключателей [4]. При отключении линии с поврежденной изоляцией, устройство неселективной сигнализации перестает формировать сигнал. Дежурный персонал сообщает диспетчеру номер линии с ОЗНЗ и на поиски места повреждения выдвигается оперативно-выездная бригада [5]. В случае отсутствия на подстанции дежурного персонала, устройство контроля изоляции формирует сигнал диспетчеру о факте возникновения ОЗНЗ в электрической связанной сети. На подстанцию выдвигается оперативно-выездная бригада, которая действуя по выше описанному алгоритму, определяет номер отходящей линии с ОЗНЗ и под руководством диспетчера приступает к отысканию и устранению места с поврежденной изоляцией. Как показывает практика, процесс отыскания ОЗНЗ в таком случае может занимать достаточно длительный период времени (от одного часа и более).

При этом на современных, так называемых цифровых подстанциях, релейная защита и автоматика которых выполнена с использованием интеллектуальных систем микропроцессорного контроля и управления, а передача и прием аппаратной информации осуществляется по беспроводным каналам GSM связи [6], процесс отыскания и отключения линии с ОЗНЗ быстротечен и не приводит к негативным последствиям, рассмотренным ранее. По всей видимости, в рамках крупномасштабной программы «Цифровая трансформация», современный электросетевой комплекс 10 кВ ждут коренные структурные изменения. Поэтому он все больше и больше будет зависть от цифровых информационно-телекоммуникационных технологий. Хорошо это или плохо, время покажет! Ну а пока, анализ существующих вариантов и альтернативных возможностей повышения эффективности функционирования воздушных электрических сетей 10 кВ с изолированной нейтралью, позволяет авторам сделать следующие нетривиальные выводы.

Современный вектор развития научно-технического прогресса, ориентирован преимущественно на дальнейшую разработку и активное внедрение на объектах электроэнергетики, разнообразных цифровых технологий и интеллектуальных систем микропроцессорного контроля и управления. Радужная перспектива, отмеченного явления, на первый взгляд напоминающего коллаборацию энергетических процессов и информационно-коммуникационных технологий, на самом же деле далеко обманчива. В реальности, имеет место процесс, когда одна коммерциализированная информационно-коммуникационная система, под управлением маркетологов, паразитирует на другой

энергетической системе, необоснованно беря под контроль все управляющие функции и порождая при этом все новые технологические процессы, требующие контроля. В итоге, это оказывает на распределительные электрические сети 10 кВ весьма негативный эффект, заключающийся в их неготовности эффективно функционировать в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного или природного характера, когда будут выведены из строя микропроцессорные системы управления или откажут беспроводные каналы передачи информации. В этой связи крайне недальновидно и неосмотрительно ставить во главу угла только развитие цифровых технологий и необоснованное внедрение микропроцессорного контроля и управления. Очень важно развивать и совершенствовать способы непосредственного противодействия возникновению ненормальных режимов работы, к которым, в частности относится ОЗНЗ. Данные способы должны использовать новые схемотехнические решения и алгоритмы функционирования, позволяющие идентифицировать, блокировать и нейтрализовать ОЗНЗ. Наиболее ярким примером такого, инженерно-технического решения, позволяющего не отключая линию быстро выявлять ОЗНЗ, является высокоомное резистивное заземление нейтрали в сети 10 кВ, впервые предложенное и внедренное Петерсеном в начале 20 века [7]. В качестве примера, также можно упомянуть применение ВЛ с проводами защищенными изоляцией (ВЛЗ) [8], самовосстанавливающихся ВЛЭП [9], полимерных изоляторов [10], а также установку между траверсами и заземляющими выпусками ж/б опор нелинейных ограничителей перенапряжения [11], предложенные научными коллективами уже в настоящее время. Таким образом, разработка и внедрение эффективных и вместе с тем простых инженерно-технических решений, направленных, в том числе и на поддержание стабильной и безопасной работы систем электроснабжения 10 кВ, в условиях возникновения однофазных повреждений изоляции и не допускающих при этом снижение надежности электроснабжения потребителей является актуальной задачей [12].

Коллектив кафедры электрооборудования и энергосбережения целеустремленно и методично работает в данном направлении. На сегодняшний день авторы разработали радикальное схемотехническое решение, позволяющее не нарушать электроснабжение потребителей при возникновении в электрической сети однофазного повреждения изоляции, в течение всего периода времени, необходимого для его отыскания, а также минимизировать вероятность возникновения электротравматизма людей и животных в зоне его существования. В настоящее время по результатам НИРС подготовлена заявка на предполагаемое изобретение.

Список источников

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев // М.: Энергия, 1971. – 152 с.

2. Арцишевский, Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью / Я.Л. Арцишевский // М.: Высш. Шк., 1988. – 94 с.

3. Пушенко, С.Л. Анализ электротравматизма среди рабочих / С.Л. Пушенко, Стасева Е.В., Демченко С.Г., Насонова С.Ю., Теньгаева А.Н // Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. С. 2-6

4. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств: учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.

5. Зуб, Н.С. Определение места повреждения ЛЭП 6-10 кВ при однофазном замыкании на землю / Н.С. Зуб // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2017. С. 46-49

6. Шмойлов, А.В. Селективность и техническая эффективность релейной защиты и автоматики / А.В. Шмойлов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. С. 89-95

7. Petersen W. Der aussetzende Erdschluss. ETZ, Bd 38, S.553-555; ETZ, Bd 47, S.564-566; ETZ, Bd48, 1917.

8. Беспрозванных, А.В. Влияние толщины изоляции защищенных проводов высоковольтных ЛЭП на их пропускную способность по току / А.В. Беспрозванных, В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец // Техника Сильных электрических и магнитных полей. Кабельная техника. – 2018. С. 41-46

9. Иванов, Р.В. Самовосстанавливающиеся воздушные линии электропередачи 6–10 кВ. Опыт применения в ПАО «Россети Московский регион» / Р.В. Иванов // Электроэнергия. Передача и распределение, №2(21). – 2021. С. 26-28

10. Ассоциация «Электросетьизоляция». Полимерные изоляционные конструкции для ВЛ. Развенчиваем мифы / Электроэнергия. Передача и распределение, №6(69). –2021. С. 88-91

11. Качанов, А.Н. Повышение эффективности функционирования воздушных электрических сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью при однофазных повреждениях изоляции / А.Н. Качанов, В.А. Чернышов, Б.Н. Мешков, М.Ш. Гарифуллин, Е.А. Печагин // Вести высших учебных заведений Черноземья: науч.-техн. и производств. журнал. – 2021. – С. 80-94

12. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков // М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Даровых Алина Сергеевна, магистрант 1 курса, направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89803676427, E-mail: alinkadarovyh1@gmail.com.

Лукьянов Геннадий Владимирович, магистрант 1 курса, направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89532929906, E-mail: lukyanov220@mail.ru.

UDC: 621.316.9

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING AND TECHNICAL SOLUTIONS AIMED AT THE NEUTRALIZATION OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT IN A 10 KV NETWORK

Chernyshov V.A., Darovykh A.S., Lukyanov G.V.

Russia, Orel, FSBEI HE «OSU named after I.S. Turgenev»

Summary. The article discusses the specifics of the functioning of overhead electrical networks with a voltage of 10 kV with an isolated neutral in the conditions of the occurrence of single-phase earth faults, and also outlines an algorithm for finding these damages. Based on the features of the modern development of the electric power industry, the necessity of developing simple and at the same time effective engineering and technical solutions that do not use digital technologies and intelligent control systems, but are capable of ensuring reliable operation of the 10 kV power grid infrastructure with single-phase insulation damage, including conditions of emergencies.

Keywords: overhead electrical network 10 kV with isolated neutral; single-phase earth fault; step voltage, electrical injury; isolation overvoltage; double ground fault, reliability and uninterrupted power supply,

References

1. Likhachev F.A. Ground faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents / F.A. Likhachev // M.: Energy, 1971. - 152 p.

2. Artsishevsky, Ya.L. Determining the places of damage to power lines in networks with isolated neutral / Ya.L. Artsishevsky // M.: Vyssh. Shk., 1988. - 94 p.

3. Pushenko, S.L. Analysis of electrical injuries among workers / S.L. Pushenko, Staseva E.V., Demchenko S.G., Nasonova S.Yu., Tengaeva A.N. // Safety of technogenic and natural systems. – 2020. P. 2-6

4. Nabatov, K.A. High-voltage vacuum switches of distributing devices: study guide / K.A. Nabatov, V.V. Afonin. - Tambov: Publishing House of GOU VPO TSTU, 2010. - 96 p.

5. Zub, N.S. Determining the location of damage to power transmission lines 6-10 kV with a single-phase earth fault / N.S. Tooth // International Scientific Journal "Innovative Science". – 2017. P. 46-49

6. Shmoylov, A.V. Selectivity and technical efficiency of relay protection and automation / A.V. Shmoylov // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. – 2008. S. 89-95

7. Shuin, V.A. Ground fault protection in electrical networks 6-10 kV / V.A. Shuin, A.V. Gusenkov // M.: NTF "Energoprogress", 2001. - 104 p.

8. Evminov, L.I. Application of resistive neutral grounding in electrical networks 6-35 kV / L.I. Evminov, T.V. Alferov // Bulletin of GGTU im. ON. Sukhoi. – 2022. P. 53-67
7. Petersen W. Der aussetzende Erdschluss. ETZ, Bd 38, S.553-555; ETZ, Bd 47, S.564-566; ETZ, Bd48, 1917.
8. Bezprozvannykh, A.V. Influence of the insulation thickness of protected wires of high-voltage power lines on their current carrying capacity / A.V. Bezprozvannykh, V.M. Zolotarev, Yu.A. Antonets // Technique of Strong Electric and Magnetic Fields. Cable technology. – 2018. P. 41-46
9. Ivanov, R.V. Self-healing overhead power lines 6–10 kV. Application experience in PJSC Rosseti Moscow Region / R.V. Ivanov // Electricity. Transfer and distribution. – 2021. P. 26-28
10. Association "Electric network isolation". Polymeric insulating structures for overhead lines. Debunking the myths / Electricity. Transmission and distribution, No. 6(69). -2021. pp. 88-91
11. Kachanov, A.N. Improving the efficiency of functioning of air electrical networks 6-10 kV with isolated neutral in case of single-phase insulation damage / A.N. Kachanov, V.A. Chernyshov, B.N. Meshkov, M.Sh. Garifullin, E.A. Pechagin // News of higher educational institutions of the Chernozem region: scientific and technical. and productions. magazine. - 2021. - S. 80-94
12. Shuin, V.A. Ground fault protection in electrical networks 6-10 kV / V.A. Shuin, A.V. Gusenkov // M.: NTF "Energoprogress", 2001. - 104 p.

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, room. 228l, tel. 89536132255, E-mail: blackseam78@mail.ru.
Darovykh Alina Sergeevna, 1nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89803676427, E-mail: alinkadarovyh1@gmail.com.
Lukyanov Gennady Vladimirovich, 1nd year undergraduate, direction of training 04/13/02 "Electricity and electrical engineering" FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev", Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. Turgenev OSU Oryol, Naugorskoe highway, 29, tel. 89532929906, E-mail: lukyanov220@mail.ru.

СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Никольский Олег Константинович, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электротехника и автоматизированный электропривод» и быта» ФГБОУ ВО «АлтГТУ имени Ползунова И.И.», г. Барнаул.

УДК 620.97

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПЛАВУЧИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Гаранин М.Е., Федянин В.Я.
Российская Федерация, Барнаул, ФГБОУ ВО АлтГТУ имени И.И Ползунова

Аннотация. Возобновляемые источники являются перспективными и экологически чистыми источниками электроэнергии. В настоящее время набирают популярность плавучие солнечные электростанции, расположенные на поверхности озер и водохранилищ. Для увеличения эффективности плавучей солнечной электростанции возникает необходимость в создании автоматизированной системы ориентирования солнечных панелей.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная радиация (СР), солнечные панели, солнечные коллекторы, системы слежения.

© Гаранин М.Е., Федянин В.Я., 2022

Расположение солнечных электростанций на воде имеет ряд преимуществ, таких как: увеличение отраженной составляющей солнечной радиации за счет падения солнечных лучей от поверхности воды, сохранение полезных территорий земли, уменьшение испарения и предотвращение заболачивание водоемов.[1]

Произведем расчет прихода солнечной радиации на фотоэлектрический модуль (ФМ) по методике, разработанной в Алтайском государственном техническом университете им И.И. Ползунова. Солнечная радиация (СР) поступает на ФМ в виде трех составляющих: прямая, рассеянная и отраженная [1]. Суммарная СР рассчитывается следующим образом:

$$R_{\Sigma}(t) = R_{\text{пр}}(t) + R_{\text{д}}(t) + R_{\text{отр}}(t); \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}}(t)$ – прямая составляющая СР;

$R_{\text{д}}(t)$ – диффузионная или рассеянная составляющая СР;

$R_{\text{отр}}(t)$ – отраженная составляющая СР от поверхности Земли.

Из трех составляющих солнечного излучения ($R_{пр}$, $R_{д}$, $R_{отр}$), наибольшее значение для солнечной энергетики имеет прямое солнечное излучение – $R_{пр}(t)$ [1]. На рисунке 1 представлена схема поступления прямой СР. Мощность прямого солнечного излучения на произвольно ориентированную площадку площадью F(м^2) на Земле в любой момент времени ($R_F(t)$) определяется следующим соотношением:

$$R_F\,(t) = R_m\,(t) \cdot \cos\Theta^0(t), \quad (2)$$

где $R_m(t)$ – мощность потока прямого солнечного излучения падающего на приемную площадку под прямым углом, при оптической массе атмосферы m,

Θ^0 (град) – угол падения СР.

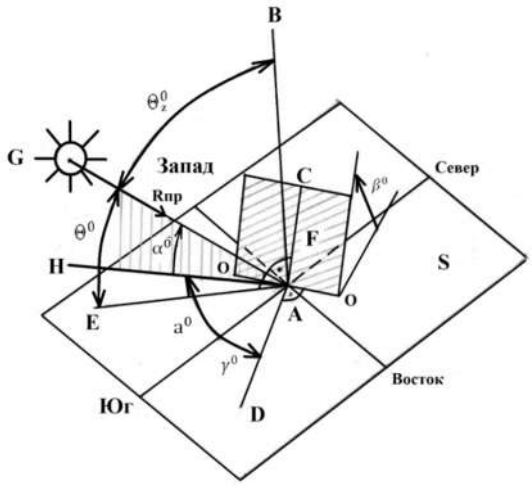


Рисунок 1- Геометрия приемной площадки

Для определения оптимального угла ориентирования следует решить задачу:

$\cos\Theta^0\,[max]$, при $\omega = const$

Применим формулу для нахождения угла падения СР:

$$cos\theta = sin\delta \cdot sin\varphi \cdot cos\beta - sin\delta \cdot cos\varphi \cdot sin\beta \cdot cos\gamma + cos\delta \cdot cos\varphi \cdot cos\beta \cdot cos\omega + cos\delta \cdot sin\varphi \cdot sin\beta \cdot cos\gamma \cdot cos\omega + cos\delta \cdot sin\beta \cdot sin\gamma \cdot sin\omega \quad (3)$$

где β^0 – угол наклона площадки, рад;

γ^0 – азимут приемной площадки, рад;

φ – широта местности, рад;

δ – угол склонения солнца, рад;

ω – часовой угол солнца, рад

Угол склонения солнца может быть найден по формуле:

$$\delta = \delta_0 sin\left(360\frac{284+d}{365}\right);$$

где δ_0 – максимальное склонение и равно $\delta = 23.45°$

d – порядковый номер дня отсчитываемый с начала года

Часовой угол солнца определяется по формуле:

$$\omega = 15\left(t - t_{\text{полд}}\right) + E(t) + (\psi - \psi_{\text{зоны}})$$

где $t_{пол}$ – время солнечного полдня для данной часовой зоны, ч

E(t) – уравнение времени

$\psi_{зоны}$– географическая долгота той меридиональной плоскости, в которой полдень совпадает с истинным солнечным полднем, рад.

В качестве примера был произведен расчет прихода солнечной радиации для месяца июня. Приемная площадка располагалась в местности с координатами 53°20'53.0"с.ш. 83°37'51.2"в.д. (г. Барнаул). На рисунке 2 изображена круговая диаграмма суточного прихода солнечной радиации на приемную площадку, за ноль принято ориентирование на Юг. В таблице 1 рассчитано поступление солнечной радиации с системой ориентирования и ориентированием строго на юг.

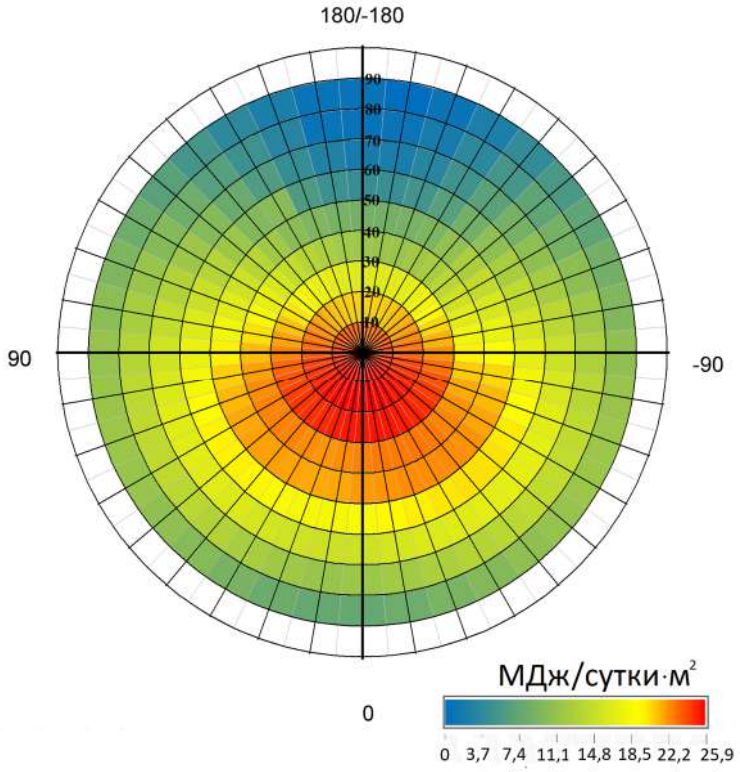


Рисунок 2- Круговая диаграмма солнечной радиации для июня месяца

Таблица 1 - Результаты расчета солнечной радиации, поступающей на приёмную площадку с системой ориентирования, и при ориентировании строго на юг

Час	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
γ^0	-121	-110	-100	-87	-73	-57	-37	-13	16	41	61	75	88	100	111	122
β^0	85	73	67	58	47	40	33	28	27	32	41	49	58	68	79	85
R_m (МДж/час·м^2)	0,9	1,6	2,2	2,6	2,8	3	3,2	3,3	3,3	3,2	3	2,8	2,5	2,1	1,5	0,8
	При ориентировании строго на юг															
R_m (МДж/час·м^2)	0	0,4	0,7	1,3	1,9	2,6	3	3,2	3,2	3	2,5	1,9	1,3	0,6	0,3	0

Солнечная электростанция представляет собой неподвижное основание с закрепленными на поверхности электродвигателями и подвижное основание с закрепленным на поверхности ФМ. Поворот подвижного основания осуществляется с помощью поворотного двигателя. Наклон площадки осуществляется с помощью пневматического привода.

В основе устройства определяющего положения ФМ относительно солнца лежат фотоэлектрические датчики, представляющие собой фоторезистор. Датчики располагаются по центру граней ФМ и направленны под углом 80° к солнечной панели. Таким образом, при попадании лучей под прямым углом на поверхность солнечного модуля, фотодатчики, расположенные напротив, будут иметь одинаковое сопротивление. Если же сопротивление датчиков будет разное, то ФМ будет ориентироваться до тех пор, пока сопротивление напротив лежащих датчиков не станет равным. [2]

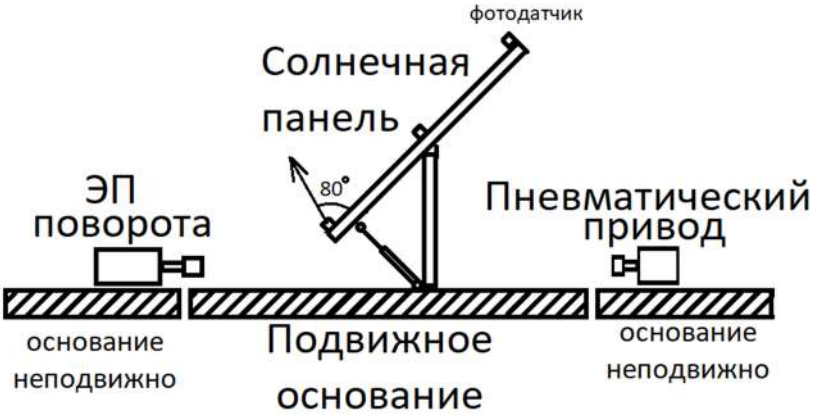


Рисунок 3- Схема плавучей солнечной электростанции

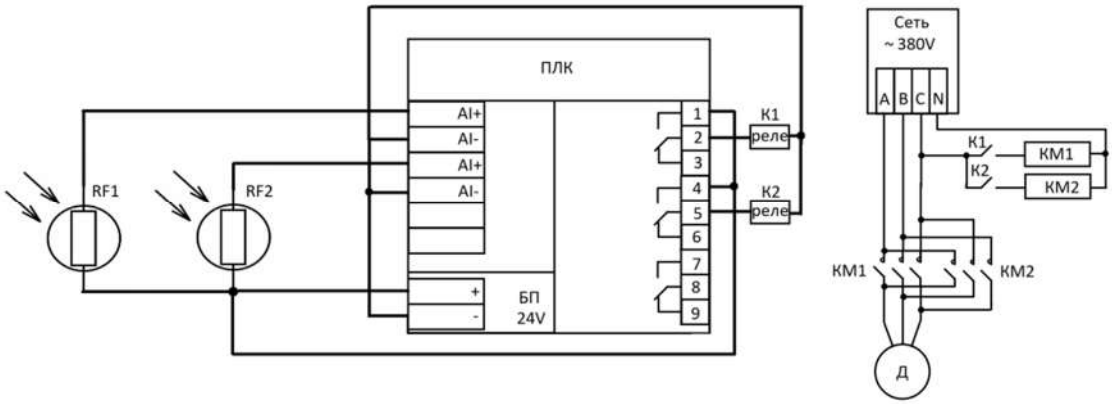


Рисунок 4 – Схема управления системы ориентирования фотоэлектрического модуля;
RF1, RF2- фотоэлектрические датчики; ПЛК- программируемый логический контроллер; AI+, AI- - Аналоговые входа ПЛК; БП- Блок питания 24V; 1,2…9 - управляемые выходы ПЛК; К1, К2 – Реле; A, B,C, N – трехфазная система питания с нейтральным проводом; КМ1, КМ2- контактор трехфазный, Д- двигатель

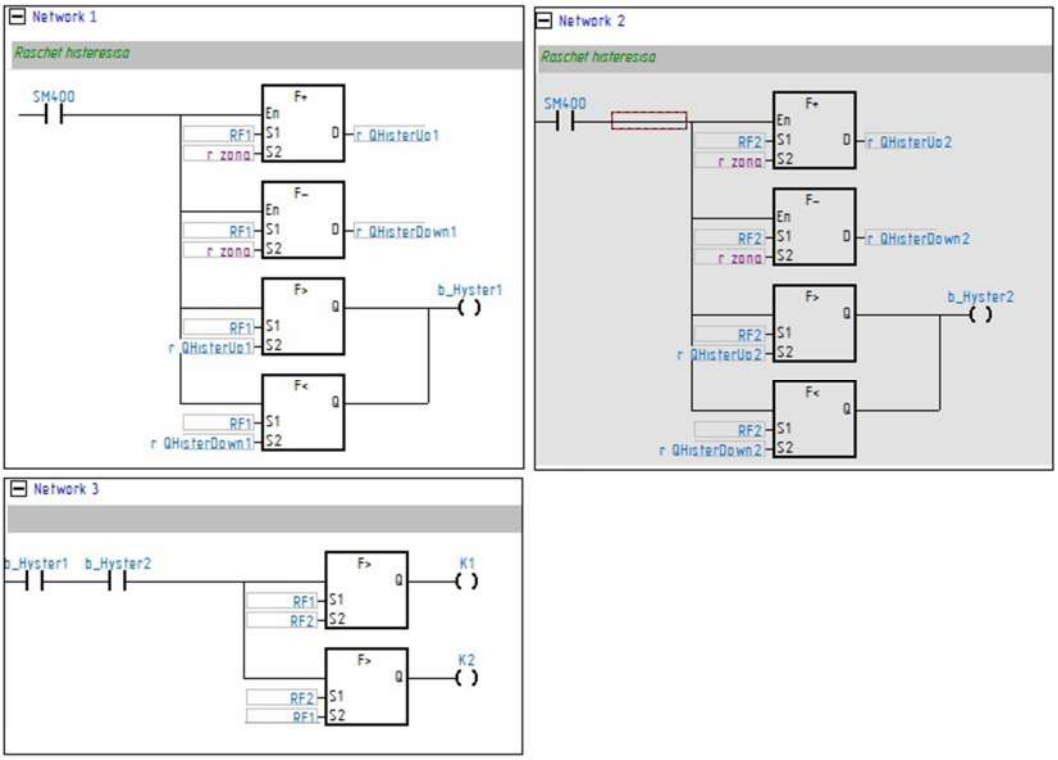


Рисунок 5 – Программа ПЛК

Система работает следующим образом. Когда солнечные лучи поступают на ФМ под эффективным углом, то значения, поступающие с фотодатчиков на аналоговые входа контроллера, будут находиться в зоне гистерезиса и регулировка происходить не будет. По мере движения солнца, значения выходных параметров с фотодатчиков будут изменяться, и в момент, когда они выйдут из зоны не регулирования, произведется сравнение двух входных сигналов на выявление наибольшего. Пусть наибольшее значение будет у фотореле RF1, тогда питание получит реле К1 и замкнет свой контакт в цепи управления двигателя. Получит питание контактор КМ1 и подключит двигатель к сети и будет производиться регулирование. Когда значения входных параметров войдут в зону гистерезиса, регулирование прекратится. Схема регулирования наклона аналогична. [3]

Разработанная система позволяет увеличить эффективность плавучих солнечных электростанций за счет применения автоматизированной системы слежения за солнцем

Список источников

1.Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.,СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА:Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 320 с.

2. Волчкевич, Л. И. Автоматизация производственных процессов : учебное пособие / Л. И. Волчкевич. — 2-е изд., стер. — Москва : Машиностроение, 2007. — 380 с

3. Вдовин Е.В. Учебно-методический комплекс по системе автоматизации Delta Electronics, Inc: [Электронный ресурс]. Режим доступа\ https://www.saa.su/Manual/DELTA/DVP-PLC_aplication%20manual_rus.pdf (дата обращения: 21.10.2022)

Федянин В. Я., доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» ФГБОУ ВО АлтГТУ имени И.И Ползунова, 656038, Российская Федерация, Барнаул, пр-т Ленина, 46 E-mail: fedyanin054@mail.ru

Гаранин М.Е., магистрант 2 курса, направления подготовки 13.04.02 «электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО АлтГТУ имени И.И Ползунова, 656038, Российская Федерация, Барнаул, пр-т Ленина, 46, тел: +79539909189, E-mail: vsalem0@gmail.com

---

UDC 620.97

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SOLAR PANEL ORIENTATION SYSTEM FOR FLOATING POWER PLANTS

Garanin M.E., Fedyanin V.Ya.

Russian Federation, Barnaul, I.I. Polzunov Altai State Technical University

Summary. Renewable sources are promising and environmentally friendly sources of electricity. Currently, floating solar power plants located on the surface of lakes and reservoirs are gaining popularity. In order to increase the efficiency of a floating solar power plant, there is a need to create an automated solar panel orientation system.

Keywords: renewable energy sources, solar radiation (SR), solar panels, solar collectors, tracking systems

Bybliography

1. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K., SOLAR ENERGY:Study guide for universities / Edited by V.I.Vissarionov. – M.: Publishing House of MEI, 2008. – 320 p.

2. Volchkevich, L. I. Automation of production processes: a textbook / L. I. Volchkevich. — 2nd ed., erased. — Moscow : Mashinostroenie, 2007. - 380 s

3. Vdovin E.V. Educational and methodical complex for automation system Delta Electronics, Inc.: [Electronic resource]. Access mode\ https://www.saa.su/Manual/DELTA/DVP-PLC_aplication%20manual_rus.pdf (accessed: 10/21/2022)

Fedyanin V. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of electricity and electrical engineering, I.I. Polzunov AltSTU, 656038, Barnaul, Lenin Ave., 46 E-mail: fedyanin054@mail.ru

Garanin M.E., 2nd year undergraduate, directions of training 13.04.02 "Electricity and electrical engineering" I.I. Polzunov AltSTU, 656038, Barnaul, 46 Lenin Ave., Russia, tel: +79539909189, E-mail: vsalem0@gmail.com

УДК 621.31.031:621.311.21

МИКРО-ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ПОПЕРЕЧНО-СТРУЙНОЙ ГИДРОТУРБИНОЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.

Россия, г. Москва, НИУ-Московский энергетический институт

Аннотация. Удаленный потребитель малой мощности испытывает ряд ограничений по возможности подключения к централизованным электрическим сетям и к сетям децентрализованного электроснабжения. При невозможности подключения, к перечисленным выше сетям, выходом из ситуации является использование локального автономного источника электроснабжения. На данный момент, в Российской Федерации используют дизельные или бензиновые генераторы как локальный автономный источник электроэнергии, реже используют возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Редкое применение обусловлено теми или иными региональными природными ограничениями использования ВИЭ, а также спецификой использованного возобновляемого энергоресурса. В данной работе рассмотрено применение микро-гидроэлектростанции с поперечно-струйной гидротурбиной для электроснабжения удаленного потребителя малой мощности как альтернатива дизельным или бензиновым генераторам электроэнергии.

Ключевые слова: микро-гидроэлектростанция, потребители малой мощности, дальность электропередачи

Гидроагрегаты с классическим типом гидротурбин, в особенности для низких напоров малых рек (2 – 15 метров) трудны по устройству, дорогостоящи в производстве и требуют существенных затрат на сооружение гидротехнических строений. Анализ показывает, что применение классических гидротурбин для низконапорных водотоков ограничивается реактивно-осевым типом, что не всегда является оптимальным решением [1-3]. Для микро-гидроэлектростанции, работающей на низких напорах малых горных рек стоит рассмотреть к применению поперечно-струйную гидротурбину рис. 1.

В отличии от реактивно-осевой гидротурбины, в поперечно-струйной гидротурбине поток воды проходит в поперечном направлении через лопатки рабочего колеса гидротурбины два раза. Сначала поток воды устремляется на внешнюю часть рабочего колеса гидротурбины где отдает кинетическую энергию лопаткам в большей степени, далее попадает во внутреннюю часть рабочего колеса гидротурбины и стремится к противоположной стороне. Достигнув противоположной стороны рабочего колеса гидротурбины поток воды отдает оставшуюся кинетическую энергию лопаткам и выходит наружу по выпускному трубопроводу рис. 2. Из-за такого движения потока воды

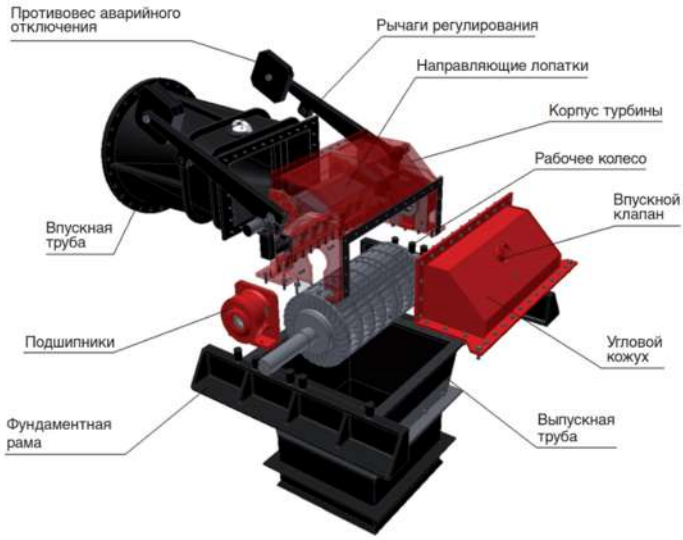


Рисунок 1 – Поперечно-струйная гидротурбина

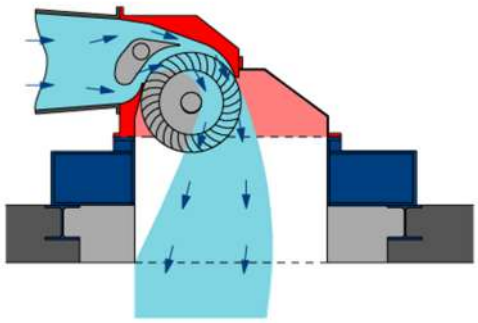


Рисунок 2 – Направление потока воды в поперечно-струйной гидротурбине

© Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р., 2022

энергоэффективность гидротурбины повышается.

По двум основополагающим критериям (объем поступающий воды и необходимая мощность генерации электроэнергии) происходит регулирование потока поступающей воды на рабочее колесо гидротурбины. Регулирование потоком поступающей воды осуществляется с помощью изменения положения (вращения) двух направляющих лопаток. Вращение происходит с помощью независимых рычагов регулирования, которое может выполняться автоматически или в ручном режиме. Полное перекрытие подачи потока поступающей воды обеспечивается крайним положением направляющих лопаток. Рабочее колесо гидротурбины делиться на три секции. Первая направляющая лопатка регулирует поток поступающей воды на одну секцию, вторая – на остальные секции рабочего колеса. Таким образом в зависимости от погодного сезона работы гидротурбины и поступающего потока воды, обеспечивается гибкий режим работы. Анализ показывает, что поперечно-струйная гидротурбина начинает работать с 6% расчетного максимального количества воды (Q) по сравнению с осевой турбиной. Такой способ регулирование потока поступающей воды на рабочие колесо дает плавное изменение КПД гидротурбины рис. 3.

Как мы видим на рис. 3. КПД поперечно-струйной гидротурбины при 66-100% максимального количества воды чуть ниже чем КПД осевой гидротурбины, но в диапазоне 10-66% превосходит его. В связи с конструктивными особенностями при выходе потока воды из рабочего колеса гидротурбины происходит вымывание в выпускной трубопровод попавших мелких предметов (листья, ветки, шуга и т.д.) вместе с поток поступающей воды. Данное обстоятельство не позволяет мелким предметам снизить эффективность работы поперечно-струйной гидротурбины в отличие от гидротурбин других типов, когда мелкие предметы попадаю в них. Простая конструкция поперечно-струйной гидротурбины позволяет обслуживать и производить ремонт механикам по месту установки. Благодаря системе регулирования потока поступающей воды при постоянно меняющейся нагрузки электропотребителя, поперечно-струйная гидротурбина хорошо подходит для автономного производства электроэнергии. Все вышеперечисленные обстоятельства делают более надежным применение поперечно-струйной гидротурбины по сравнению с другими типами гидротурбин при низких напорах малых рек. В настоящее время поперечно-струйная гидротурбина доступна с производительностью до 6 МВт и КПД 70-86% гидравлического потенциала [4].

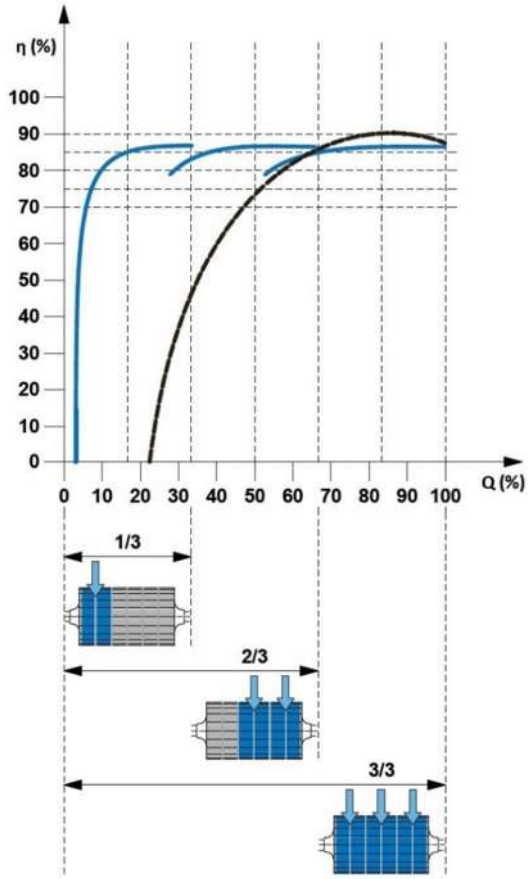


Рисунок 3 – График КПД поперечно-струйной гидротурбины, состоящий из трех кривых при регулировании двумя направляющими лопатками, по сравнению с КПД осевой гидротурбины

Выводы

В данной статье рассмотрен принцип работы, регулирования потока поступающей воды и основные показатели КПД микро-гидроэлектростанции с поперечно-струйной гидротурбиной для электроснабжения удаленного потребителя малой мощности. При невозможности удаленному потребителю малой мощности подключиться к

централизованным электрическим сетям и к сетям децентрализованного электроснабжения, возможно использовать, при наличии рядом гидроэнергоресурса, микро-гидроэлектростанцию с поперечно-струйной гидротурбиной. Применение ВИЭ вместо дизельных или бензиновых генераторов как локальный автономный источник электроэнергии расширяет возможности электроснабжения удаленного потребителя малой мощности независимо от закупок и поставок минерального топлива.

Список источников

1. Захаров, Ю. Ю., Лепешкин А.Р. Анализ конструкций микро-гидроэлектростанций для электроснабжения потребителей малой мощности / Ю. Ю. Захаров, А. Р. Лепешкин // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: Материалы XIX международной научно-практической конференции, Орёл, 10–12 ноября 2021 года / Под редакцией А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2021. – С. 16-18.

2. Захаров, Ю. Ю., Лепешкин А.Р. Исследование систем электропередачи для удаленных потребителей малой мощности от микрогидроэлектростанций / Ю. Ю. Захаров, А. Р. Лепешкин // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 17–19 ноября 2021 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2021. – С. 299-305.

3. Y Y Zakharov and A R Lepeshkin 2022 Method of calculation of water-diverting structures of low-head hydroelectric power plant for power supply of small power consumers. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **1211** 012012 doi:10.1088/1757-899X/1211/1/012012

4. Global market leaders in small hydropower: [Электронный ресурс] // HYDROPOWER TECHNOLOGY. URL: https://www.ossberger.de/de/wasserkrafttechnik. (Дата обращения: 08.10.2022).

UDC 621.31.031:621.311.21

MICRO-HYDROELECTRIC POWER STATION WITH A CROSS-JET HYDRAULIC TURBINE FOR THE POWER SUPPLY OF A REMOTE LOW POWER CONSUMER

Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R.

Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute

Summary. A remote low power consumer has a range of limitations of the possibility to connect to the centralized electric networks and to the networks of the decentralized power supply. At the failure to connect to the networks mentioned above the usage of the local autonomic source of the power supply is the only way out of the situation. At the present moment diesel and petrol generators are used as a local autonomic source of the power supply in the territory of the Russian Federation, the renewable energy sources (RES) are used rarer. The rare usage is due to this or that regional natural limitations of the RES usage, as well as the specific character of the used renewable energy source. In the present work the application of the micro-hydroelectric power station with a cross-jet hydraulic turbine for the power supply of a remote low power consumer as an alternative to the diesel and petrol generators is examined.

*Keywords**:** micro-hydroelectric power station, low power consumers, distance of electro transmission*

References

1. Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R. The analysis of the constructions of the micro-hydroelectric power stations for the power supply of a low power consumer / Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R. // Energy and resource conservation - XXI century: The materials of the XIX international scientific and practical conference, Orel, 10–12 November, year 2021 / Edited by Kachanov A.N., Stepanov Y.S. – Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev, 2021. pp. 16-18.

2. Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R. The research on transmission of electrical energy for the remoted low-power consumers from micro hydropower stations. Fyodorovskie chteniya – 2021: LI international research and training conference with the elements of school of science / under general editorship of Matuynina Y.V. – M.: Publishing House Moscow Power Engineering Institute, 2021. pp. 299-305.

3. Y Y Zakharov and A R Lepeshkin 2022 Method of calculation of water-diverting structures of low-head hydroelectric power plant for power supply of small power consumers. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **1211** 012012 doi:10.1088/1757-899X/1211/1/012012

4. Global market leaders in small hydropower: [Электронный ресурс] // HYDROPOWER TECHNOLOGY. URL: https://www.ossberger.de/de/wasserkrafttechnik. (Дата обращения: 08.10.2022).

УДК 537.311: 621.365

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ КОРМОВЫХ СМЕСЕЙ С КАМЕРОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Дорожкин М.В.
Российская Федерация, Барнаул, ФГБОУ ВО АлтГТУ имени И.И Ползунова

Аннотация. Статья посвящена исследованию электрических параметров многоэлектродной установки электроконтактного нагрева с камерой прямоугольного сечения, применяемой для обеззараживания жидких кормовых смесей, используемых в животноводстве. Предложены эквивалентная схема двух электродной ячейки, а также схема замещения многоэлектродной установки. Приведен алгоритм расчета основных параметров электроустановки для предложенной схемы расположения электродов и конфигурации диэлектрической камеры. В результате моделирования физических процессов получены карты распределения плотности тока в электропроводной среде поперечного сечения камеры установки, по которым были построены графики распределения тока для межэлектродного пространства сопоставимых по параметрам зон камеры, имеющих различные схемы питания электродов.

Ключевые слова: электроконтактный нагрев, обеззараживание кормов, многоэлектродная ЭК установка, распределение плотности тока, объемный нагрев.

Электроконтактный (ЭК) нагрев как явление известен достаточно давно, и в настоящее время с успехом применяется во многих областях науки и техники. Эффективность такого прямого нагрева проявляется наиболее сильно для однородных (гомогенных) проводящих сред с невысокой электропроводностью [1].

В большинстве случаев, прямой нагрев является не самоцелью, а выступает средством для решения некоторой задачи, например, изменения агрегатного состояния вещества, физико-химических или технологических свойств обрабатываемого сырья [1, 2]. Сказанное относится и к применению ЭК нагрева в технологии обеззараживания кормовых смесей, где главной целью является деконтаминация патогенной микрофлоры за счет создания термически неблагоприятных для ее жизнедеятельности условий [3, 4].

Диэлектрическая камера подобной установки, источник питания, электропроводная кормовая смесь и помещенные в нее цилиндрические электроды, в совокупности представляют собой энергетический преобразователь, в котором подводимая электрическая мощность приводит к объемному росту температуры сырья, вызванному нагревом от равномерно распределенных внутренних источников тепловыделения, образующихся в результате протекания электрического тока [2 - 4].

С этой позиции, наибольший интерес представляет исследование закономерностей распределения энергии в межэлектродном пространстве, в том числе плотности тока в различных зонах камеры, характер которого может зависеть как от конфигурации самой установки, количества, формы и пространственного расположения электродов, электрических свойств обрабатываемого сырья, так и от способа подачи на электроды питающего напряжения и его величины [1 - 3].

Для изучения подобных взаимосвязей ЭК установка со всеми электрическими связями представляется в виде замещающей ее эквивалентной схемы, а элементы ее конструкции - условными графическими обозначениями [2, 5]. Исследование параметров в этом случае осуществляется с применением стандартных методов анализа электрических цепей.

Простейшая конструкция ЭК установки, с помещенной в ее камеру кормовой смесью, будет включать в себя два электрода, расположенных плоскопараллельно на некотором расстоянии. Эквивалентная схема замещения для подобной системы без указания источника питания представлена на рисунке 1[4, 5].

Согласно схемы замещения, полный импеданс установки Z содержит в себе как активную, так и реактивную составляющие, и при условии исключения X_{C2} из-за

© Дорожкин М.В., 2022

незначительного влияния вследствие большого расстояния между электродами будет выражаться в соответствии с [4]:

$$Z = \frac{R_P^{-1} - j \cdot \omega \cdot C_e}{R_P^{-2} + \omega^2 \cdot C_e^2} + R\,, \qquad (1)$$

где C_e – емкость двойного электрического слоя, Ф; ω – угловая частота, определяемая выражением:

$$\omega = 2\pi f\,,$$

где f – частота питающего напряжения, Гц.

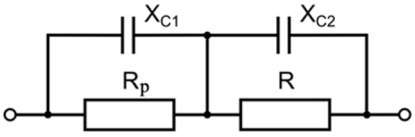


Рисунок 1- Схема замещения системы электрод (анод) - кормовая смесь – электрод (катод)
R_P - суммарный поляризационный импеданс от двух электродов; X_{C1} – емкостное сопротивление двойного электрического слоя; R– активное сопротивление кормовой смеси; X_{C2} – реактивное сопротивление кормовой смеси

Аналогичным образом по формуле (1) можно определить комплексное сопротивление любого участка цепи с электропроводящей средой, находящейся в межэлектродном пространстве любых соседних электродов в камере многоэлектродной ЭК установки.

На рисунке 2 представлен вариант схемы шахматного расположения электродов в камере прямоугольного (квадратного) сечения, при этом соседние по вертикали и горизонтали электроды отстоят друг от друга на расстоянии l_1, а ближайшие – на расстоянии l_2, при их соотношении $l_1 = l_2\sqrt{2}$. По организации питания электроды разбиты на 4 группы, что для обеспечения более равномерного распределения тока в объеме камеры за некоторый интервал времени позволяет реализовать их раздельное погрупповое питание.

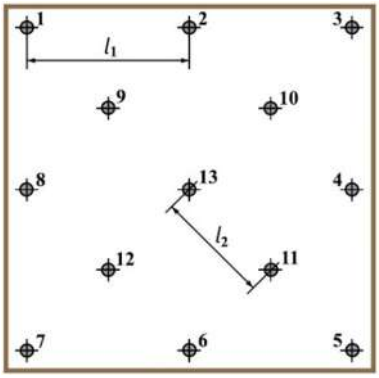


Рисунок 2 – Расположение электродов в камере прямоугольного сечения, где 1, 5, 10, 12 - электроды 1 группы; 3, 7, 9, 11 - электроды 2 группы; 4, 8, 13 - электроды 3 группы; 2, 6 - электроды 4 группы

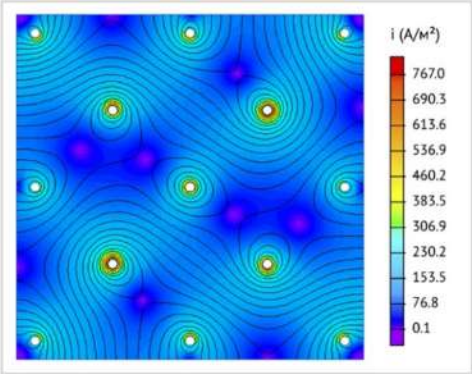
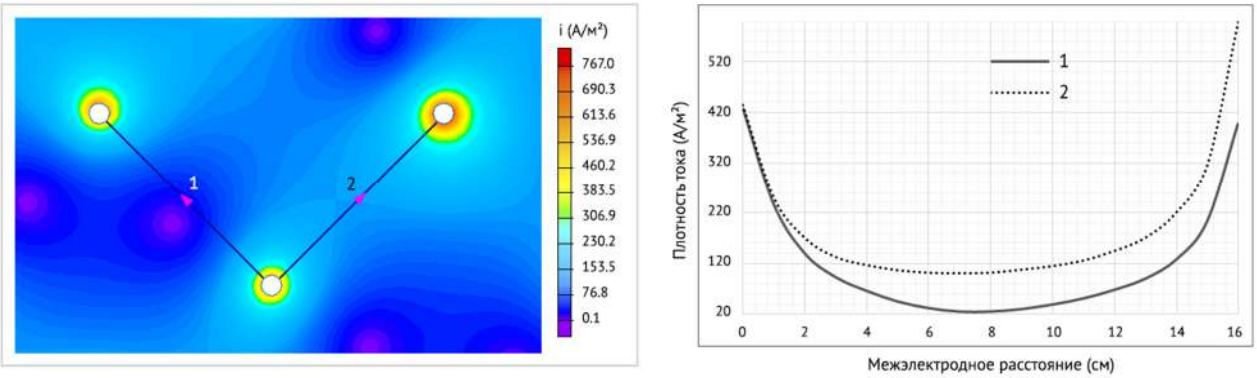


Рисунок 3 – Карта распределения плотности тока в камере прямоугольного сечения с использованием цилиндрических электродов, диаметром d=10 мм

При таком подходе наиболее рациональной для данной конфигурации ЭК установки представляется организация подачи питания на группы электродов по следующим схемам: одномоментно на 1 и 3 группы подается отрицательный потенциал с источника питания, на 2 и 4 группы – положительный, или на 1 и 4 группы – отрицательный, на 2 и 3 группы – положительный. Данный способ питания обеспечивают похожий характер распределения плотности тока в объеме диэлектрической камеры, а их комбинация с использованием переключающих устройств способствует лучшей равномерности по тепловыделению.

Двумерная картина распределения плотности тока (рисунок 3), полученная в результате имитационного моделирования ЭК установки методом конечных элементов, показывает, что

в плоскости поперечного сечения камеры при напряжении питания U = 200 В и удельном сопротивлении кормовой смеси Z = 7 Ом·м, наблюдается некоторая неравномерность поля, а, следовательно, имеются зоны с отличными друг от друга значениями тока.



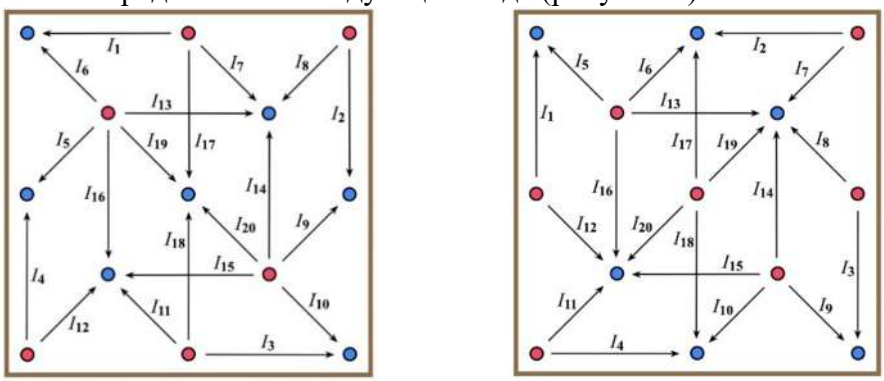
а) б)

Рисунок 4 – Распределение плотности тока при использовании цилиндрических электродов диаметром d=10 мм

а - карта распределения; б - график изменения плотности тока в межэлектродном пространстве

Для разных схем подачи питающего напряжения, представленных ранее, эти зоны будут находиться в разных участках камеры, вследствие чего область с более низкой плотностью тока при одной схеме включения (рисунок 4а – линия 1) будет становиться зоной с более высоким его значением при другой (линия 2). На графике (рисунок 4б) наглядно представлено различие в распределении плотности тока в межэлектродном пространстве для подобных зон камеры, значение которого на некоторых участках достигает 100 – 150 А/м^2. Избыточную плотность тока в приэлектродных зонах можно существенно снизить за счет некоторого увеличения диаметра применяемых электродов.

Исходя из полученной закономерности распределения, а также способа подвода питающего напряжения к электродам установки, направления протекающих через среду токов условно можно представить в следующем виде (рисунок 5):



а) б)

Рисунок 5 – Распределение токов в кормовой смеси при различных вариантах подачи питания на электроды разных групп

Для приведенных моделей распределения токов (рисунок 5а) эквивалентная схема замещения ЭК установки будет представлять собой сложную цепь (рисунок 6а), каждая отдельная ветвь которой будет содержать набор активных и реактивных элементов, образующих комплексный импеданс подобный схеме замещения, представленной на рисунке 1, которая для упрощения визуального восприятия заменена эквивалентным обозначением [2, 5].

При анализе схемы можно заметить, что при данном способе питания, пряняв допущение, что все группы электродов подключаются к одному источнику питания ЭДС,

ветви находятся в параллельном включении. В этом случае схему путем преобразований можно привести к более простому виду, представленному на рисунке 6б [5].

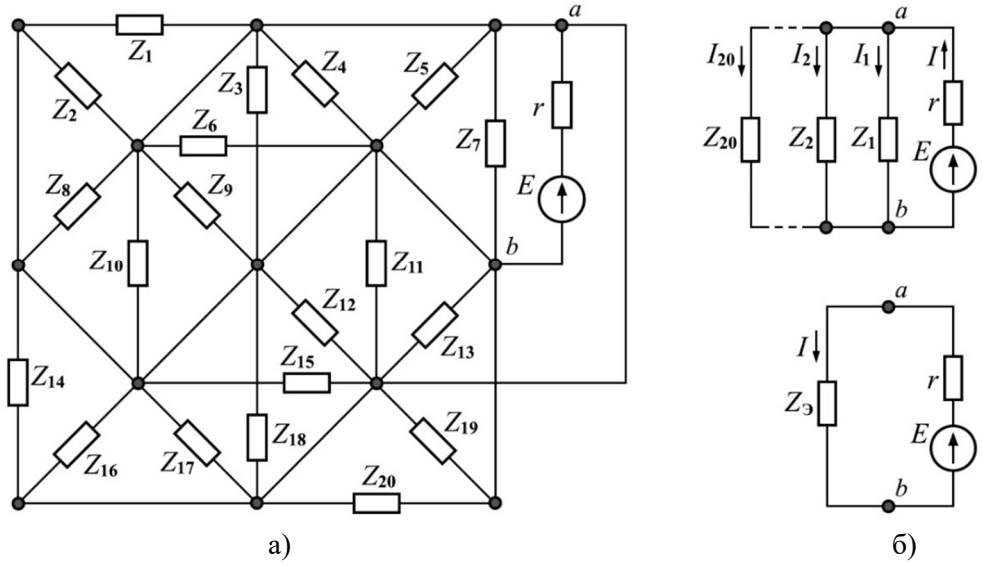


Рисунок 6 - Электрическая схема замещения расположения электродов для камеры прямоугольного сечения (а) и схема замены параллельных ветвей эквивалентной (б)

Z_1 - Z_{20} – комплексные сопротивления ветвей; $Z_э$ – эквивалентное полное сопротивление цепи без учета r – внутреннего сопротивления источника ЭДС E

Полный ток цепи I согласно электрической схемы замещения (рисунок 6б), определяется как [5]:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_{20}, \tag{2}$$

где I_1, I_2, I_3,…, I_{20} – токи в 1-й, 2-й, 3-й,…, 20-й ветвях соответственно, А.

Ток каждой, отдельно взятой ветви, из (2) можно определить по закону Ома для участка цепи:

$$I_n = U_{ab} \cdot y_n, \tag{3}$$

где n – число параллельных ветвей; y_n – электропроводность n-й ветви, См; U_{ab} – разность потенциалов между узлами a и b, В.

На основании закона Ома ток I на участке цепи, содержащей источник ЭДС с внутренним сопротивлением r, будет равен [5]:

$$I = \frac{E - U_{ab}}{r} = \left(E - U_{ab}\right) g_{вн}, \tag{4}$$

где $g_{вн}$ – электропроводность данной ветви, См.

Заменив посредством эквивалентных преобразований параллельные ветви, содержащие сопротивления Z_n, одной эквивалентной ветвью с $Z_э$, получим:

$$I = U_{ab} \cdot \sum_{k=1}^{20} y_k = U_{ab} \cdot y_э, \tag{5}$$

где $y_э$ – эквивалентная комплексная проводимость всей цепи, См, определяемая как:

$$y_э = \frac{1}{Z_э} = \sum_{k=1}^{20} y_k. \tag{6}$$

Для схемы (рисунок 6б) в соответствии с (4) и (5) будет справедливо соотношение:

$$\left(E - U_{ab}\right) g_{вн} = U_{ab} \cdot y_э. \tag{7}$$

Решая равенство (7) относительно U_{ab}, можно получить уравнение вида:

$$U_{ab} = \frac{E \cdot g_{вн}}{y_э + g_{вн}} . \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в равенство (5), получаем искомое значение тока:

$$I = \frac{E \cdot g_{вн} \cdot y_э}{y_э + g_{вн}} . \quad (9)$$

Дальнейший шаг заключается в переходе от комплексной проводимости $y_э$ к удельной электропроводности $\chi_э$. Тогда полученное уравнение (9) даст возможность провести оценку величины тока, потребляемого всей установкой в процессе обеззараживания кормовой смеси, опираясь лишь на на межэлектродные расстояния l_1 и l_2.

Список источников

1. Сторчевой В. Ф., Кабдин Н. Е., Чистова Я. С. Электротехнологии и электрический нагрев / В. Ф. Сторчевой, Н. Е. Кабдин, Я. С. Чистова. – М.: ООО «ИКЦ Колос-с», 2021. – 280 с.
2. Ильгачев А. Н. Разностно-потенциальные коэффициенты ванн многоэлектродных печей резистивного нагрева // Вестник ЧГУ. Естественные науки. – 2006. – №2. – С. 227-235.
3. Халина Т.М., Халин М.В., Дорожкин М.В. Определение активной мощности для электроконтактной технологии обеззараживания кормовых смесей// Вестник АГАУ. – 2020. – №8(190). – С. 119-123.
4. Khalina T. M., Khalin M. V., Dorozhkin M. V. Research and use of the skin effect impact in the technology of disinfection of fodder mixtures by electric contact heating //IJTPPE. – 2021. – Т. 13. – №. 1. – p. 70-74.
5. Лизан И.Я. Теоретические основы электротехники: учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалёва [и др.]. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 628 с.

Дорожкин М.В., заведующий лабораторией кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» ФГБОУ ВО АлтГТУ имени И.И Ползунова, 656038, Российская Федерация, Барнаул, пр-т Ленина, 46 temf@yandex.ru

---

UDC 537.311: 621.365

DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF MULTI-ELECTRODE UNIT FOR ELECTROCONTACT DISINFECTION OF FEED MIXTURES WITH A RECTANGULAR SECTION CHAMBER

M.V. Dorozhkin

Russian Federation, Barnaul, I.I. Polzunov Altai State Technical University

Summary. The article is devoted to the research of electrical parameters of a multielectrode electric contact heating unit with a rectangular section chamber used for disinfection of liquid feed mixtures used in cattle breeding. An equivalent diagram of a two-electrode cell as well as a substitution diagram of a multi-electrode unit are proposed. An algorithm for calculating the main parameters of the electric unit for the proposed electrode arrangement scheme and dielectric cell configuration is given. As a result of modeling physical processes, the maps of current density distribution in the electro-conductive medium of the cross section of the installation chamber were obtained, according to which the current distribution graphs for the interelectrode space of the chamber zones comparable in parameters with different electrode supply schemes were plotted.

Keywords: electrocontact heating, feed disinfection, multi-electrode EC unit, current density distribution, volumetric heating.

Bybliography

1. Storchevoj V. F., Kabdin N. E., Chistova Ya. S. Elektrotekhnologii i elektricheskij nagrev / V. F. Storchevoj, N. E. Kabdin, Ya. S. Chistova. – M.: OOO «IKC Kolos-s», 2021. – 280 s.
2. Il'gachev A. N. Raznostno-potencial'nye koefficienty vann mnogoelektrodnyh pechej rezistivnogo nagreva // Vestnik CHGU. Estestvennye nauki. – 2006. – №2. – S. 227-235.
3. Halina T.M., Halin M.V., Dorozhkin M.V. Opredelenie aktivnoj moshchnosti dlya elektrokontaktnoj tekhnologii obezzarazhivaniya kormovyh smesej// Vestnik AGAU. – 2020. – №8(190). – S. 119-123.

4. Khalina T. M., Khalin M. V., Dorozhkin M. V. Research and use of the skin effect impact in the technology of disinfection of fodder mixtures by electric contact heating // IJTPPE. – 2021. – T. 13. – №. 1. – p. 70-74.
5. Lizan I.Ya. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik / I. Ya. Lizan, K. N. Marenich, I. V. Kovalyova [i dr.]. – Vologda: Infra-Inzheneriya, 2021. – 628 s.

M.V. Dorozhkin, laboratory chief of electric engineering and automatic electric drive department, Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "I.I. Polzunov Altai State Technical University", 656038, Russian Federation, Barnaul, pr. Lenina 46, temf@yandex.ru.

УДК 62-573.2

УСТРОЙСТВО БЕСКОНДЕНСАТОРНОГО ЗАПУСКА ОДНОФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В., Жуков А.А.
Россия, г. Барнаул, Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова (АлтГТУ)

Аннотация. Однофазные асинхронные электродвигатели широко применяются во всех отраслях сельского хозяйства. При этом, используются устаревшие и неэффективные методы пуска двигателя, например, конденсаторный пуск. В статье рассмотрено устройство бесконденсаторного запуска однофазного асинхронного электродвигателя, приведена принципиальная электрическая схема и алгоритм работы.
Ключевые слова: электродвигатель, электропривод, векторно-алгоритмическое управление.

В настоящее время отечественные производители сельскохозяйственной продукции конкурируют не только с местными изготовителями, но также и с крупными международными компаниями. Данное обстоятельство подталкивает российские хозяйства к внедрению новых технологий, оптимизации производственных процессов, увеличению производительности труда. В связи с этим, современное сельскохозяйственное производство характеризуется широкой степенью механизации и автоматизации технологических процессов. Замена ручного труда машинным в различных отраслях хозяйства способствует снижению себестоимости одной отдельно взятой единицы продукции, улучшению условий труда работников и, как следствие, увеличению конкурентоспособности всего предприятия в целом. При этом, значительную часть сельскохозяйственных машин составляют устройства малой мощности, в электроприводе которых используются однофазные асинхронные электродвигатели [1]. К таким механизмам относятся картофелечистки, дробилки, доильные аппараты, насосы, станки для обработки дерева, системы вентиляции и т.д. Применение однофазных асинхронных двигателей обусловлено, в первую очередь, их низкой стоимостью, высокой надежностью, небольшими габаритами и простотой эксплуатации. С целью избежать удорожания конструкции сельскохозяйственных машин и агрегатов, в большинстве случаев, применяется нерегулируемый электропривод без возможности изменения скорости и направления вращения двигателя.

Как правило, маломощные устройства с однофазным электроприводом подключаются напрямую к бытовой однофазной сети. Несмотря на то, что однофазные двигатели способны работать при наличии питания только от одной фазы сети, для их запуска необходимо создание вращающегося магнитного поля в статоре. С этой целью конструкция двигателя предусматривает наличие второй статорной обмотки, на которую подается сдвинутое по фазе относительно первой питающее напряжение. При этом, две обмотки статора располагаются под углом 90° друг относительно друга. Для создания разности фаз применяют конденсаторный запуск двигателя – в цепь питания одной из обмоток включают

© Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В., Жуков А.А., 2022

фазосдвигающий элемент. Данный способ имеет ряд недостатков: большие габариты конденсаторов, а также невозможность изменения направления вращения двигателя [2].

Полупроводниковое устройство (рисунок 1) позволяет осуществлять запуск и работу однофазного асинхронного электродвигателя от однофазной питающей сети, а также изменять направление вращения двигателя [3].

Полупроводниковое устройство содержит два полупроводниковых ключа, в качестве которых могут быть использованы биполярные, IGBT или MOSFET транзисторы. В данном случае используются биполярные транзисторы (VT1-VT2).

Обмотки статора двигателя питаются раздельно. При этом, последовательно с первой статорной обмоткой L1 подключена пара полупроводниковых ключей, а вторая статорная обмотка L2 получает питание напрямую от однофазной сети.

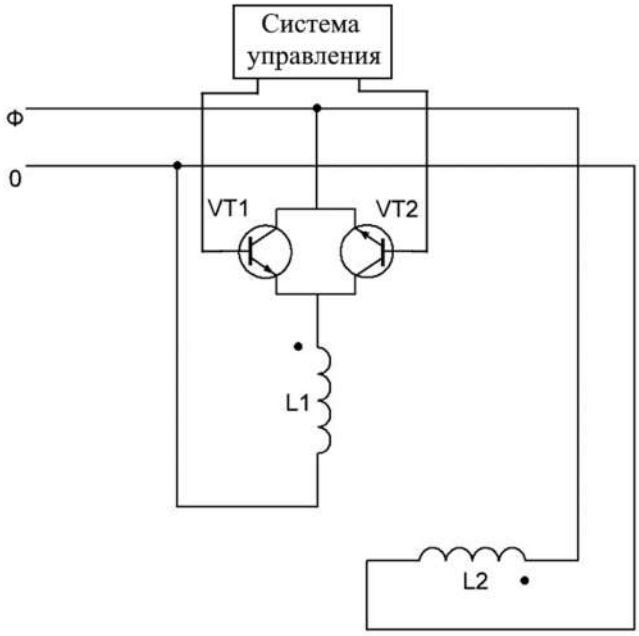


Рисунок 1– Принципиальная схема полупроводникового устройства бесконденсаторного запуска однофазного двигателя

В устройстве транзисторы подключены встречно-параллельно, при этом, один общий вывод подключен к фазе питающей сети, а другой соединен с началом первой обмотки статора. Начало второй обмотки подключено к фазе, а концы статорных обмоток соединены с нулем однофазной питающей сети.

Вращение вектора магнитной индукции поля статора однофазного двигателя при использовании полупроводникового устройства создается путем коммутации полупроводниковых ключей в определенной последовательности. В результате напряжение поступает то к одной, то к двум статорным обмоткам, что создает различные положения вектора магнитного потока поля статора (рисунок 2).

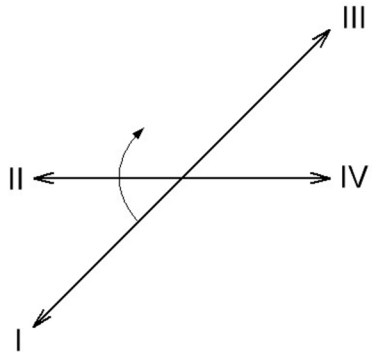


Рисунок 2 – Векторная диаграмма вращения вектора магнитного потока поля статора

Для осуществления вращения вектора магнитного потока поля статора двигателя по часовой стрелке, как показано на рисунке 2, необходимо осуществлять открытие полупроводниковых ключей (VT1-VT2) устройства по следующему алгоритму:

1. в течение первой четверти периода питающего напряжения при прохождении положительной полуволны сигнал открытия подается на первый полупроводниковый ключ VT1, в это время по обеим обмоткам двигателя протекает ток;
2. в течение второй четверти периода питающего напряжения сигналы открытия на полупроводниковые ключи не подаются, а ток протекает только по второй обмотке статора;
3. в течение третьей четверти периода питающего напряжения при прохождении отрицательной полуволны сигнал открытия подается на второй полупроводниковый ключ VT2, в это время по обеим обмоткам двигателя снова протекает ток;

4. в течение четвертой четверти периода питающего напряжения сигналы открытия на полупроводниковые ключи не подаются, а ток снова протекает только по второй обмотке статора.

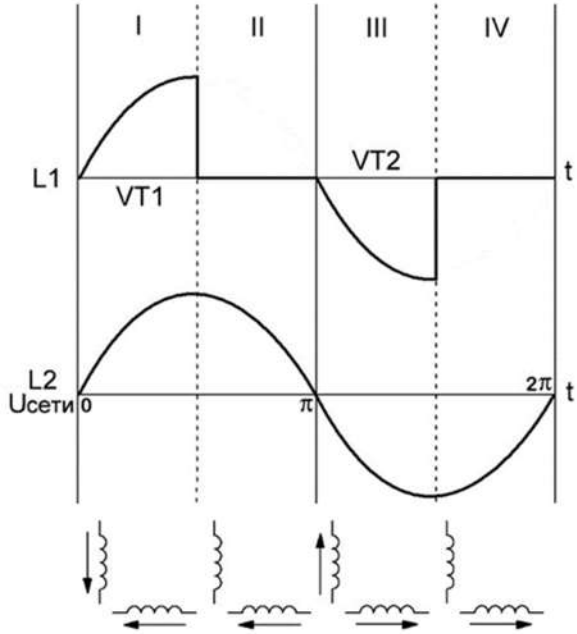


Рисунок 3 – Напряжение на статорных обмотках и направление протекания тока при питании с помощью полупроводникового устройства бесконденсаторного запуска

На рисунке 3 показано поэтапное изменение питающего напряжения в обмотках статора и направление протекания тока при осуществлении описанного выше алгоритма коммутации транзисторов.

Для создания вращения вектора магнитного потока поля статора двигателя в другом направлении, то есть осуществления реверса двигателя, необходимо использовать другой алгоритм открытия полупроводниковых ключей, подробное описание которого можно найти в проектной документации [3].

Список источников

1. Еремочкин, С. Ю. Частотный преобразователь для питания однофазного асинхронного электродвигателя / С. Ю. Еремочкин, Д. В. Дорохов, А. А. Жуков // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. В 10-ти частях, Новосибирск, 06–10 декабря 2021 года / Под редакцией Д.О. Соколовой. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 131-135.

2. Еремочкин, С. Ю. Полупроводниковый преобразователь для запуска трехфазного электродвигателя от однофазной сети / С. Ю. Еремочкин, Д. В. Дорохов // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XV Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2020 года.

3. Полупроводниковое устройство бесконденсаторного запуска однофазного двухобмоточного асинхронного двигателя: пат. 207552 Рос. Федерация. № 2021113982; заявл. 18.05.2021; опубл. 01.11.2021, Бюл. №31.

Еремочкин Сергей Юрьевич, канд. техн. наук кафедры ЭиАЭП АлтГТУ. 656038, Баранул, пр. Ленина д. 46. E-mail: S.Eremochkin@yandex.ru.
Дорохов Данил Валерьевич, студент кафедры ЭиАЭП АлтГТУ. 656038, Баранул, пр. Ленина д. 46. E-mail: danil.dorokhov.2000@mail.ru.
Жуков Алексей Андреевич, студент кафедры ЭиАЭП АлтГТУ. 656038, Баранул, пр. Ленина д. 46. E-mail: zh_astu@mail.ru.

UDC 62-573.2

DEVICE FOR CAPACITORLESS START OF A SINGLE-PHASE TWO-WINDING INDUCTION MOTOR

Eremochkin S. Yu., Dorokhov D.V., Zhukov A.A.
Russia, Barnaul, Polzunov Altai State Technical University (AltSTU)

Summary. Single-phase asynchronous induction motors are widely used in all branches of agriculture. At the same time, outdated and inefficient methods of starting the engine are used, for example, capacitor start. The article considers a device for a capacitorless start of a single-phase asynchronous electric motor, a circuit diagram and an operation algorithm are given.

Keywords: electrical engineering; simulation modeling, Matlab, Simulink, vector-algorithmic control.

References
1. Eremochkin, S. YU. Dorokhov D.V., Zhukov A.A. Chastotnyj preobrazovatel' dlya pitaniya odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya / Nauka. Tekhnologii. Innovacii : Sbornik nauchnyh trudov XV Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, posvyashchennoj Godu nauki i tekhnologij v Rossii. V 10-ti chastyah, Novosibirsk, 06–10 dekabrya 2021 goda / Pod redakciej D.O. Sokolovoj. – Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. – S. 131-135.
2. Eremochkin, S. YU., Dorokhov D.V. Poluprovodnikovyj preobrazovatel' dlya zapuska trekhfaznogo elektrodvigatelya ot odnofaznoj seti / Avtomatizaciya i energosberezhenie v mashinostroenii, energetike i na transporte : materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Vologda, 08 December 2020.
3. Poluprovodnikovoe ustrojstvo beskondensatornogo zapuska odnofaznogo dvuhobmotochnogo asinhronnogo dvigatelya: pat. 207552 Ros. Federaciya. № 2021113982; zayavl. 18.05.2021; opubl. 01.11.2021, Byul. №31.

Eremochkin Sergey Yurievich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Polzunov Altai State Technical University, Lenin Avenue, 46, 656038, Barnaul, Russia. E-mail: S.Eremochkin@yandex.ru.
Dorokhov Danil Valeryevich, student, Polzunov Altai State Technical University, Lenin Avenue, 46, Barnaul, Russia. E-mail: danil.dorokhov.2000@mail.ru.
Zhukov Alexey Andreevich, student, Polzunov Altai State Technical University, Lenin Avenue, 46, Barnaul, Russia. E-mail: zh_astu@mail.ru.

УДК 62-1

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ГОРОДАХ И РЕГИОНАХ РОССИИ

Попова М.В., Волков Д.А.
Россия, Московская обл., Российский Государственный Аграрный Заочный Университет (РГАЗУ)

Аннотация. В наши дни тема электрификации регионов России выступает одной из самых важных. Происходит это из-за большого потребления человеком электроэнергии. Многие традиционные источники энергии исчерпаемы, поэтому некоторые отрасли сегодняшней науки изучают способ получения энергии из возобновляемых ресурсов. В статье рассмотрены возможности применения отопительной системы с использованием солнечной энергии, использование которой способно снизить потребление традиционных ресурсов. В данной статье приводятся графики годовых колебаний усредненного общего излучения в разных городах Земли, схемы строения и работы коллекторов, а также изучаются продукты производства SolarFox, применяемые для получения тепла при помощи энергии Солнца.[1]
Ключевые слова: солнце, энергия, коллекторы, отопление, гелиоустановки.

Солнце является основополагающим всего живого на Земле, а также его можно использовать как очень хороший производитель энергии. Энергия, которую излучает Солнце, примерно в десять тысяч раз превосходит всемирную необходимость в энергии. Говоря о нашем времени, энергия солнца используется, но не в таком масштабе, как могла бы. Наибольшая мощность солнечного излучения является тысячей ватт на один квадратный метр.

Таблица 1 – Солнечное излучение

Ясное небо	Переменная облачность	Солнце в виде белого диска	Пасмурный день
1.000 Вт/кв. м	600 Вт/кв. м	300 Вт/кв. м	100 Вт/кв. м

Глобальная радиация – общая мощность излучения – это сумма прямого и рассеянного излучения. Солнечные установки, которые производятся сейчас, спроектированы на разные виды излучения, поэтому очень важно уметь отличать данные

© Попова М.В., Волков Д.А., 2022

излучения. [2]

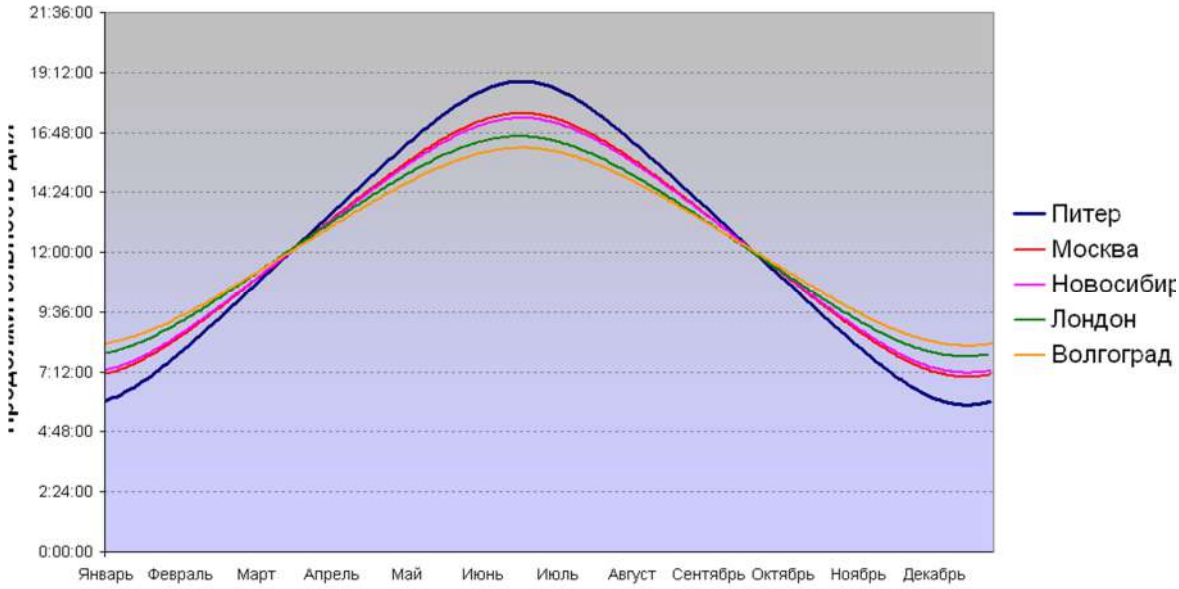


Рисунок 1 – График годовых колебаний усредненного общего излучения в разных городах России и Англии

Энергетика в сельском хозяйстве дала хорошую возможность увеличить производительность агропромышленного комплекса в краткие сроки. Однако, есть многообразие проблем, с которыми энергетика в нынешнее время может столкнуться. Эти проблемы решаемы только со стороны властей и руководства предприятий. В достаточно частых случаях данные проблемы представляют собой: высокий процент износа оборудования, зависимость от топливно-энергетических ресурсов с их дефицитом, а также постоянный рост цен на топливо. Этот перечень проблем обычно сказывается на стоимости производства. Беря это во внимание, можно сказать, что энергетика в сельском хозяйстве на сегодняшний день претерпевает определенные убытки. Правительство Российской Федерации ведет разработку специальных программ по развитию энергосбережения в агропромышленном комплексе страны, которые направлены на развитие отрасли. Развитие энергетики в сельском хозяйстве предопределяется примерно такими задачами:

- проусовершенствовать имеющиеся системы электроснабжения или перейти на адаптивные системы;
- минимизировать процент износа электрических сетей;
- снизить потери энергии и эксплуатационные затраты;
- задействовать интеллектуальные электрические сети, если такой вариант возможен.

Различные объекты сельского хозяйства активно внедряют новые технологии по энергосбережению. Это делается для решения некоторых проблем. В частности, прибегают к более часто использовать энергосберегающие лампы, малоэнергозатратные технологии или совмещают топливные источники.[3]

Энергетике в сельском хозяйстве нужен частичный переход на альтернативные источники энергии. Это внесет определенный вклад в проблему с энергосбережению, а также решит вопросы с перебоями в электропитании, не говоря уже о решении экологических проблем абсолютно разного характера.

Насыщенность солнечного излучения в средней полосе России больше, чем в ряде стран Европы, например, чем в Германии. Эта страна давно занимается исследованием способов освоения и использования солнечной энергии. Из-за достаточно большой площади России, не всегда удается подвести электричество к каким-либо отдаленным объектам. Данный факт повышает желание использовать автономные электростанции – коллекторы или источники аварийного бесперебойного энергосбережения, которые подпитывают солнечной энергией. Это желание все более увеличивается, особенно учитывая постоянность

снижения цен на солнечные элементы, производство которых происходит в некоторых регионах России.[3]

Нередко изобилие солнечного излучения и малая доступность других источников энергии экономически оправдывают использование солнечной энергетики. Акутальность и новизна – именно эти факторы возобновляемых источников электроэнергии и привлекают людей. Именно поэтому солнечные коллекторы все чаще могут встречаться и в средней полосе России.

Системы активного солнечного теплоснабжения различают по двум видам:

- с жидкостным теплоносителем;
- с воздушным теплоносителем.

Системы с жидкостным теплоносителем греют воду или антифриз в «жидкостном» коллекторе. В системах с воздушным теплоносителем в коллекторе греется воздух. Обе эти системы улавливают солнечное тепло либо внутрь помещения, либо в накопительную систему, из которой осуществляется распределение тепла по помещению. Также используют дополнительные обогревательные системы в тех случаях, когда система солнечного нагрева не дает достаточного тепла в помещение. Коллектор на жидком носителе выбирается когда тепло перед подачей какое-то время аккумулируется в накопителе. Кроме того, этот вариант солнечного отопления отлично подходит для систем лучистого отопления, бойлеров и радиатороводяного отопления. Как жидкостная, так и воздушная системы дополняют принудительные системы отопления и охлаждения.[2]

Солнечные воздушные коллекторы - это приборы, работающие на энергии Солнца и нагревающие воздух. В наиболее частых случаях солнечные воздушные коллекторы являют под собой простые плоские коллекторы, которые используются в основном для отопления помещений, сушки сельскохозяйственной продукции. Воздух (он же – теплоноситель) проходит через поглотитель благодаря естественной конвекции или под воздействием вентилятора. Так как воздух хуже проводит тепло, чем жидкость, он передаёт поглотителю меньше тепла, чем жидкий теплоноситель.

Преимущества воздуха, как теплоносителя:

- воздух не подвержен замерзанию и закипанию;
- воздух не обладает токсичностью;[4]
- воздух не надо наделять какими-то особыми качествами, он всегда доступен.

В солнечных воздухонагревателях разного вида к поглощающей пластине присоединены вентиляторы. Они увеличивают турбулентность воздуха и улучшают его теплопередачу. Не смотря на это, данная конструкция также имеет некоторые минусы, например, расход энергии на работу вентиляторов – из-за этого увеличиваются затраты на эксплуатацию системы. В холодном климате воздух направляется в промежуток между пластиной-поглотителем и утеплённой задней стенкой коллектора: таким образом избегаются потери тепла сквозь остекление. Если воздух нагревается не более, чем на 17 °C выше температуры наружного воздуха, то теплоноситель может циркулировать по обе стороны от пластины-поглотителя без больших потерь эффективности.

Из основных плюсов воздушных коллекторов можно отметить их простоту и надежность. Эти коллекторы обладают очень несложным устройством и достаточно простым управлением. При надлежащем уходе качественный коллектор может прослужить 10-20 лет. Теплообменник не требуется, так как воздух не замерзает.

Вариантом снижения стоимости коллекторов можно считать их интеграцию в стены или крыши зданий, а также создание коллекторов, которые можно будет собирать из готовых сборных компонентов.

Коллекторы нужны для обогрева помещений в условиях достаточной солнечной освещенности и при отсутствии других источников энергии, например, газ, электричество, жидкое или твердое топливо. Нельзя ставить коллекторы как основную систему отопления, ведь они не обеспечивают постоянных характеристик как в течение суток, так и при смене

сезонов года. Однако, эта система сможет быть интегрирована в любую существующую систему отопления и вентиляции.

Люди достаточно часто используют воздушные солнечные коллекторы в системах воздушного отопления как жилых зданий, так и подвалов, хранилищ, гаражей и других каких-либо сооружений. В каких именно странах воздушные гелиоустановки применяются наиболее широко, говорит диаграмма.

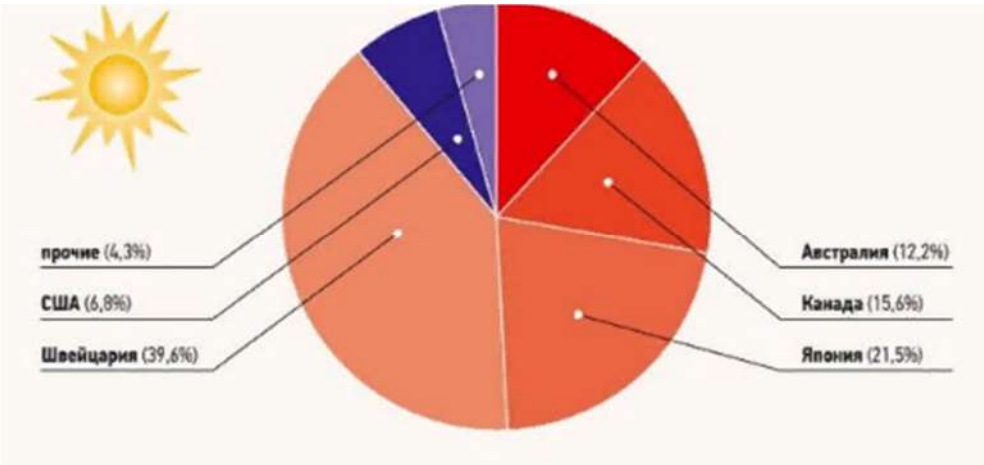


Рисунок 2 – Применение гелиоустановок странами мира

Наиболее экономически развитые страны не пренебрегают возможностями Солнца по нагреву воздуха. Россия на данной диаграмме пока что входит в число многих 4,3% стран.

Солнечный воздушный коллектор состоит из нескольких основных частей:

Рисунок 3 – Принципиальная схема солнечного воздушного коллектора

Корпус, в который помещен сам коллектор и его конструктивные элементы имеет герметичный корпус, обладающий повышенной прочностью и оснащен тепловым изолятором. Благодаря теплоизоляторутепло, которое попадает внутрь изолятора, не просачиваться наружу. Самой важной деталью коллекторяявляетсясолнцеприемная панель, представляющая из себя поглотитель или абсорбер. Солнечная энергия, поглощенная панелью, передается воздуху, благодаря использованию материала, обладающему наибольшей теплопроводимостью. Основными материалами для производства поглотителей являются алюминий, медь,а иногда и сталь. Для наибольшей теплоотдачи нижний слой

поглотителя имеет максимально большую площадь. Эта поверхность этой детали может быть сконструирована в виде разных форм – волнообразных или ребристых. Сам приемник окрашен в темные матовые тона для увеличения коэффициента поглощения солнечной радиации. Поверхностный слой коллектора герметично закрытпрозрачной изоляцией,выполненной и закаленного стекла, оргстекла или поликарбонатного стекла.

Установка коллектора должна быть ориентирована на южную часть света под определённым углом, позволяющим солнечным лучам максимально приходить на поверхность установки, получая максимальную инсоляцию коллектора. Холодный наружный воздух, попадая естественно или принудительно в приемную часть, проходя через ребра поглотителя нагревается и поступает внутрь отапливаемого помещения.

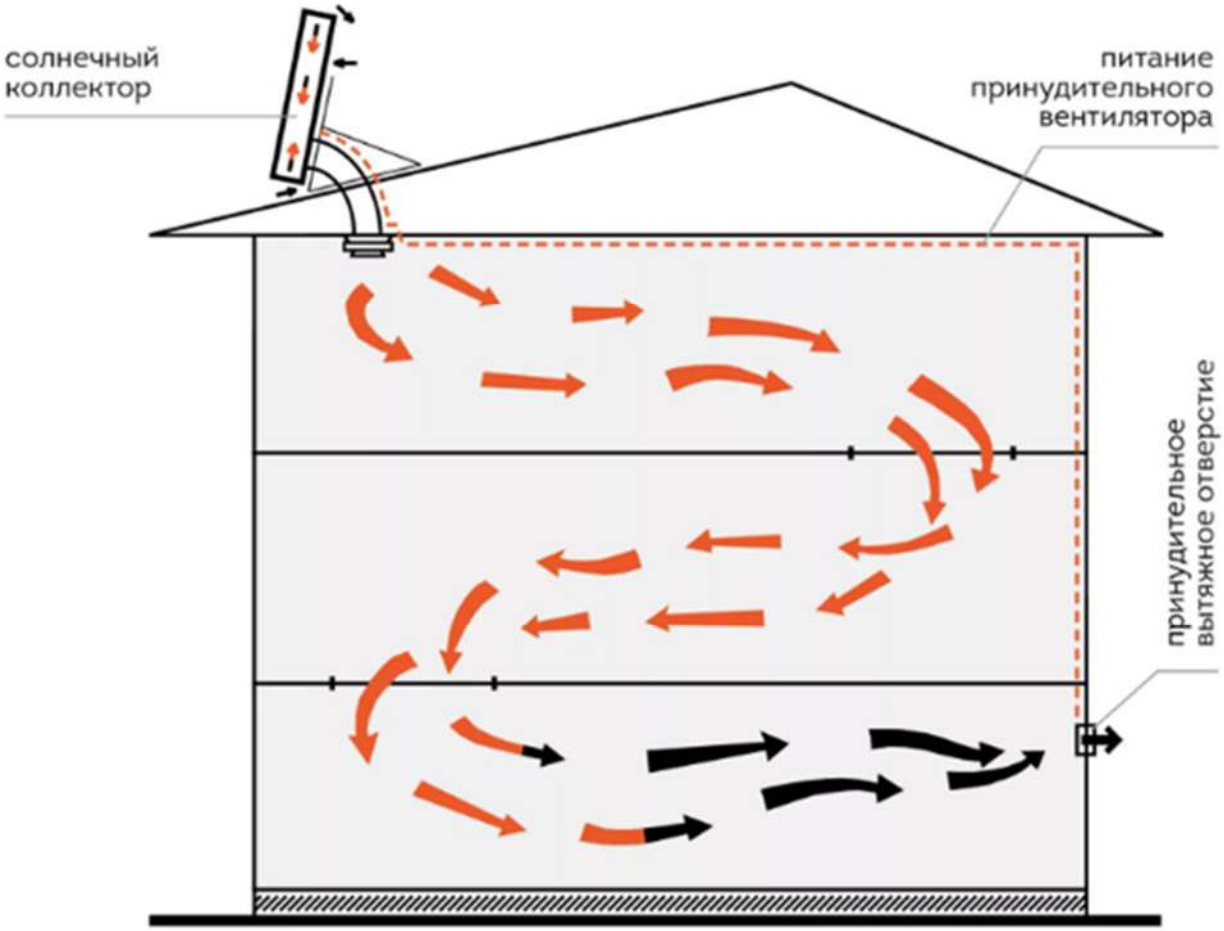


Рисунок 4 – Пример установки и работы солнечного воздушного коллектора

Основное отопление только путем использования воздушных солнечных коллекторов не представляется возможным в нашей климатической зоне, но оно будет служить достаточно хорошей поддержкой даже в морозные зимние солнечные дни.[5]

Для отопления и вентиляции помещений хорошо подходит воздушный солнечный коллекторSolarFox. Данное оборудование производится в России, учитывая географические, климатические и социальные особенности страны. Коллекторы SolarFox производятся молодой стремительно развивающейся фирмой, имеющей свои собственные запатентованные технологии, по доступной цене и достаточно простым способы установки оборудования. Эта фирма имеет покупателей также за пределами страны, что свидетельствует о высоком качестве изготавливаемого оборудования.

Рисунок 4 – Вентиляция помещения с использованием воздушного солнечного коллектора фирмы SolarFox

Рисунок 5 – Отопление помещения с использованием воздушного солнечного коллектора фирмы SolarFox

Воздушные солнечные коллекторы фирмы SolarFoxнашли обширное применение и имеют ряд дополнительных функций, представленных на следующем рисунке:

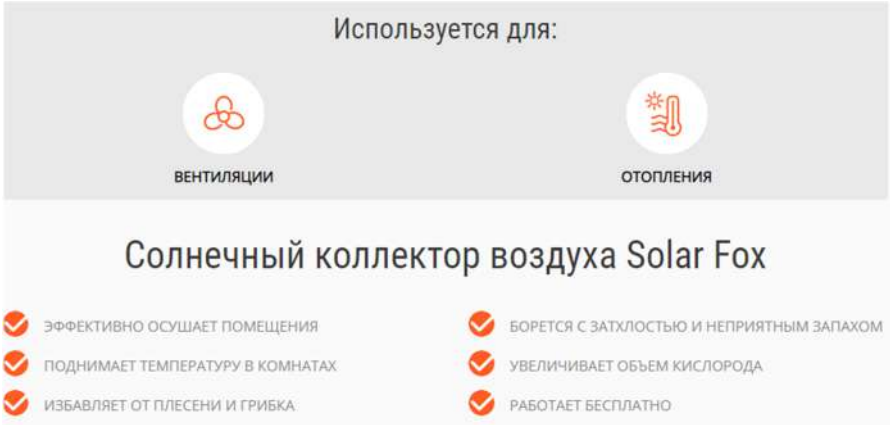


Рисунок 6 – Применение воздушного солнечного коллектора фирмы SolarFox

Еще одно преимущество данного солнечного коллекторазаключаются в двух возможных вариантах установки, в то время как имеющиеся в мире воздушные коллекторы имеют только один. Это режим отопления и режим вентиляции. В обоих случаях температура входящего воздуха будет увеличиватьсяна 15-45 градусов, в зависимости от размера модели. Однако, назначение у этих режимов разнится.

Работа коллектора в режиме вентиляции может быть использована для помещений домов с повышенной влажностью и отсутствиемнеобходимого воздухообмена. Это могут быть подвалы, гаражи, теневые стороны зданий и тд..

Если установить систему SolarFox в режиме вентиляции, то поступление воздуха производится через одно выходное отверстие.Соответственно, циркуляционный режим является наиболее приемлимым, а также позволяет снизить расходы на отопление. Площадь помещения, прогреваемая коллектором от 15 до 150 квадратных метров. Дополнительную очистку воздуха производит сменный фильтр, идущий в комплекте с оборудованием. Фильтр достаточно прост в установке и не менее проств обслуживании и уходе. В стене сооружения расположены два отверстия, которые осуществляют подачу и забор воздуха.

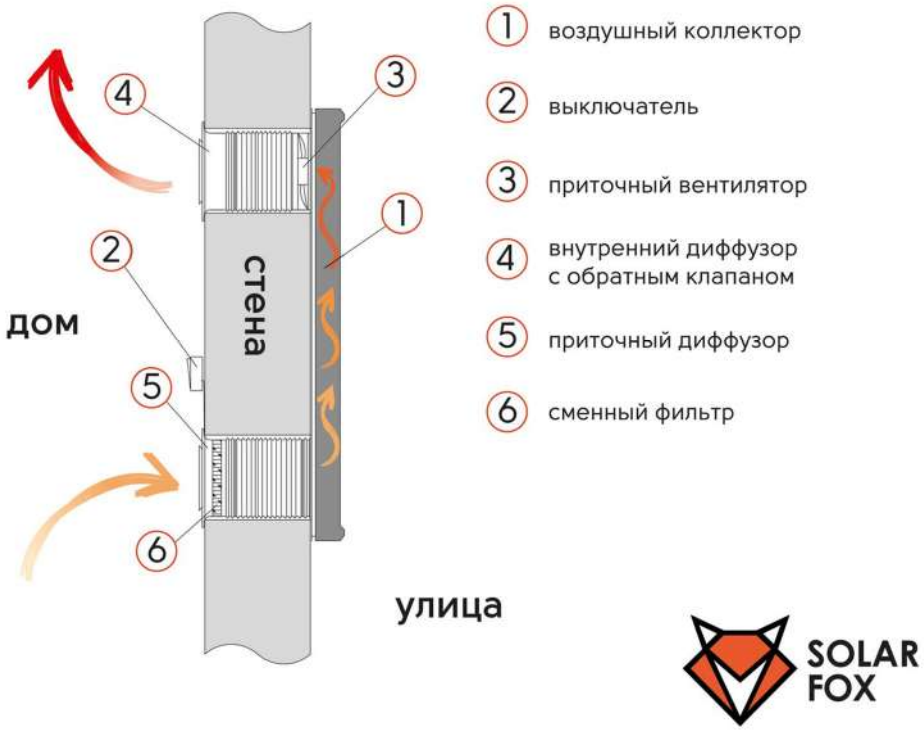


Рисунок 7 – Работа вентиляционного режима

SolarFox предназначен для отопления и вентиляции помещений, но сами устройства солнечной вентиляции и солнечного отопления имеют отличия в принципе работы и специфике монтажа.

Гелиоколлектор при попадании солнечных лучей на поверхность воздушного солнечного коллектора, нагревается. Запуск вентилятора осуществляется под действием тока, возникающем на поверхности солнечной панели. Воздух из помещения поступает через входные отверстия в коллектор. Затем воздух прогревается вгелиоколлекторе, с увеличением температуры на 10-40ºС. Вентилятор нагнетает прогретый воздух в помещение. Холодный воздух, отводимый через естественные зазоры или вытяжное отверстие, вытесняется прогретыми воздушными массами. Если отопление в помещении не требуется, то устройство можно выключить при помощи механического выключателя. Обратный клапан, входящий в комплектацию коллектора, не позволяет теплым воздушным массам покидать помещение. От рекомендаций по размещению устройства зависит работа приборов солнечного отопления. При выборе места расположения необходимо учитывать количество падающей тени. Оптимальным положением для крепления коллектора является южная стена. Можно монтировать установку на юго-восточной или юго-западной стороне. Рекомендуется горизонтальное расположение коллектора, но иногда возможно и вертикальное размещение устройства.[6]

Нагрев гелиоприемника осуществляется путем попадания солнечных лучей на лицевую поверхность коллектора. Солнечная панель начинает вырабатыватьток,включаяпри этом вентилятор, забирающий воздух снаружи через специальное отверстие. Фильтр, установленный внутри коллектора, дополнительно очищает воздух. Прогретый в гелиоприемнике воздух нагнетается внутрь помещения. Возникающая принудительная циркуляция воздушных масс в помещениях позволяет удалять углекислый газ через естественные щели или специально предусмотренное выходное отверстие. Крепление воздушного коллектора может быть размещено на стене или крыше. Сама схема крепления выбирается, руководствуясь характеристиками объекта и пожеланиями клиента.

Выбор воздушного солнечного коллектораосуществляется, ориентируясь на цели клиента и площадьпомещения. Многообразие отопительных и вентиляционных моделей дает возможность найти эффективное решение как для жилых построек, так и для хозяйственных объектов [8]

Воздушные солнечные коллекторы достаточно просты и понятны в испольовании, а также они могут заменять традиционное электрическое оборудование, например, кондиционеры, конвекторы и различные осушители воздуха. Коллекторы позволяют решитьтакие вопросы, как установление в помещении здорового микроклимата и создание дополнительного отопления. Полноценный воздухообмен и вентилирование – это постоянный приток свежего, чистого и теплого воздуха вместе с удалением углекислого газа, неприятных запахов и застоявшихся воздушных масс.

Эффективность работы солнечного коллектора обусловлена количеством солнечных дней в году, поэтому чем выше инсоляция региона, тем эффективнее будет работать солнечный воздушный коллектор.

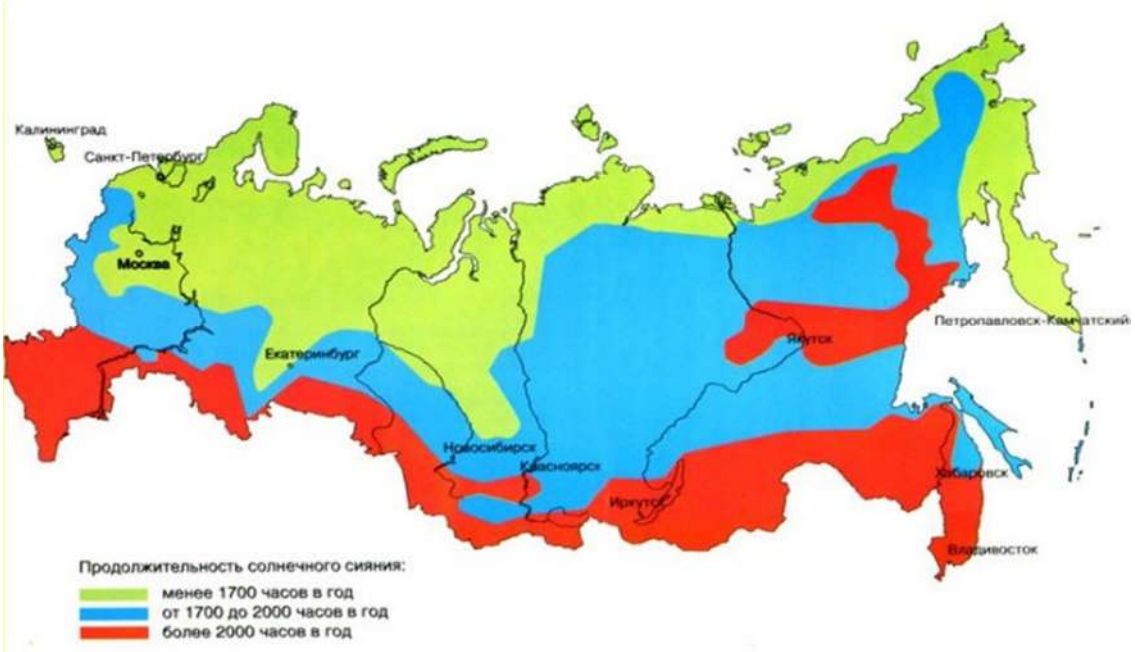


Рисунок 8 – Продолжительность солнечного сияния в Российской Федерации

Выводы

Оборудование производится в России, в городе Санкт-Петербург, что уже означает импортозамещение и поддержка отечественного производителя. Фирма обеспечивает удобную доставку оборудования по всей территории Российской Федерации. Так же оборудование имеет очень простую установку и позволяет самостоятельно осуществить монтаж. [8] Сегодня солнечная энергетика широко применима в тех случаях, когда другие источники энергии малодоступны, но при этом присутствует изобилие солнечного излучения. Возобновляемые источники электроэнергии привлекают людей актуальностью и новизной, а желание использовать более экологические способы отопления, освещения и нагрева воды чаще всего заставляют обращаться к гелиоустановкам. Таким образом, солнечные коллекторы все чаще можно встретить и в средней полосе России.

Список источников

1. А.С. Петренко. Альтернативная и возобновляемая энергетика. [Электронный ресурс] / А.С. Петренко, М.Н. Романенко. Zeleneet – 2011. Режим доступа: http://zeleneet.com/poluchenie-bodoroda-bodorodnaya-energetika/24132/

2. Солнце, как источник энергии [Электронный ресурс]StudFiles/ Петрозаводский Государственный Университет/ . Режим доступа: https://studfile.net/preview/3829346/#2

3. Энергетика в сельском хозяйстве. [Электронный ресурс] Новости энергетики/ . Режим доступа:https://novostienergetiki.ru/energetika-v-selskom-xozyajstve/
4. Как сделать солнечный коллектор[Электронный ресурс] Арболит. Режим доступа:https://arbolit.org/tehnologii/kak-sdelat-solnechnyy-kollektor-2.html
5. Вакуумный солнечный коллектор [Электронный ресурс] РулонДел. Режим доступа:Источник: https://rulandia.ru/communications/electrical-and-lighting/princip-raboty-vakuumnogo-solnecnogo-kollektora-s-trubkami.html
6. Принцип работы водушого солнечного коллектора. [Электронный ресурс] SolarFox/ Режим доступа:https://solarfox-energy.com/podderzhka/princip-deystviya-kollektora/
7. Оценка возможности применения альтернативной энергетики для получения водорода в условиях центральной России. Попова М.В., Закабунин А.V.В сборнике: Глобальные вызовы для продовольственной безопасности: риски и возможности. Научные труды международной научно-практической конференции. Казань, 2021. С. 420-425.
8. Применение коллекторных установок для обогрева сельскохозяйственных объектов.Попова М.В., Струков А.Н., Волков Д.А. Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2020. № 35 (40). С. 70-73.

Попова Мария Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудование электротехнических систем, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный заочный университет, г. Балашиха, ул. Юлиуса Фучика, 1 к1а, 143900. Email: a-040506@yandex.ru , тел.: +7(916)3180877
Волков Дмитрий Алексеевич, студент бакалавриата, 4 курс кафедры электрооборудование электротехнических систем, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный заочный университет, г. Балашиха, ул. Юлиуса Фучика, 1 к1а, 143900. Email: radiantbrood@gmail.com , тел.: +7(966)3253225

UDC 62-1

POSSIBILITY OF APPLICATION OF SOLAR ENERGY IN CITIES AND REGIONS OF RUSSIA

Popova M.V., Volkov D.A.
Russia, Moscow region, Russian State Agrarian Correspondence University

Summary. Nowadays, the topic of electrification of Russian regions is one of the most important. This is due to the high human consumption of electricity. Many traditional sources of energy are exhaustible, so some branches of today's science are studying a way to get energy from renewable resources. The article considers the possibility of using a heating system using solar energy, the use of which can reduce the consumption of traditional resources. This article provides graphs of annual fluctuations in the average total radiation in different cities of the Earth, diagrams of the structure and operation of collectors, and also studies SolarFox products used to generate heat using solar energy.
Keywords: sun, energy, collectors, heating, solar plants.

References

1. A.S. Petrenko. Alternative and renewable energy. [Electronic resource] / A.S. Petrenko, M.N. Romanenko. Zeleneet - 2011. Access mode: http://zeleneet.com/poluchenie-vodoroda-vodorodnaya-energetika/24132/
2. The sun as a source of energy [Electronic resource] StudFiles / Petrozavodsk State University /. Access mode: https://studfile.net/preview/3829346/#2
3. Energy in agriculture. [Electronic resource] Energy news / . Access mode: https://novostienergetiki.ru/energetika-v-selskom-xozyajstve/
4. How to make a solar collector [Electronic resource] Arbolit. Access mode: https://arbolit.org/tehnologii/kak-sdelat-solnechnyy-kollektor-2.html
5. Vacuum solar collector [Electronic resource] RollDel. Access mode: Source: https://rulandia.ru/communications/electrical-and-lighting/princip-raboty-vacuumnogo-solnecnogo-kollektora-s-trubkami.html
6. The principle of operation of a water solar collector. [Electronic resource] SolarFox/ Access mode: https://solarfox-energy.com/podderzhka/princip-deystviya-kollektora/

7. Evaluation of the possibility of using alternative energy to produce hydrogen in the conditions of central Russia. Popova M.V., Zakabunin A.V. In the collection: Global Challenges for Food Security: Risks and Opportunities. Scientific works of the international scientific-practical conference. Kazan, 2021, pp. 420-425.
8. The use of collector installations for heating agricultural facilities. Popova M.V., Strukov A.N., Volkov D.A. Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University. 2020. No. 35 (40). pp. 70-73.

Popova Maria Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment of Electrical Systems, FSBEI HE Russian State Agrarian Correspondence University, Balashikha, st. Julius Fuchik, 1 k1a, Email: a-040506@yandex.ru , tel.: +7(916)3180877.
Volkov Dmitry Alekseevich, undergraduate student, 4th year student of the Department of Electrical Equipment for Electrotechnical Systems, FSBEI HE Russian State Agrarian Correspondence University, Balashikha, st. Julius Fuchik, 1 k1a, 143900. Email: radiantbrood@gmail.com, tel.: +7(966)3253225.

СЕКЦИЯ 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Руководитель:
Поляков Роман Николаевич, д-р. техн. наук, доцент, зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

УДК 621.45.038.72

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ РАЗНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СЛОЕВ ДЛЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН ГТД

Настепанин К.К., Стебаков И.Н., Родичев А.Ю., Поляков Р.Н.
Россия, г. Орёл, Орловский государственный институт имени И.С. Тургенева

Аннотация. В статье рассмотрен обзор и применение нейронных сетей для диагностики роторных систем при помощи термограмм. На основе проведённых экспериментов выявлена наиболее подходящая нейронная сеть для классификации и предиктивной диагностики роторно-опорного оборудования. Результаты эксперемента позволяют сделать положительный вывод о способе диагностики роторных систем при помощи термограм.
Ключевые слова: термограмма, способ, роторные опоры, тепловизор, измерения, нейронная сеть.

Искусственный интеллект играют важную роль в современной науке. С помощью нейронных сетей можно вычислять невообразимые объёмы данных, что позволяет находить невиданные человеческому глазу отличительные признаки.

После проведения эксперимента по диагностике состояния роторной системы при помощи термограмм было собрано 47 880 изображений, которые разделили на 4 состояния работы системы. Первое – износ подшипника скольжения, второе – вышедшая из строя манжета, третье – сломанный датчик температуры рабочей поверхности и четвёртое – нормальное состояние работы подшипника скольжения.

В статье будет описано решение двух задач анализа полученных изображений при помощи нейронных сетей. Первая - задача классификации, вторая – предиктивного анализа. В решении данных задач будут использоваться две нейронные сети: resNet 18 и resNet 34.

© Настепанин К.К., Стебаков И.Н., Родичев А.Ю., Поляков Р.Н., 2022

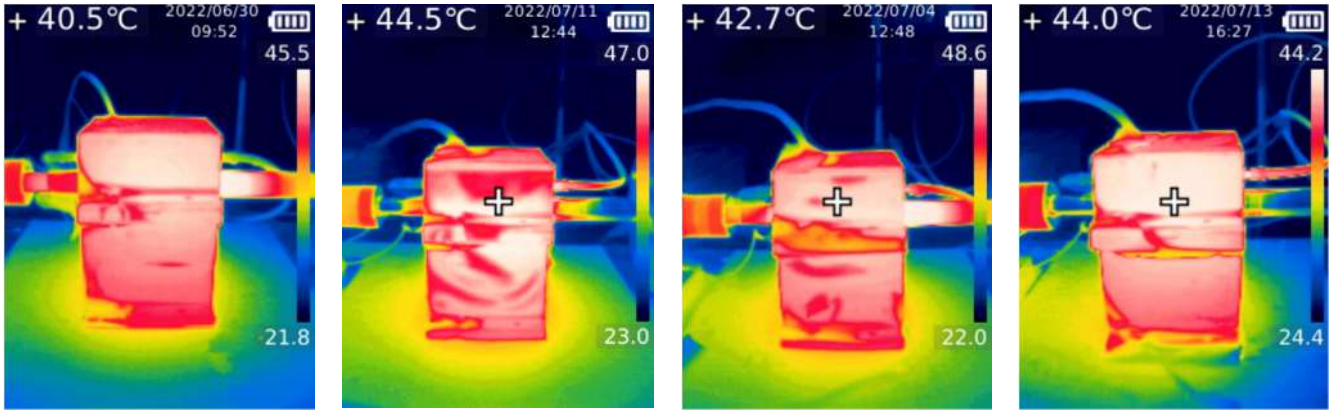
Решением первой задачи будет являться распределение изображений по вышеописанным классам путём обучения сети и проверки на тестовой выборке.

Полученные в ходе эксперимента изображения делятся в случайном порядке на две выборки – учебную (training) и тестовую (test) в отношении 70% на 30%. (рисунок 1)

Рисунок 1 – Деление датасета

В каждой папке находятся отсортированные изображения на четыре состояния системы. (рисунок 2)

При решении двух задач мы будем использовать метод обучения с учителем, который позволяет обучить модель путем определения взаимосвязи между множеством входных данных и целевым набором классов посредствам нахождения весовых коэффициентов, где N – количество примеров. Каждый пример подается на вход ИНС, затем выполняется прямой проход ИНС для получения предсказания, которое сравнивается с целевым значением путем расчета функции потерь.



износ *сломанная манжета* *сломанный датчик* *нормальное состояние*

Рисунок 2 – состояния системы

Для задачи классификации применяется функции потерь Cross entropy loss:

$$L(\Theta) = -\sum_{c=1}^{C}\left(y_c \ln(h_c)\right) \Rightarrow \min,$$

где C – количество классов, h – предсказания ИНС.

Предсказания ИНС представляют собой вектор вероятностей для каждого класса, сумма которых равна 1. Предсказанный класс определяется по максимальные значения предсказаний вероятности. Для получения выходных значений ИНС Применяется функция SoftMax:

$$h(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{c=1}^{C} e^{x_c}}$$

Далее выполняется обратный проход ИНС для минимизации функции потерь методами градиентного спуска путем изменения весовых коэффициентов. Алгоритм работы нейронной сети является итеративным, его шаги называют эпохами или циклами. Эпоха - одна итерация в процессе обучения, включающая обработку всех примеров из обучающего множества и, возможно, проверку качества обучения на контрольном множестве.

За одну эпоху обучающая выборка случайным образом разбивается на пакеты определенного размера (батчи), которые последовательно подаются на вход ИНС. Далее расчитывается функция потерь и выполняется один шаг градиентного спуска. Обучение продолжается до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет приемлемо низкого уровня. При большом количестве эпох возникает переобучение. Переобучение - излишне точное соответствие нейронной сети конкретному набору обучающих примеров, при котором сеть теряет способность к обобщению. Переобучение связано с тем, что выбор обучающего (тренировочного) множества является случайным. С первых шагов обучения происходит уменьшение ошибки. На последующих шагах с целью уменьшения ошибки (целевой функции) параметры подстраиваются под особенности обучающего множества. Однако при этом происходит "подстройка" не под общие закономерности ряда, а под особенности его части - обучающего подмножества. При этом точность прогноза уменьшается. Очень важно отслеживать момент переобучения сети. На рисунке 3 изображена зависимость ошибки от шага обучения.

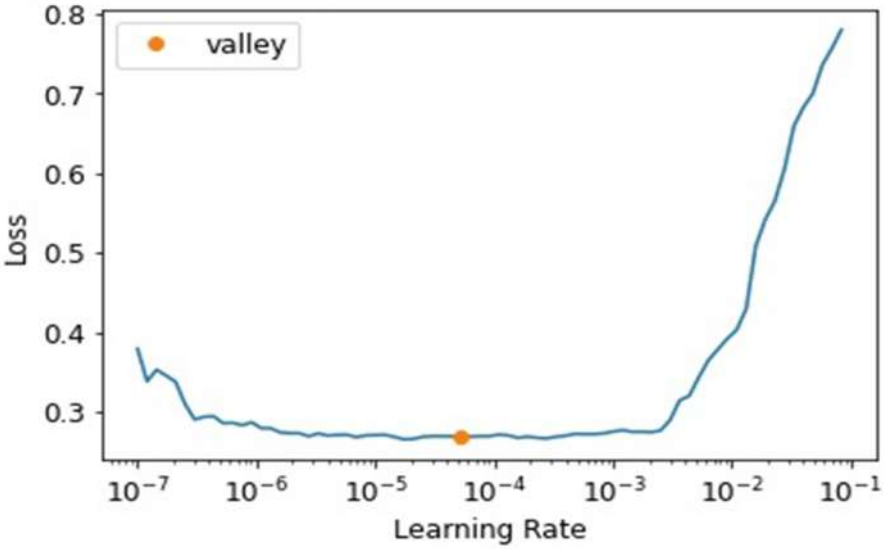


Рисунок 3 – график зависимость ошибки от шага обучения

В данной работе применятся сверточные нейронные сети (СНС). Они сжимают данные интенсивности пикселей и выделяют важные функции. Операция свертки представляет собой полное скалярное произведение фрагментов входного изображения и соответствующего ядра. Компоненты ядра входят в набор сетевых параметров Θ и их значения определяются в процессе обучения. Сверточные слои также используют заполнение нулями (padding) для управления размером вывода и шаг (stride) для уменьшения размерности данных. Количество ядер в сверточном слое определяет количество выходных каналов. После операции свертки также применяются слои пакетной нормализации и функции активации наиболеепопуляроной функцией активации является функция ReLU.

$$h(x) = \begin{cases} x, if\ x \geq 0 \\ 0, if\ x < 0 \end{cases}$$

Одной из известных архитектур СНС является ResNet. Их особенностью является применение соединений быстрого доступа, которые позволяют стабилизировать обучение СНС при увеличении их глубины. Эти соединения пропускают несколько слоев СНС и выполняют суммирование выходов (рисунок 4).

Итогом обучения является обученная модель.

После стадии обучения происходит проверка обученной модели на изображения тестовой выборки, что позволяет проверить сеть на тех изображениях, которые не видела нейронная сеть.

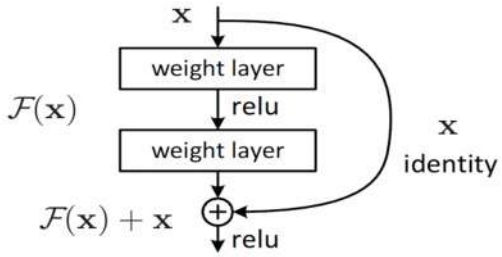
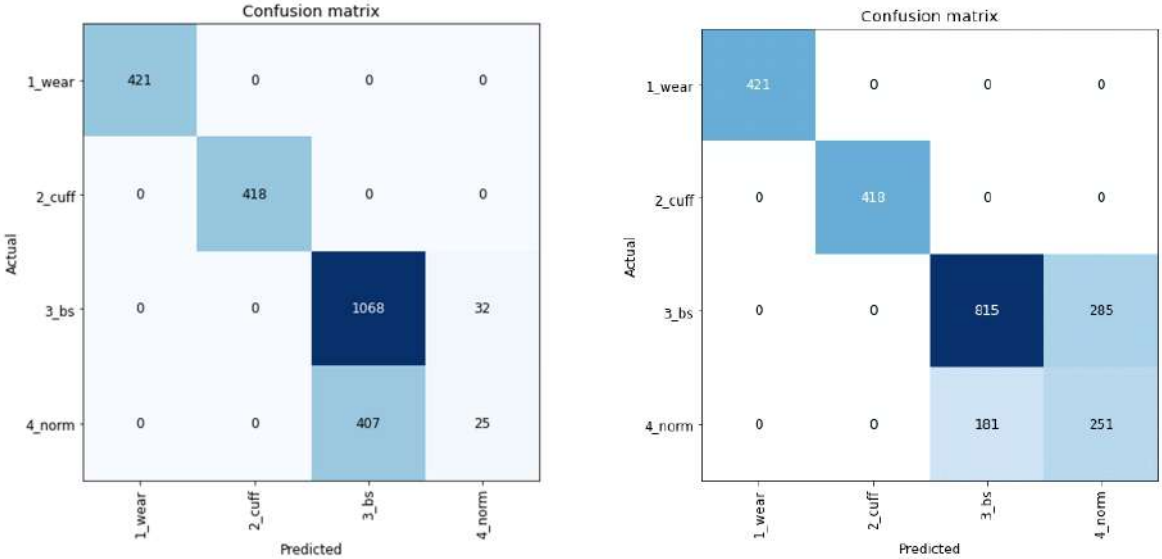


Рисунок 4 – Соединения быстрого доступа



resNet18 *resNet34*

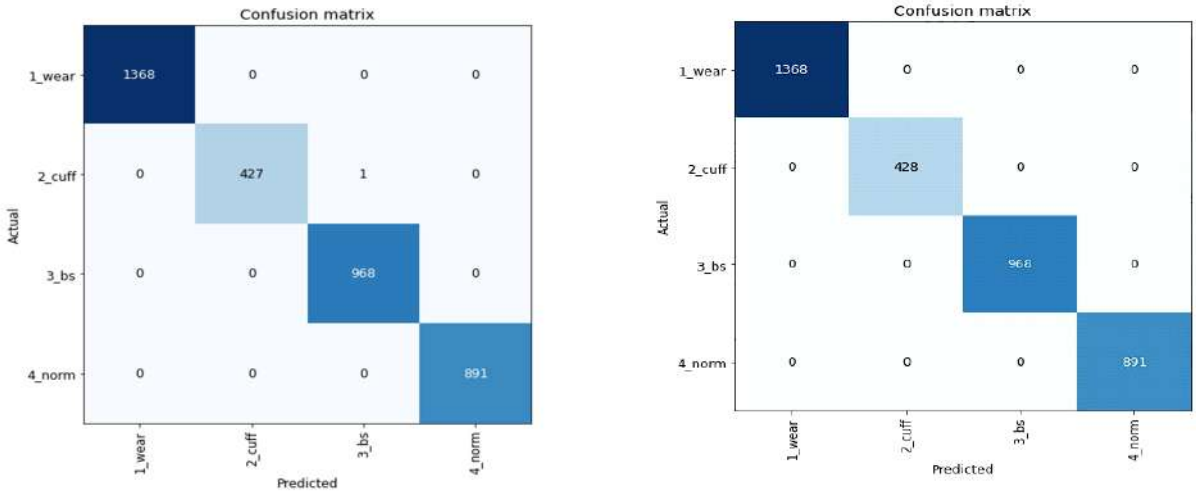
Рисунок 5 - Матрицы ошибок нейронных сетей при решении задачи классификации

Для оценки точности ИНС применятся метрика accuracy, которая представляет собой долю правильных предсказаний из общего числа предсказаний.

Результаты работы нейронных сетей будут занесены в таблицу 1

Таблица 1 – Точность нейронных сетей при решении задачи классификации

	resNet18	resNet34
accuracy	67,5%	59,2%



resNet18 *resNet34*

Рисунок 6 - Матрицы ошибок нейронных сетей при решении задачи предиктивной диагностики

Для решения задачи предиктивной диагностики роторной системы использовался изменённый датасет, состоящий из тех же термограмм, но отсортированных другим способом: 70 % - начиная с самого начала опытов, 30 % - завершающая часть опытов. Используя данный метод, получится заставить нейронную сеть предсказывать состояние роторной системы, что позволит диагностировать дефекты в режиме реального времени.

Матрица ошибок при решении задачи предиктивной диагностики.

При решении задачи предиктивной диагностики использовались те же нейронные сети.

Таблица 2 – Точность нейронных сетей при решении задачи предиктивной диагностики

	resNet18	resNet34
accuracy	54,6 %	52,9%

Выводы

Из полученных результатов можем сделать вывод о том, что в нейронных сетях с меньшим количеством скрытых слоёв ошибка переобучения будет меньше. С увеличением количества эпох обучения точность на тестовой выборке в сетях с меньшим количеством скрытых слоёв будет расти. Из этого можем сделать вывод о том, что нейронные сети способны помочь в диагностике состояний ротоно-опроных узлов.

Список источников

1. Feng Z, Liang M, Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. Mech Syst Signal Process 2013;38 (1):165–205.

2. Li Y, Wang X, Si S, Huang S. Entropy based fault classification using the case western reserve university data: a benchmark study. IEEE Trans Reliab 2019. (2019-03-07)[2019-03-28]. Available from: https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896240.

3. Wang Z, Du W, Wang J, Zhou J, Han X, Zhang Z, et al. Research and application of improved adaptive momeda fault diagnosis method. Measurement 2019;140:63–75.

4. Wang Z, He W, Du W, Zhou J, Han X, Wang J, et al. Application of parameter optimized variational mode decomposition method in fault diagnosis of gearbox. IEEE Access 2019;7:44871–82.

5. Li Y, Wang X, Liu Z, Liang X, Si S. The entropy algorithm and its variants in the fault diagnosis of rotating machinery: a review. IEEE Access 2018;6:66723–41.

6. Zhang C, Harne RL, Li B, Wang K. Statistical quantification of dc power generated by bistable piezoelectric energy harvesters when driven by random excitations. J Sound Vib 2019;442:770–86.

7. Zhang C, Liu Y, Wan F, Chen B, Liu J, Hu B. Multi-faults diagnosis of rolling bearings via adaptive customization of flexible analytical wavelet bases. Chinese J Aeronautics 2019. (2019-03-25) [2019-03-28]. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cja.2019. 03.014.

8. Li Y, Li G, Yang Y, Liang X, Xu MA. fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy. Mech Syst Signal Process 2018;105:319–37.

9. Zhao M, Lin J. Health assessment of rotating machinery using a rotary encoder. IEEE Trans Ind Electron 2017;65(3):2548–56.

Настепанин Кирилл Константинович студент кафедры мехатроники, механики и робототехники ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, E-mail: nastepanin02@mail.ru.

Стебаков Иван Николаевич ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл Младший научный сотрудник ПНИЛ «Интеллектуальные технологии мониторинга и диагностики энергогенерирующего оборудования» E-mail: chester50796@yandex.ru.

Родичев Алексей Юрьевич ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, кандидат техн.наук, доцент кафедры сервиса и ремонта машин E-mail: rodfox@yandex.ru

Поляков Роман Николаевич ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», доктор техн. наук, зав. кафедрой мехатроника, механика и робототехника 302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29 E-mail: romanpolak@mail.ru.

INTEGRATED STUDIES OF RESOURCE-SAVING ELECTRICAL TECHNOLOGY OF APPLICATION OF DIFFERENT HEAT-RESISTANT LAYERS FOR HEAT-STRESSED GTE TURBINE PARTS

Nastepanin K.K., Stebakov I.N., Rodichev A.U., Polyakov R.N.
Russia, Orel, Orel State Institute named after I.S Turgenev

Summary. The article considers an overview and application of neural networks for diagnosing rotary systems using thermograms. On the basis of the experiments carried out, the most suitable neural network for the classification and predictive diagnostics of rotary support equipment was identified. The results of the experiment allow us to draw a positive conclusion about the method for diagnosing rotor systems using thermograms.
Keywords: thermogram, method, rotor bearings, thermal imager, measurements, neural network.

References

1. Feng Z, Liang M, Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. Mech Syst Signal Process 2013;38 (1):165–205.
2. Li Y, Wang X, Si S, Huang S. Entropy based fault classification using the case western reserve university data: a benchmark study. IEEE Trans Reliab 2019. (2019-03-07)[2019-03-28]. Available from: https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896240.
3. Wang Z, Du W, Wang J, Zhou J, Han X, Zhang Z, et al. Research and application of improved adaptive momeda fault diagnosis method. Measurement 2019;140:63–75.
4. Wang Z, He W, Du W, Zhou J, Han X, Wang J, et al. Application of parameter optimized variational mode decomposition method in fault diagnosis of gearbox. IEEE Access 2019;7:44871–82.
5. Li Y, Wang X, Liu Z, Liang X, Si S. The entropy algorithm and its variants in the fault diagnosis of rotating machinery: a review. IEEE Access 2018;6:66723–41.
6. Zhang C, Harne RL, Li B, Wang K. Statistical quantification of dc power generated by bistable piezoelectric energy harvesters when driven by random excitations. J Sound Vib 2019;442:770–86.
7. Zhang C, Liu Y, Wan F, Chen B, Liu J, Hu B. Multi-faults diagnosis of rolling bearings via adaptive customization of flexible analytical wavelet bases. Chinese J Aeronautics 2019. (2019-03-25) [2019-03-28]. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cja.2019. 03.014.
8. Li Y, Li G, Yang Y, Liang X, Xu MA. fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy. Mech Syst Signal Process 2018;105:319–37.
9. Zhao M, Lin J. Health assessment of rotating machinery using a rotary encoder. IEEE Trans Ind Electron 2017;65(3):2548–56.

Nastepanin Kirill Konstantinovich, Orel State University named after I.S. Turgenev, student of department mechatronics, mechanics and robotics, E-mail: nastepanin02@mail.ru.
Stebakov Ivan Nikolaevich, Orel State University named after I.S. Turgenev, Junior Researcher, PNIL "Intelligent technologies for monitoring and diagnostics of power generating equipment", E-mail: chester50796@yandex.ru.
Rodichev Alexey Urevich, Orel State University named after I.S. Turgenev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of service and repair of cars, E-mail: rodfox@yandex.ru.
Polyakov Roman Nikolaevich, Orel State University named after I.S. Turgenev, Doctor of Technical Sciences, associate professor of the department mechatronics, mechanics and robotics, E-mail: romanpolak@mail.ru.

УДК 621.822

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ РЕОМАГНИТНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В., Серебренников А.Д.
Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева

Аннотация. В статье рассматриваются основные области исследований подшипников скольжения. Выделяются тенденции перехода к интеллектуальным системам, а именно к мехатронным устройствам способным управлять эксплуатационными и теплофизическими параметрами роторно-опорной системы. Одним из перспективных способов контроля параметров подшипников является применение реомагнитных жидкостей. В настоящей статье рассматривается классическая конструкция подшипника скольжение с реомагнитной жидкостью.

Ключевые слова: подшипник скольжения, энергоэффективность, смазочный материал, реомагнитная жидкость.

Роторные машины находят применение в областях ракето и самолетостроения, газо и нефтепромышленности, водном и наземном транспорте в виде насосных, компрессорных агрегатов, детандеров, различных приводов и турбинных установок. Необходимость в увеличении производительности таких машин влечет к необходимости достижения более высоких скоростей вращения. при этом увеличение скоростей вращения роторов неизбежно влечет к необходимости проектирования подшипников, способных выдерживать действующие на ротор нагрузки на высоких скоростях без разрушения и нарушения работоспособности машины. Часто использование опор скольжения является безальтернативным ввиду того, что подшипники скольжения, смазываемые жидкими или газообразными средами, обладают практически неограниченной быстроходностью и ресурсом, так как обеспечивают полное разделение трущихся поверхностей.

Параллельное развитие электроники и информационных технологий привело к тому, что стало возможным найти точки их соприкосновения с механикой в мехатронных устройствах. Такие устройства значительно расширяют функционал входящих в него устройств по отдельности и позволяют добиться улучшенных характеристик механического объекта, лежащего в их основе. Так, применительно к опорам роторов такие мехатронные подшипниковые узлы позволяют наряду с функцией автоматизированной диагностики управлять положением ротора в опоре для достижения максимальной устойчивости. В таком случае возможно минимизировать уровень диссипации энергии, происходящей из-за колебаний, которые могут иметь самую различную природу: свободные колебания, являющиеся результатом возникновения внезапной внешней импульсной нагрузки (аэродинамического удара в газопроводе, скачка напряжения статора электродвигателя); вынужденные колебания — появляются вследствие наличия в системе начального дисбаланса (результат неравномерного износа лопаток), температурного изгиба, погрешностей изготовления и сборки [1, 2]. Переменные масса и дисбаланс, зависящие от технологического процесса, являются источниками параметрического возбуждения [3]. Кроме того, с возможностью управлять положением ротора в опорах появляется возможность вывода роторных машин на более энергоэффективный режим работы путем минимизации потерь мощности на трение в oriopax скольжение.

В настоящее время можно выделить следующие основные области исследований подшипников скольжения (рис. 1), целью которых является улучшение их статических и динамических характеристик: микротекстурирование опорных поверхностей и профилирование каналов подачи смазочного материала [4], использование подвижных элементов в качестве опорных поверхностей [5], внедрение мехатронных технологий и интеллектуального управления в подшипниковые узлы [6] и использование смазочных

© Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В., Серебренников А.Д., 2022

материалов с улучшенными реологическими свойствами.

Рисунок 1 – Основные области исследований подшипников скольжения

Внедрение мехатронных технологий в подшипниковые узлы началось с применения магнитов в так называемых активных магнитных опорах (рис. 2). Принцип работы таких опор заключается в магнитной левитации ротора в статоре, что делает опору бесконтактной. Преимуществами такого типа опор являются высокая износостойкость, возможность функционирования в агрессивных сренах и при низких температурах.

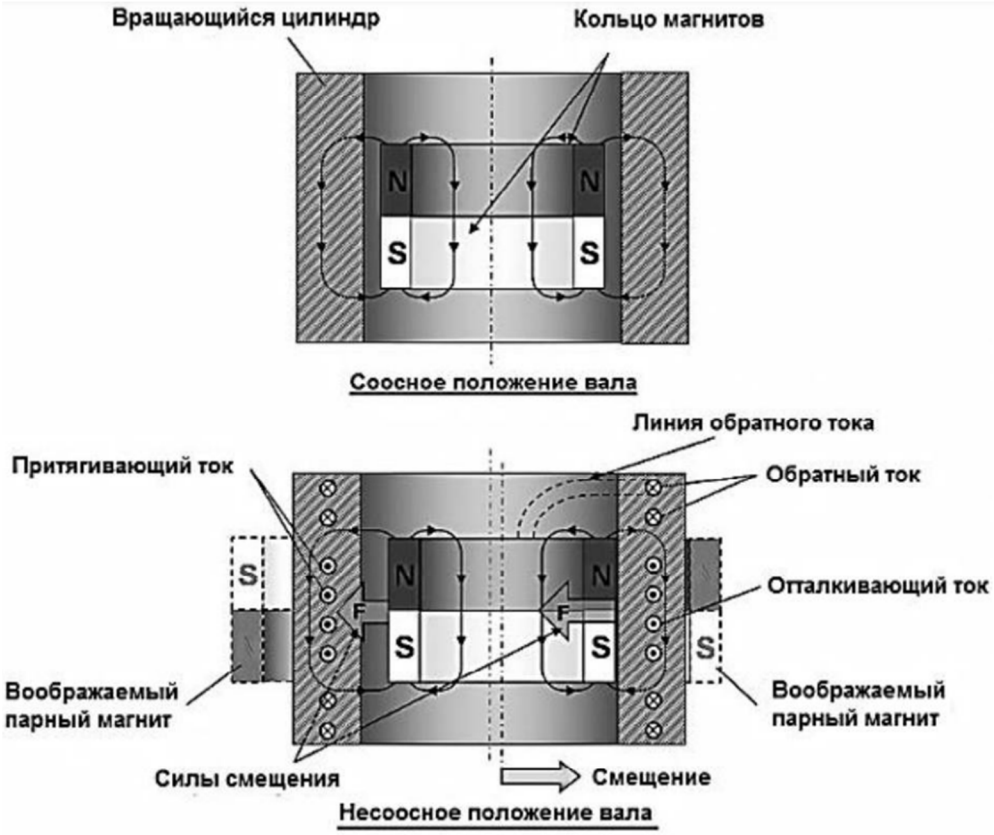


Рисунок 2 – Активный магнитный подшипник

Такие опоры также обладают рядом недостатков, среди которых полная зависимость от функционирования системы управления, сложность и дороговизна разработки, монтажа и обслуживания. Активные магнитные подшипники получили довольно широкое распространение в таких роторных системах, как компрессоры, турбины, насосы, моторы и генераторы.

Более предпочтительным в ряде случае является использование более простых конструкций опор роторов, обладающих тем же уровнем устойчивости и надежности, что и активные магнитные подшипники. Активные гидростатодинамические подшипники также обладают высокой износостойкостью при работе в установившемся режиме при полном разделении трущихся поверхностей смазочным слоем. Проблема возможного механического контакта на этапах разгона и останова двигателя решается путем подачи смазочной жидкости под давлением. Возможность внедрения системы управления, основанной на регулировании давления подачи смазочного материала в область трения опор, является преимуществом активных гидростатодинамических упорных подшипников перед электромагнитными ввиду очевидной разницы в стоимости и сложности элементов системы управления, отладки и обслуживании роторно-опорных узлов, а также ввиду возможности увеличения КПД и долговечности роторной машины в целом, не прибегая к значительному усложнению роторно-опорного узла.

Сегодня одна из прикладных зщач магнитной гидродинамики связана со смазкой опор скольжения реомагнитной жидкостью. Некоторыми коллективами ученых [7] уже изучается применение магнитореологических жидкостей в качестве активных жидкостей в мехатронных опорах роторов, а также отмечен эффект, оказываемый магнитным полем на харакгеристики смазочного слоя с ферромагнитной жидкостью. Смазка реомагнитными жидкостями опор скольжения (рис. 3) повышает несущую способность подшипника.

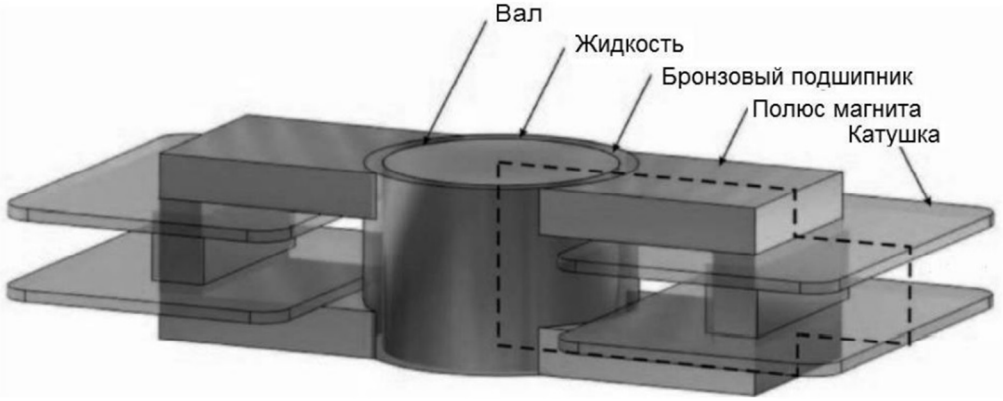


Рисунок 3 – Реомагнитный подшипник скольжения

Применение смазочных материалов с неньютоновскими свойствами позволяет улучшить параметры работы роторно-опорного узла с упорными гидростатодинамическими подшипниками. Магнитореологическая жидкость может быть использована в качестве активной смазки в таких опорах роторов, а имея по толщине элементы управления и контроля параметров, можно достичь почти бесконечной жесткости подшипника.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Создание цифровой системы мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния технического оборудования с применением технологии искусственного интеллекта на базе отечественных аппаратных и программных средств», Соглашение №075-11-2021-043 от 25.06.2021 г.

Список источников

1. Леонтьев, М.К. К моделированию обрыва лопатки двигателя большой степени двухконтурности [Текст] / М.К. Леонтьев, А.В. 9авыдов, С.А. Дегтярев, И.Л. Гладкий // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. № 2, 2014. С. 33-38.

2. Леонтьев, М.К. Выбор моделей гидродинамических демпферов в задачах роторной динамики газотурбинных двигателей [Текст] / М.К. Леонтьев, М.Н. Кутаков // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Издательство: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самара), № 3, 2017. С. 81-93.

3. Магнус, К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем [Текст] /К. Магнус. М.: Мир, 1982. 304 с.
4. Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings[Текст] / D. Gropper, L. Wang L, T. Harvey // Tribology International, Vo1. 94, 2016. P. 509 — 529.
5. Fillon, M. Experimental Study of Tilting-Pad Journal Bearings-Comparison With Theoretical Thermoelastohydrodynamic Results[Текст] / M. Fillon, J.-C. Bligoud, J. Frene // Journal of Tribology, Vo1. 114(3), 1992. P. 579-587.
6. Santos, I.F. Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles — Ап Overview [Текст] / I.F. Santos // Lubricants, Vo1. 6(1), 2018. 12 p.
7. Kasai, M. Influence of lubricants on plain bearing performance: analysis of bearing performance with polymer-containing oils [Текст] / M. Kasai, M. Fillon, J. Bouyer, S. Jarny // Proceedings of the 2012 Annual Metting & Exhibition, St. Louis, Missouri, USA. 2012. 5 p.

Бондаренко Максим Эдуардович, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru.
Поляков Роман Николаевич, Заведующий кафедрой мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: romanpolak@mail.ru.
Горин Андрей Владимирович, доцент кафедры мехтроники, механики и роботтехники ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: gorin57@mail.ru.
Серебренников Артем Дмитриевич, студент ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: gorin57@mail.ru.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF SLIDING BEARINGS APPLICATION OF GEOMAGNETIC LUBRICANT

Bondarenko M.E., Polyakov R.N., Gorin A.V., Serebrennikov A.D.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev

Summary. The article discusses the main areas of research of sliding bearings. The tendencies of transition to intelligent systems, namely to mechatronic devices capable of controlling the operational and thermophysical parameters of the rotor-support system, are highlighted. One of the promising ways to control the parameters of bearings is the use of ferromagnetic fluids. In this article, the classical design of the sliding bearing with rheomagnetic fluid is considered.

Keywords: sliding bearing, energy efficiency, lubricant, rheomagnetic fluid.

References

1. Leontiev, M.K. To modeling the breakage of an engine blade of a large degree of two-circuit [Text] / M.K. Leontiev, A.V. 9avydov, S.A. Degtyarev, I.L. Gladky // Izvestia of higher educational institutions. Aviation equipment. No. 2, 2014. pp. 33-38.
2. Leontiev, M.K. The choice of models of hydrodynamic dampers in the problems of rotor dynamics of gas turbine engines [Text] / M.K. Leontiev, M.N. Kutakov // Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. Publishing house: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara), No. 3, 2017. pp. 81-93.
3. Magnus, K. Oscillations: An Introduction to the study of oscillatory systems [Text] /K. Magnus. M.: Mir, 1982. 304 p.
4. Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A Review of modeling methods and key conclusions[Text] / D. Gropper, L. Wang L., T. Harvey // Tribology International, Vo1. 94, 2016. pp. 509-529.
5. Fillon, M. Experimental study of rolling bearing bearings - Comparison with theoretical thermoelastic hydrodynamic results [Text] / M. Fillon, J.-S. Bligoud, J. Frene // Journal of Tribology, Vo1. 114(3), 1992. pp. 579-587.
6. Santos, I.F. Controlled sliding bearings and principles of regulated lubrication — Ap Review [Text] / I.F. Santos // Lubricants, Vo1. 6(1), 2018. 12 p.
7. Kasai, M. The effect of lubrication on the sliding bearing performance: analysis of bearing performance with polymer-containing oils [Text] / M. Kasai, M. Fillon, J. Bouyer, S. Zharni // Materials of the Annual Meeting & Exhibition 2012, St. Louis, Missouri, USA. 2012. 5 p .

Bondarenko Maxim Eduardovich, Associate Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the I.S. Turgenev OSU, E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru.
Polyakov Roman Nikolaevich, Head of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the I.S. Turgenev OSU, E-mail: romanpolak@mail.ru.
Gorin Andrey Vladimirovich, Associate Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the I.S. Turgenev OSU, E-mail: gorin57@mail.ru.
Serebrennikov Aryom Dmitrievich, student of I.S. Turgenev OSU, E-mail: gorin57@mail.ru.

УДК 621.822

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ НАНЕСЕНИЕМ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А.
Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева

Аннотация. В статье представлено исследование адгезионной прочности твердых антифрикционных покрытий узлов трения автомобилей. Представлены результаты сравнения отечественных и импортных твердых антифрикционных покрытий. Выполнен краткий анализ существующих способов определения адгезионной прочности тонких антифрикционных покрытий отверждаемых в нормальных условиях. Описаны методика и проведены экспериментов с помощью разрывной машины универсального назначения с электронным измерителем сил ИР5047-50. Получены ряд количественных оценок прочности сцепления антифрикционного покрытия с основанием. Сделаны выводы о прочности сцепления покрытия. Даны рекомендации по применению методов для определения адгезионной прочности тонких твердых антифрикционных покрытий.

Ключевые слова: подшипник скольжения, энергоэффективность, прочность, адгезия, антифрикционное покрытие.

В процессе эксплуатации к современной техники, работающей в тяжелых условиях, предъявляются особые требования связанные с повышением надежности работы узлов и агрегатов и увеличения ресурса подвижных соединений [1, 2]. Данная проблема неразрывно связана со снижением трения в узлах автомобильной техники. Применение твердых антифрикционных покрытий позволяет решить задачу по снижению износа трущихся поверхностей при сервисе и ремонте автомобильной техники [3, 4].

В настоящее время прослеживается стабильная закономерность увеличения интенсивности использования отечественных антифрикционных материалов и технологий отечественных производителей. В большинстве это связано с наложенными на Российскую Федерацию ограничениями, в связи с которыми материалы зарубежных производителей стали недоступны для российских компаний. Оценки известных авторитетных экспертов [5, 6] показывают то, что санкции сохранятся на ближайшую и длительную перспективу. Одним из ярких примеров импортозамещения можно считать замену твердых антифрикционных покрытий известных иностранных брендов [7, 8] на отечественные, одним из представителей которых является компания «MODENGY» (ООО «Моделирование и инжиниринг»). Данная компания разрабатывает и производит материалы, реализующие технологию твердой смазки, в результате чего, тонкая смазывающая пленка в сопряженных поверхностях узлов трения, позволяет снизить коэффициент трения. Одним из показателей качества получаемой антифрикционной поверхности является ее адгезия. Исследования, направленные на изучение адгезии твердых антифрикционных покрытий разных производителей с учетом реальных условий является актуальной задачей.

Нашедшие распространение в последнее время твёрдые смазочные материалы, под механическим воздействием имеют свойство достаточно легко расщепляться. Этот эффект способствует созданию на поверхности трения и сопряженной поверхности тонкой смазочной пленки во время скольжения.

© Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А., 2022

Одним из основных факторов, отвечающих за работоспособность антифрикционного покрытия является его адгезия. Данный показатель волнует многих при выборе антифрикционного покрытия, так как он может значительно как улучшить, так и ухудшить состояние узла или агрегата при техническом обслуживании и ремонте.

Для проведения сравнительного испытания нами были выбраны покрытия двух марок MODENGY и Molykote. Испытание проводились методом определения адгезионной прочности нормальным отрывом по ГОСТ 27890-88.

Для проведения эксперимента исследуемые покрытия были разбиты на две группы по способу отверждения: отверждаемые при нагреве и отверждаемые при нормальной температуре (рисунок 1).

В первую и вторую экспериментальную группу вошли покрытия двух известных марок MODENGY и Molykote. Стоит заметить, что приобретённые твердые антифрикционных покрытий первой группы имели разную маркировку, а как следствие и разный способ его нанесения (рисунок 2).

Рисунок 1 – Группы антифрикционных покрытий для испытаний

Рисунок 2 – Состав первой группы твердых антифрикционных покрытий

Покрытия MODENGY 1003 и Molykote 3402-C LF согласно технологическому процессу должны были наноситься на исследуемые образцы с помощью дополнительного оборудования в нашем случае — это окрасочный пистолет (краскораспылитель) и компрессор. Покрытия Molykote PTFE-N UV и Molykote D-321R были получены в упаковке, в виде аэрозольного баллона, в котором данные покрытия находятся под давлением, как следствие для нанесения покрытий из такого вида упаковки не требуется дополнительного оборудования.

Согласно технологическому процессу данные виды покрытий следует наноситься на исследуемые образцы с помощью дополнительного оборудования в нашем случае — это окрасочный пистолет (краскораспылитель) и компрессор, с последующим отверждением в термопечи.

Испытания образцов проводились с использованием разрывной машины универсального назначения с электронным силоизмерителем ИР5047-50 (рисунок 3.а).

Обеспечивались нормальные условия: температура 20 °С и относительная влажность 70 %. В процессе проведения эксперимента, подготовленные для испытания образцы закреплялись в разрывной машине в специальном приспособлении для центрирования образцов. Нагружение испытуемых образцов производилось с плавным наращиванием разрывного усилия. Скорость перемещения захватов разрывной машины составляла не более 5 мм/мин. Образец после отрыва покрытия в о время проведения испытания представлен на рисунке 3.б.

Процесс нагружения образца до его разрушения записывался с помощью специального программного обеспечения. По итогам каждого испытания выдавался чек-лист в виде протокола испытаний.

Полученные экспериментальные данные были обработаны методами математической обработки экспериментальных исследований.

Таким образом, на основе ранее представленных исследований можно сделать следующие выводы:

- для количественной оценки адгезии твердых антифрикционных покрытий наиболее целесообразно применять метод нормального отрыва согласно ГОСТ 27890-88;
- среди твердых антифрикционных покрытий отверждаемых в нормальных условиях (покрытия первой группы) наибольшую адгезию имеет покрытие фирмы MODENGY;
- среди твердых антифрикционных покрытий отверждаемых при нагреве (покрытия второй группы) наибольшую адгезию показало покрытие фирмы MODENGY;
- при техническом обслуживании и ремонте узлов трения автомобилей в условиях автотранспортных предприятий целесообразно применять твердые антифрикционные покрытия отверждаемые при нагреве;

а)

б)

Рисунок 3 – Испытание образцов

- при техническом обслуживании в полевых условиях наиболее рационально применение твердых антифрикционных покрытий отверждаемых при нормальных условиях.

Список источников

1. Zhao, Meng. Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings [Текст] / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // Journal of petroleum science And Engineering. – Vol. 157. – 2017. – P. 1143-1147.

2. Yan, Hao. The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings [Текст] / Yan Hao, Xiying Zhou, Jiajia Shao, Yukun Zhu // Surface and coatings technology. – Vol. 362. – 2019. – P. 213-219.

3. Chijia, Wang. Anti-corrosion and wear resistance properties of polymer composite coatings: effect of oily functional fillers [Текст] / Chijia Wang, Huaiyuan Wang, Meiling Li, Zhanjian Liu, Ningzhong Bao // Journal of the taiwan institute of chemical engineers. – Vol. 85. – 2018. – P. 248-256.

4. Rodichev, A.Y. Formation of film antifriction coatings on the friction surfaces of machine parts [Текст] / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, N.V. Tokmakov // IOP Conference series: materials science and engineering ICMTMTE. – 2019, 2020. – Vol. 709. – Issue 1, 709 022053.
5. Обращение Президента Российской Федерации 24 февраля 2022 г. / http://kremlin.ru/events/president/news/67843/videos [Электронный документ] (06.09.2022г.).
6. Выступление Владимира Путина на ВЭФ-2022 8 сентября 2022 г. / https://www.youtube.com/watch?v=vTG4bdH9iug [Электронный документ] (09.09.2022г.)
7. Downing Corning. URL: http://atf.ru/. Руководство по выбору антифрикционных покрытий Molykote. 2008. Корпорация Downing Corning. Форма 71-02508-22.
8. Downing Corning. URL: http://atf.ru/. Технические описания АФП (ТСП) от 03.10.2016 (для ТСП MOLYKOTE® D-7409) от 04.03.2014 (для остальных ТСП).

Новиков Александр Николаевич, профессор кафедры сервиса и ремонта машин ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: srmostu@mail.ru.
Родичев Алексей Юрьевич, доцент кафедры сервиса и ремонта мешин ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: rodfox@yandex.ru.
Токмакова Мария Андреевна, аспирант ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: gorin57@mail.ru.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF BEARING ASSEMBLIES BY APPLYING SOLID ANTIFRICTION COATINGS

Novikov A.N., Rodichev A.Y. Tokmakova M.A.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev

Summary. The article presents a study of the adhesive strength of solid antifriction coatings of friction units of cars. The results of comparison of domestic and imported solid antifriction coatings are presented. A brief analysis of existing methods for determining the adhesive strength of thin antifriction coatings cured under normal conditions is performed. The methodology is described and experiments are carried out using a universal-purpose bursting machine with an electronic force meter IR5047-50. A number of quantitative estimates of the adhesion strength of the antifriction coating to the base have been obtained. Conclusions are made about the adhesion strength of the coating. Recommendations are given on the application of methods for determining the adhesive strength of thin solid antifriction coatings.
Keywords: sliding bearing, energy efficiency, strength, adhesion, anti-friction coating.

References

1. Zhao, Meng. Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings [Текст] / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // Journal of petroleum science And Engineering. – Vol. 157. – 2017. – P. 1143-1147.
2. Yan, Hao. The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings [Текст] / Yan Hao, Xiying Zhou, Jiajia Shao, Yukun Zhu // Surface and coatings technology. – Vol. 362. – 2019. – P. 213-219.
3. Chijia, Wang. Anti-corrosion and wear resistance properties of polymer composite coatings: effect of oily functional fillers [Текст] / Chijia Wang, Huaiyuan Wang, Meiling Li, Zhanjian Liu, Ningzhong Bao // Journal of the taiwan institute of chemical engineers. – Vol. 85. – 2018. – P. 248-256.
4. Rodichev, A.Y. Formation of film antifriction coatings on the friction surfaces of machine parts [Текст] / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, N.V. Tokmakov // IOP Conference series: materials science and engineering ICMTMTE. – 2019, 2020. – Vol. 709. – Issue 1, 709 022053.
5. Address of the President of the Russian Federation on February 24, 2022 / http://kremlin.ru/events/president/news/67843/videos [Electronic document] (06.09.2022).
6. Vladimir Putin's speech at the WEF-2022 on September 8, 2022 / https://www.youtube.com/watch?v=vTG4bdH9iug [Electronic document] (09.09.2022)7. GOST R 51694-2000 Paints and varnishes. Determination of coating thickness (ISO 2808: 1997 Paints and varnishes - Determination of film thickness, MOD).
7. Downing Corning. URL: http://atf.ru/. Руководство по выбору антифрикционных покрытий Molykote. 2008. Корпорация Downing Corning. Форма 71-02508-22.
8. Downing Corning. URL: http://atf.ru/. Технические описания АФП (ТСП) от 03.10.2016 (для ТСП MOLYKOTE® D-7409) от 04.03.2014 (для остальных ТСП).

Novikov Alexandr Nikolaevich, professor of the department “Mechatronics, Mechanics and Robotics”, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: srmostu@mail.ru.
Rodichev Aleksei Yrievich, associate professor of the department “Mechatronics, Mechanics and Robotics”, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: rodfox@yandex.ru.
Tokmakova Maria Andreevna, graduate student, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: gorin57@mail.ru.

УДК 62-543.3

АДАПТИВНЫЙ ПИ-КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЕМ РОТОРА

Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Шутин Д.В., Савин Л.А.
Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева

Аннотация. Несмотря на то, что гидродинамическая смазка является самоуправляемым процессом, мы разработали систему управления с адаптивным контроллером на основе ПИ-контроллера для минимизации амплитуды колебаний ротора в коническом гидродинамическом подшипнике. Конструкция подшипника допускает его осевое смещение и, таким образом, регулировку его среднего зазора. Тесты проводились с использованием имитационной модели в программе MATLAB. Имитационная модель включает модули жесткого вала, конического подшипника и системы управления. Модуль подшипника основан на численном решении обобщенного уравнения Рейнольдса и его нелинейной аппроксимации полносвязными нейронными сетями. Полученные результаты показывают, что адаптивный ПИ-регулятор снижает вибрации ротора даже при увеличении дисбаланса в системе.

Ключевые слова: активные подшипники жидкостного трения, конические подшипники жидкостного трения, моделирование сложных систем, адаптивный ПИ-контроллер.

Большая часть работ в области активных подшипников связана с активными магнитными подшипниками [1–3]. Системы управления в гидродинамических подшипниках могут применяться для решения следующих задач: минимизация вибрации и шума, снижение потерь на трение, повышение надежности и ресурса [4], [5]. На практике широко применяются подшипники со встроенными (интегральными) элементами [6–8]. Встроенные элементы в гидродинамическую несущую конструкцию позволяют изменять геометрию подшипника. Модели подшипников с подвижными подушками представлены в статьях [6–8]. В [9] и [10] авторы говорят об улучшении характеристик подшипников благодаря нелинейным контроллерам на основе моделей. Показано, что предлагаемый нелинейный регулятор требует меньше энергии управления по сравнению с ПИД-регулятором.

Системы управления подшипниками часто имеют простые алгоритмы управления. Несмотря на достаточно простую структуру контроллера, его настройка представляет собой сложный процесс. В данной работе мы предлагаем использование адаптивного ПИ-контроллера для контроля положением ротора.

Эффект гидродинамического подъема зависит от многих факторов, включая толщину пленки жидкости. Чем больше толщина пленки жидкости, тем меньше несущая способность. В свою очередь, толщина пленки жидкости в подшипнике зависит от эксцентриситета вала и среднего значения зазора подшипника. Однако также малые величины смазочного материала могут вести к контакту вала и подшипника. Такие явления характеризуются большими потерями на трение, а также повышенным износом.

Основная идея этого исследования заключается в том, что средний зазор подшипника в коническом гидродинамическом подшипнике можно регулировать за счет осевого смещения подшипника. Предлагаемая система конических подшипников включает вал, опирающийся на муфту на левом конце и конический подшипник на правый конец (рисунок 1).

© Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Шутин Д.В., Савин Л.А., 2022

Эта концепция предназначена для проведения вычислительных экспериментов и проверки идей разработки контроллеров. Подшипник смазывается водой или маслом, подаваемым под давлением p_0. Давление подачи создается насосом и может регулироваться сервоклапаном. Муфта валов не жесткая и может воспринимать нагрузку. В передаче винт-гайка гайка имеет коническую поверхность. Движение гайки позволяет приложить осевое усилие к поверхности подшипника. Это действие заставляет подшипник двигаться. Реакции в демпфирующем элементе зависят от величины перемещения и скорости подшипника. Контроль положения подшипника позволяет регулировать средний зазор смазочного слоя и, как следствие, его свойства, такие как грузоподъемность, момент трения и др. Предлагаемая система вал-подшипник также включает в себя датчики перемещения для измерения правого конечного положения вала в горизонтальном, вертикальном и осевом направлениях, датчик давления для измерения давления подачи и датчик крутящего момента для измерения момента трения.

Общая имитационная модель управляемой системы подшипников вала была разработана с использованием модуля Simscape Multibody и наборов инструментов Deep Learning, Reinforcement Learning и Signal Processing программного обеспечения MATLAB.

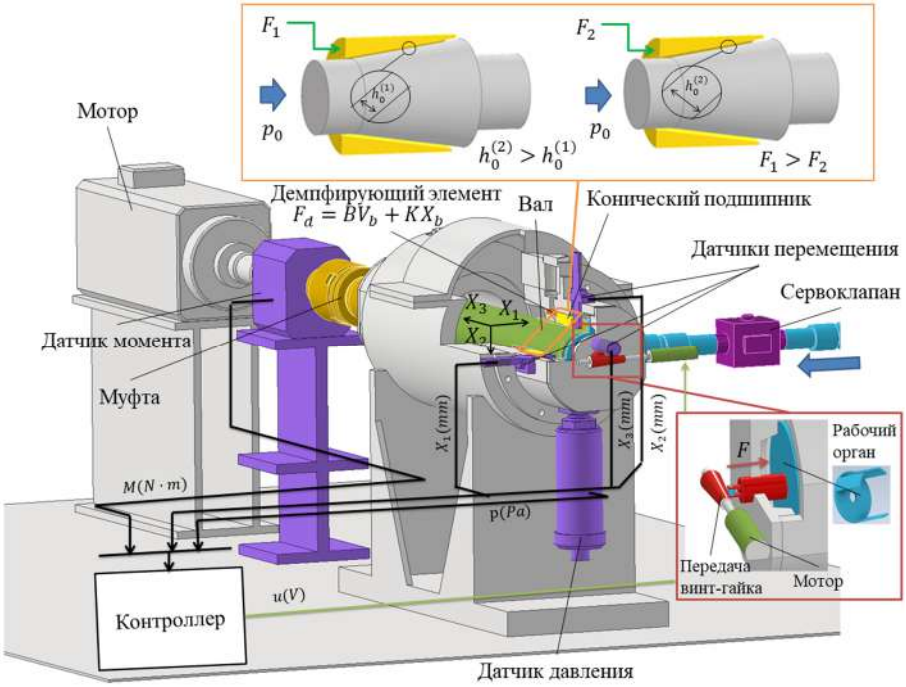


Рисунок 1 – Схема роторного мехатронного комплекса с активным подшипником жидкостного трения

Имитационная модель подшипника вала показана на рисунке 2.

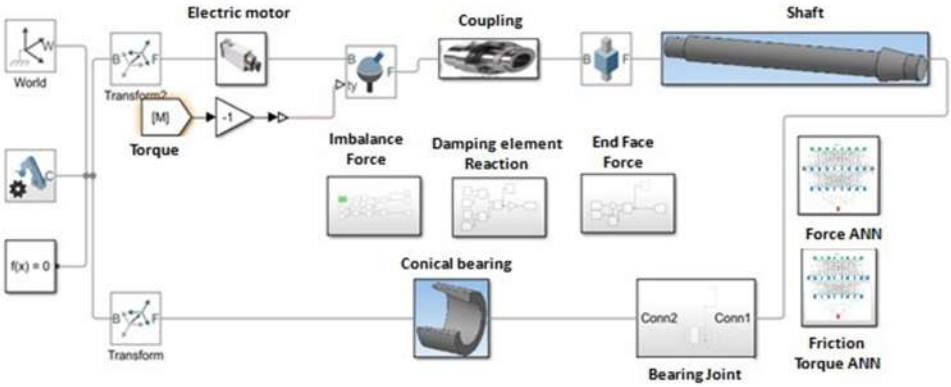


Рисунок 2 – Имитационная модель ротора

Блоки «Force ANN» и «Torque ANN» аппроксимируют силы реакции смазывающего слоя и момент трения как функцию скорости и данных о положении ротора в подшипнике, полученных из блока «Bearing Joint». Блок «Imbalance Force» генерирует центробежную силу в соответствии с заданным значением дисбаланса. Блок «Damping element Reaction» рассчитывает демпфирующий элемент согласно рисунку 1. Блок «End Face Force» вычисляет осевую силу в зависимости от давления подачи жидкости. В блоке Муфта есть коэффициенты жесткости и демпфирования. Их подбирали таким образом, чтобы при p_0 смещение вала было около 0.

Особенность этого метода моделирования заключается в том, что разрабатываемые имитационные модели могут быть эквивалентны реальным объектам. Это позволяет выполнять длительный процесс обучения агентов на имитационной модели без использования данных реального объекта.

Был проведен ряд имитационных тестов для расчета траекторий вала. Испытания проводились при следующих условиях. Вал массой 3 кг вращается с постоянной скоростью 3000 об/мин. Жесткость демпфирующего элемента и коэффициенты демпфирования составляют K=40000 Н/м и B=50 Нс/м соответственно. Подшипник с углом конусности $\alpha = 3$ градусов работает с давлением подачи $p_0 = 1.2 \cdot 10^5$ Па. Диапазон изменения смещения подшипника составлял от -0,5 мм до 0,7 мм.

Адаптивный ПИ-регулятор основан на простом ПИ-регуляторе:

$$u_{API} = u(z) = Pe(z) + It_s \frac{e(z)}{1 - z};$$

где P и I — пропорциональный и интегральный коэффициенты соответственно, t_s — шаг расчета, z — комплексное число, u — сигнал выходного контроллера, $e(z)$ — ошибка управления.

Для использования контроллера для управления траекториями ротора мы модернизировали функцию ошибки регулирования. Ошибка регулирования адаптивным ПИ-регулятором:

$$e_{API} = \begin{cases} |pos| - h_0^{max} \; if \; X_3 > X_3^{min} \wedge pos > h_0^{max}, \\ 0 \; if \; X_3 > X_3^{min} \wedge pos \leq h_0^{max}, \\ |X_3| - X_3^{min} \; if \; X_3 < X_3^{min}; \end{cases}$$

где $pos = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$ — эксцентриситет, h_0^{max} — желаемая контрольная зона в подшипнике, X_3^{min} — минимально допустимое осевое отклонение подшипника.

Для тестирования контроллера была создана среда моделирования. Предполагалось, что при моделировании будет увеличиваться амплитуда колебаний ротора. Рост амплитуды задавался нарастающим дисбалансом. Дисбаланс варьировался от 0 до $9{,}3 \cdot 10^{-5}$. Время моделирования составляло 35 с. Адаптивный ПИ-регулятор имеет следующие настройки: P= 0,0001, I= 0,001. Критической зоной работы ротора является радиус более 85 мкм.

Предполагается, что роторная машина работает в условиях неисправности. Это приводит к росту амплитуд колебаний ротора. После выхода ротора из выбранной критической зоны имеется возможность включения контроллера. При включении контроллера генерируется управляющее воздействие. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.

На рисунке 3 показаны траектории колебаний ротора. Видно, что итоговая амплитуда колебаний ротора при управлении меньше, чем если бы система управления отсутствовала. При включении контроллера примерно на 23 секунде видно, как ротор начинает двигаться к геометрическому центру подшипника. При этом движении происходит уменьшение размера смазочного слоя и увеличение коэффициентов жесткости и демпфирования. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний ротора. Это уменьшение амплитуды составило около 15 процентов. Однако уменьшение амплитуды связано с уменьшением зазора подшипника. Это может сильно повлиять на динамику ротора при малых значениях зазора.

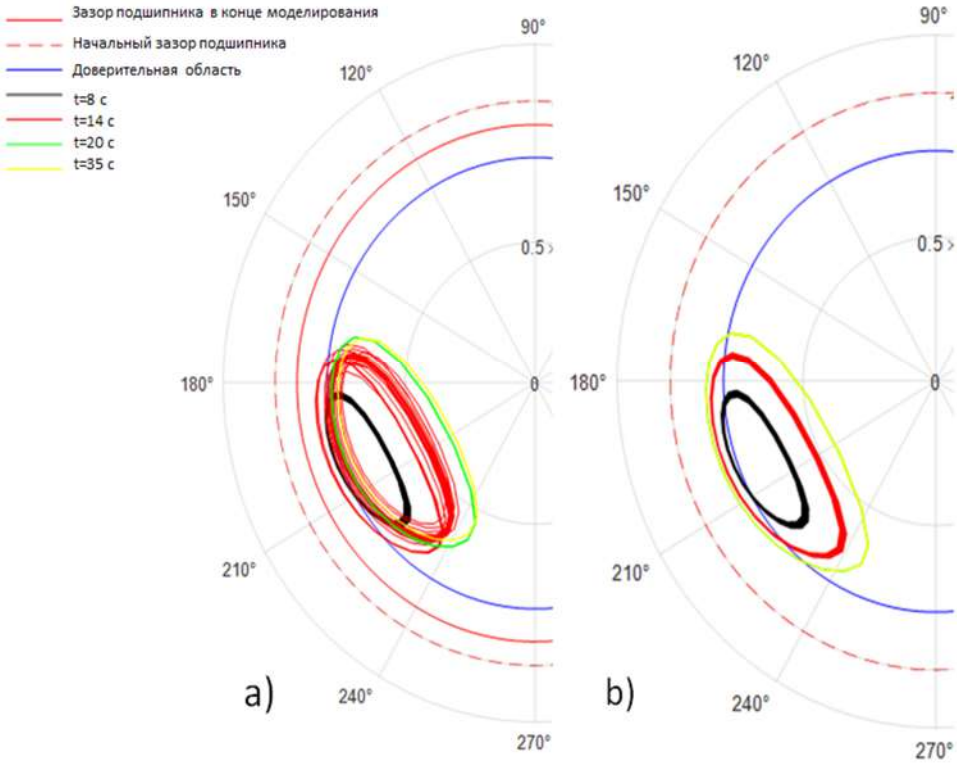


Рисунок 3 – траектории колебаний ротора:
a) с управлением, b) без управления

Как результат, предложенная имитационная модель вращающейся машины с регулируемым коническим гидродинамическим подшипником позволяет оценить эффективность систем управления на основе адаптивного ПИ-регулятора. По результатам моделирования можно выделить следующие моменты:

1. Колебания в регулируемом коническом гидродинамическом подшипнике можно уменьшить различными методами управления. Однако это связано с изменением зазора и опасностью нарушения гидродинамического режима трения.

2. Адаптивный ПИ-регулятор показывает хорошие результаты в минимизации амплитуды колебаний ротора. Однако стоит заметить, чем сложнее требования к системе управления, тем предпочтительнее использование интеллектуальных методов управления.

Список источников

1. A. B. Palazzolo, R. R. Lin, R. M. Alexander, A. F. Kascak, and J. Montague, “Test and Theory for Piezoelectric Actuator-Active Vibration Control of Rotating Machinery,” J. Vib. Acoust., vol. 113, no. 2, pp. 167–175, Apr. 1991, doi: 10.1115/1.2930165.

2. Y. Aydın and F. Gürleyen, “Adaptive and Non-adaptive Variable Structure Controls with Sliding Mode for Active Magnetic Bearings (AMBs) and Magnetic Levitation (MAGLEV) Systems: A Comparative Study,” IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 3, pp. 447–452, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.075.

3. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, and C. Kannababu, “Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 106, pp. 537–572, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.YMSSP.2018.01.010.

4. Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor, and N. Szewczuk-Krypa, “Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 151, p. 107423, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.YMSSP.2020.107423.

5. F. Qin, Y. Li, H. Qi, and L. Ju, “Advances in compact manufacturing for shape and performance controllability of large-scale components-a review,” Chinese J. Mech. Eng. 2017 301, vol. 30, no. 1, pp. 7–21, Jan. 2017, doi: 10.3901/CJME.2016.1102.128.

6. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings,” Tribol. Int., vol. 104, pp. 369–382, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.
7. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Modal interaction and vibration suppression in industrial turbines using adjustable journal bearings,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 744, no. 1, p. 012156, Sep. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012156.
8. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Enhancing stability of industrial turbines using adjustable partial arc bearings,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 744, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012152.
9. Z. Cai, M. S. De Queiroz, and M. M. Khonsari, “Adaptive Control of Active Tilting-Pad Bearings,” Proc. Am. Control Conf., vol. 4, pp. 2907–2912, 2003, doi: 10.1109/ACC.2003.1243765.
10. A. Wu, M. S. de Queiroz, and Z. Cai, “Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 12, no. 6, pp. 689–695, 2007, doi: 10.1109/TMECH.2007.911636.

Казаков Юрий Николаевич, студент магистр ОГУ им И.С. Тургенева, 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29. E-mail: KazakYurii@yandex.ru.
Корнаев Алексей Валерьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ имени И.С. Тургенева), 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29. E-mail: rusakor@inbox.ru.
Шутин Денис Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ имени И.С. Тургенева), 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29. E-mail: rover.ru@gmail.com.
Савин Леонид Алексеевич, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ имени И.С. Тургенева), 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29. E-mail: savin3257@gmail.com.

UDC 62-543.3

ADAPTIVE PI CONTROLLER FOR ROTOR POSITION CONTROL

Kazakov Yu. N., Kornaev A.V., Shutin D.V., Savin L.A.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev (OSU)

Summary. Although hydrodynamic lubrication is a self-controlled process, we have developed a PI-based adaptive controller control system to minimize the amplitude of rotor oscillation in a hydrodynamic tapered bearing. The design of the bearing allows its axial displacement and thus the adjustment of its average clearance. The tests were carried out using a simulation model in the MATLAB program. The simulation model includes rigid shaft, tapered bearing and control system modules. The bearing modulus is based on the numerical solution of the generalized Reynolds equation and its non-linear approximation by fully connected neural networks. The results obtained show that the adaptive PI controller reduces rotor vibrations even with increasing imbalance in the system.

Keywords: active fluid friction bearings, tapered fluid friction bearings, modeling of complex systems, adaptive PI controller.

References

1. A. B. Palazzolo, R. R. Lin, R. M. Alexander, A. F. Kascak, and J. Montague, “Test and Theory for Piezoelectric Actuator-Active Vibration Control of Rotating Machinery,” J. Vib. Acoust., vol. 113, no. 2, pp. 167–175, Apr. 1991, doi: 10.1115/1.2930165.
2. Y. Aydın and F. Gürleyen, “Adaptive and Non-adaptive Variable Structure Controls with Sliding Mode for Active Magnetic Bearings (AMBs) and Magnetic Levitation (MAGLEV) Systems: A Comparative Study,” IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 3, pp. 447–452, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.075.
3. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, and C. Kannababu, “Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 106, pp. 537–572, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.YMSSP.2018.01.010.
4. Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor, and N. Szewczuk-Krypa, “Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 151, p. 107423, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.YMSSP.2020.107423.
5. F. Qin, Y. Li, H. Qi, and L. Ju, “Advances in compact manufacturing for shape and performance controllability of large-scale components-a review,” Chinese J. Mech. Eng. 2017 301, vol. 30, no. 1, pp. 7–21, Jan. 2017, doi: 10.3901/CJME.2016.1102.128.

6. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings,” Tribol. Int., vol. 104, pp. 369–382, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.
7. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Modal interaction and vibration suppression in industrial turbines using adjustable journal bearings,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 744, no. 1, p. 012156, Sep. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012156.
8. A. Chasalevris and F. Dohnal, “Enhancing stability of industrial turbines using adjustable partial arc bearings,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 744, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012152.
9. Z. Cai, M. S. De Queiroz, and M. M. Khonsari, “Adaptive Control of Active Tilting-Pad Bearings,” Proc. Am. Control Conf., vol. 4, pp. 2907–2912, 2003, doi: 10.1109/ACC.2003.1243765.
10. A. Wu, M. S. de Queiroz, and Z. Cai, “Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 12, no. 6, pp. 689–695, 2007, doi: 10.1109/TMECH.2007.911636.

Kazakov Yuri Nikolaevich, Student, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. E-mail: KazakYurii@yandex.ru.
Kornaev Alexey Valerievich, Doctor of Sciences in Technology, Professor at the Department of Mechatronics, Mechanics, and Robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. E-mail: rusakor@inbox.ru.
Shutin Denis Vladimirovich, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel Docent of Department of mechatronics, mechanics and robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. E-mail: rover.ru@gmail.com.
Savin Leonid Alexeevich, Doctor of sciences, professor, professor at the department of mechatronics, mechanics and robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. E-mail: savin3257@gmail.com.

УДК 621.822

СИСТЕМА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ DQN-АГЕНТА

Фетисов А.С., Казаков Ю.Н.
Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических исследований динамических характеристик роторных систем на подшипниках скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями. Представлена математическая модель подшипника жидкостного трения на основе модифицированного уравнения Рейнольдса, математическая модель расчета динамических коэффициентов, имитационная модель роторной системы на магнитореологических подшипников жидкостного трения. Представлены графические зависимости коэффициентов жесткости и демпфирования от частоты вращения и индукции приложенного магнитного поля. Представлена модель системы активного управления, основанная на методах машинного обучения. Результаты обучения нейронной сети на представленной имитационной модели роторной системы показали снижение амплитуд виброперемещений ротора в магнитореологических подшипниках скольжения на 15% в области критических частот вращения и снижение на 32% усредненного значения амплитуд виброперемещений.

Ключевые слова: методы машинного обучения, система активного управления, магнитореологический подшипник жидкостного трения, динамические коэффициенты.

Применение систем активного управления динамическим поведением роторных машин позволяет добиться более высокой энергетической эффективности путем управления геометрических параметров зазора подшипника или изменения расхода и давления смазочного материала [1-4]. Применение магнитореологических жидкостей в качестве смазочного материала подшипников жидкостного трения позволяет управлять динамикой роторных систем за счет изменения реологических характеристик смазочного материала под действием приложенного магнитного поля [5,6]. Возможность управления в широком диапазоне критическими частотами роторных систем на магнитореологических подшипниках скольжения позволяет добиться оптимального ресурса составляющих ее частей ввиду снижения вибрационных нагрузок ротора в подшипниках [7].

© Фетисов А.С., Казаков Ю.Н., 2022

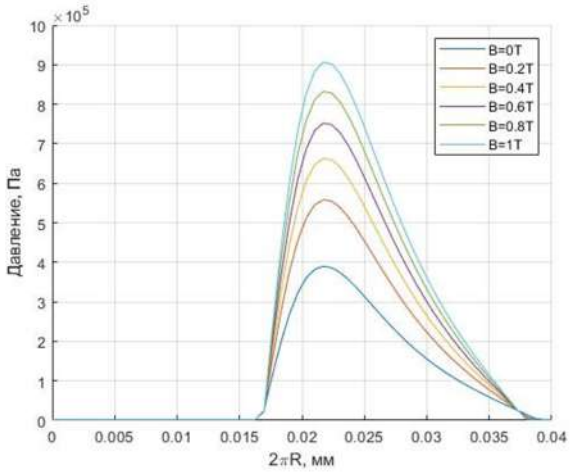


Рисунок 1– Распределения давления в смазочной пленке магнитореологического подшипника жидкостного трения

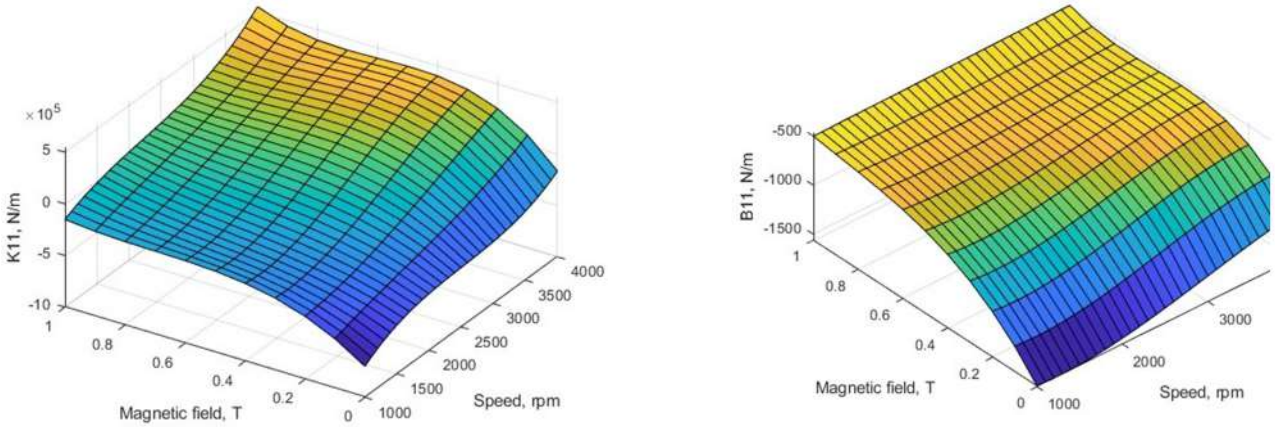
В рамках данной работы производилось моделирование течения магнитореологической жидкости в тонком канале между двумя несоосными цилиндрами на основе модифицированного уравнения Рейнольдса [8]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right]=6U\frac{\partial h}{\partial x}, \qquad (1)$$

где K_x и K_z - коэффициенты турбулентности, h - функция зазора, p - давление, μ - коэффициент динамической вязкости, U - линейная скорость поверхности вала.

В данном случае на основе решения уравнения Рейнольдса были определены распределения давления в смазочной пленке подшипника скольжения (рисунок 1).

На основе полученных полей давлений были определены коэффициенты жесткости и демпфирования магнитореологического подшипника жидкостного трения при помощи метода разложения реакции подшипника в окрестностях точки равновесия в ряд Тейлора (рисунок 2).



(а) (б)

Рисунок 2– Коэффициенты жесткости и демпфирования магнитореологического подшипника жидкостного трения

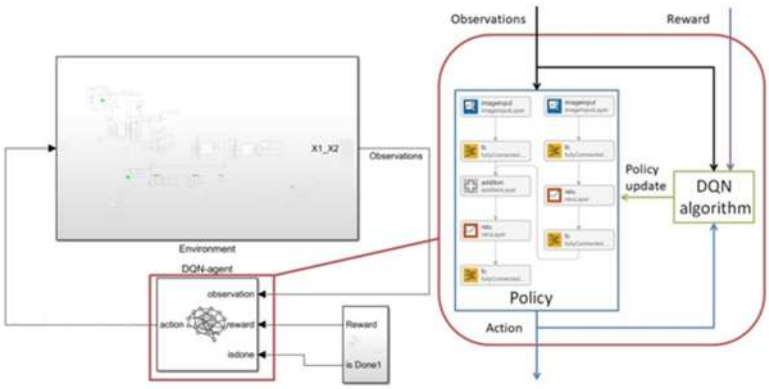


Рисунок 3 – DQN – агент для магнитореологического подшипника скольжения

Полученные коэффициенты жесткости и демпфирования были использованы в качестве входных изменяемых параметров для имитационной модели твердотельного ротора, построенной в Matlab Simulink. Результаты моделирования траекторий движения ротора в магнитореологических подшипниках скольжения представлены в работе [9].

В качестве задачи управления была выбрана задача минимизации амплитуд виброперемещений ротора в подшипниках и минимизация энергетических потерь, выражаемая в увеличении момента трения магнитореологического подшипника, к которому приложено электромагнитное поле. В соответствии с критериями управления была разработана система управления на основе DQN – агента (рисунок 3).

DQN – агент использовал имитационную модель роторной систему для обучения нейронной сети, отвечающей за поиск оптимального алгоритма прохождения критической частоты вращения. На рисунке 4 представлены основные результаты обучения ИНС.

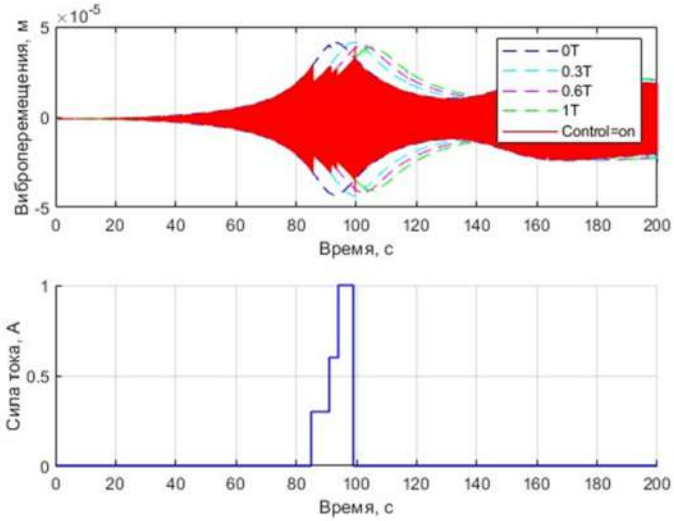


Рисунок 4 – Алгоритм прохождения критической частоты роторной системы

Предложенная система активного управления на основе DQN – агента позволила снизить максимальные амплитуды виброперемещений на 15 %, а усредненные по времени эксперимента амплитуды – на 32 %

Выводы

Синтез систем активного управления с применением методов искусственного интеллекта позволяет решать задачи многокритериального управления роторными системами, что является труднодостижимой задачей для большинства примеров классических регуляторов, применяемых в области роторной динамики.

Список источников

1. Fillon, M. Experimental Study of Tilting–Pad Journal Bearings—Comparison With Theoretical Thermoelastohydrodynamic Results / M. Fillon, J.–C. Bligoud, J. Frene // Journal of Tribology. – 1992. – Vol. 114(3). – P. 579–587.

2. Ettles, C. M. M. The analysis and performance of pivoted pad journal bearings considering thermal and elastic effects / C. M. M. Ettles // Journal of Lubrication Technology. – 1980. – Vol. 102, Issue. 2. – P. 182–192.

3. Kornaev, A.V. Influence of the ultrafine oil additives on friction and vibration in journal bearings / A.V. Kornaev, L. A. Savin, E.P. Kornaeva, A.S. Fetisov // Tribology International. – 2016. – Vol. 101. – P. 131–140.

4. Santos, I.F. Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles—An Overview // Lubricants. – 2018. – Vol. 6(1). – 12 p.

5. Tipei, N Theory of lubrication with ferrofluids: application to short bearings / Tipei N // Journal of lubrication. – 1982. – №104(4). – С. 510 – 515.

6. Experimental study and CFD simulation of rotational eccentric cylinder in a magnetorheological fluid/ Omidbeygi F, Hashemabadi SH // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. - № 324. – С. 2062–2069.

7. Fetisov, A. S., Kazakov, Yu. N., Tokmakov, N.V.: Rotor trajectories on magnetorheological fluid-film bearings. Fundamental and applied problems of engineering and technology 6(350) – 2021. – P. 76-82.

8. Zapomel J. A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation-derivation of the governing equations / Zapomel J., Ferfecki P., Forte P. // Applied Mathematical Modelling. Vol. 52. 2017. P. 558-575.

9. Фетисов, А. С. Траектории ротора на магнитореологических опорах скольжения / А. С. Фетисов, Ю. Н. Казаков, Н. В. Токмаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 6(350). – С. 76-82. – DOI 10.33979/2073-7408-2021-350-6-76-82.

Фетисов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник НОЦ «Интеллектуальные технологии мониторинга и диагностики энергогенерирующего оборудования» ОГУ имени И.С. Тургенева. 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95. E-mail: fetisov57rus@mail.ru.
Казаков Юрий Николаевич, младший научный сотрудник НОЦ «Интеллектуальные технологии мониторинга и диагностики энергогенерирующего оборудования» ОГУ имени И.С. Тургенева. 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95. E-mail: kazakyurii@yandex.ru.

UDC 621.45.038.72

ACTIVE CONTROL SYSTEM FOR A MAGNETOREOLOGICAL SLIDING BEARING BASED ON A DQN AGENT

Fetisov A.S., Kazakov Yu.N.
Russia, Orel State University

Summary. The article presents the results of theoretical study of the dynamic characteristics of rotor systems on sliding bearings lubricated with magnetorheological fluids. A mathematical model of a sliding bearing based on a modified Reynolds equation, a mathematical model for calculating dynamic coefficients, a simulation model of a rotor system based on magnetorheological sliding bearings are presented. Graphical dependences of the stiffness and damping coefficients on the rotational speed and induction of the applied magnetic field are presented. A model of an active control system based on machine learning methods is presented. The results of training the neural network on the presented simulation model of the rotor system showed a decrease in the amplitudes of vibration displacements of the rotor in magnetorheological sliding bearings by 15% in the region of critical speeds and a decrease by 32% in the average value of vibration displacement amplitudes.

Keywords: machine learning methods, active control system, magnetorheological fluid friction bearing, dynamic coefficients.

References

1. Fillon, M. Experimental Study of Tilting–Pad Journal Bearings—Comparison With Theoretical Thermoelastohydrodynamic Results / M. Fillon, J.–C. Bligoud, J. Frene // Journal of Tribology. – 1992. – Vol. 114(3). – P. 579–587.
2. Ettles, C. M. M. The analysis and performance of pivoted pad journal bearings considering thermal and elastic effects / C. M. M. Ettles // Journal of Lubrication Technology. – 1980. – Vol. 102, Issue. 2. – P. 182–192.
3. Kornaev, A.V. Influence of the ultrafine oil additives on friction and vibration in journal bearings / A.V. Kornaev, L. A. Savin, E.P. Kornaeva, A.S. Fetisov // Tribology International. – 2016. – Vol. 101. – P. 131–140.
4. Santos, I.F. Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles—An Overview // Lubricants. – 2018. – Vol. 6(1). – 12 p.
5. Tipei, N Theory of lubrication with ferrofluids: application to short bearings / Tipei N // Journal of lubrication. – 1982. – №104(4). – С. 510 – 515.
6. Experimental study and CFD simulation of rotational eccentric cylinder in a magnetorheological fluid/ Omidbeygi F, Hashemabadi SH // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. - № 324. – С. 2062–2069.
7. Fetisov, A. S., Kazakov, Yu. N., Tokmakov, N.V.: Rotor trajectories on magnetorheological fluid-film bearings. Fundamental and applied problems of engineering and technology 6(350) – 2021. – С. 76-82.
8. Zapomel J. A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation-derivation of the governing equations / Zapomel J., Ferfecki P., Forte P. // Applied Mathematical Modelling. Vol. 52. 2017. P. 558-575.
9. A. S. Fetisov, Yu. N. Kazakov, and N. V. Tokmakov, Rotor Trajectories on Magnetorheological Sliding Bearings, Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. - 2021. - No. 6 (350). - S. 76-82. – DOI 10.33979/2073-7408-2021-350-6-76-82.

Fetisov Alexander Sergeevich, Ph.D, Junior Researcher, REC "Intelligent Technologies for Monitoring and Diagnostics of Power Generating Equipment", OSU named after I.S. Turgenev. 302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95. E-mail: fetisov57rus@mail.ru.
Kazakov Yury Nikolaevich, Junior Researcher, REC "Intelligent Technologies for Monitoring and Diagnostics of Power Generating Equipment", OSU named after I.S. Turgenev. 302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95. E-mail: kazakyurii@yandex.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ

Птицына Е.В., Птицын Д.В. Кувалдин А.Б.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ 6

Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М.
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ ПО ВАННЕ И СТЕНАМ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ 11

Еремеев В.Д., Коренков Д.А.
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ РАБОЧИХ КАМЕР ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКЕ ЗАГОТОВОК ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР.....16

Шевляков Д.Э., Шевляков Дм.Э., Коренков Д.А.
ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ВЧ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПЕРЕМЕННУЮ ЕМКОСТНУЮ НАГРУЗКУ.....19

Качанов А.Н. Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ 23

Булгакова Е.С., Кувалдин А.Б.
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НА ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОГО ИНДУКТОРА.....28

Кувалдин А.Б, Федин М.А., Молостова А.В., Зотов М.Л., Василенко А.И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ 31

Булгаков А.С., Погребисский М.Я.
РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО КОСВЕННОМУ ПАРАМЕТРУ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ 36

Королева Т.Г., Щербаков Н.А.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ.....40

СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ

Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.
ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОПОЛОГИЙ.....45

Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.
СИНХРОННАЯ МАШИНА С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ.....54

Коренков Д.А. Тимохин В.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ОТ ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ.....62

Скурятин Ю.В., Белоусов А.В., Жилин Е.В., Саввин Н.Ю.
ЭНЕРГОРОУТЕР ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ С ОДНОФАЗНОЙ СЕТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА: СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ 66

Мезенцева А.В.
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СКВАЖИН ЭКСПЛУАТИРУЕМЫМИ УЭЦН 72

Походных М.С.
СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОТТЕДЖА 76

Чернышов В.А., Головин Р.А.
ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО ОДНОПРОВОДНЫМ ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 10 кВ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ 81

Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С.
ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОТЫСКАНИЯ НОВЫХ РЕШЕНИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6-10 кВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ 84

Гребенников А.А., Чернышов В.А.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЧЕТА ВРЕМЕНИ ВЫЯВЛЕНИЯ, СУЩЕСТВОВАНИЯ, ОТЫСКАНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 10 кВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ 88

Чернышов В.А., Коренков Д.А., Чернышова Л.А.
СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕЖУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ И СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКАХ ВОЗДУШНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10 кВ 94

Юрьев Ю.Н., Павлов Ю.В., Миронов Е.А.
АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АИИСКУЭ КАК ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 99

Чернышов В.А., Даровых А.С., Лукьянов Г.В.
ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА НЕЙТРАЛИЗАЦИЮ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 10 кВ 107

СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Гаранин М.Е., Федянин В.Я.
РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПЛАВУЧИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ 111

Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.
МИКРО-ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ПОПЕРЕЧНО-СТРУЙНОЙ ГИДРОТУРБИНОЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ 116

Дорожкин М.В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ КОРМОВЫХ СМЕСЕЙ С КАМЕРОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ..... 119

Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В., Жуков А.А.
УСТРОЙСТВО БЕСКОНДЕНСАТОРНОГО ЗАПУСКА ОДНОФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ..... 124

Попова М.В., Волков Д.А.
ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ГОРОДАХ И РЕГИОНАХ РОССИИ 127

СЕКЦИЯ 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Настепанин К.К., Стебаков И.Н., Родичев А.Ю., Поляков Р.Н.
КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ РАЗНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СЛОЕВ ДЛЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН ГТД 136

Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В., Серебренников А.Д.
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ РЕОМАГНИТНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА 142

Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А.
УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ НАНЕСЕНИЕМ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ..... 146

Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Шутин Д.В., Савин Л.А.
АДАПТИВНЫЙ ПИ-КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЕМ РОТОРА..... 150

Фетисов А.С., Казаков Ю.Н.
СИСТЕМА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ DQN-АГЕНТА 155

Научное издание

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

МАТЕРИАЛЫ
XX МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.

под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова,
д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова

Материалы печатаются в авторской редакции
Компьютерная верстка, оригинал-макет, техн. редактирование Д.А. Коренков

Электронный адрес размещения:
http://myconfs.ru/energosber2022/conferences/info

Подписано к печати 15.12.2022 г. Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л. 10,13. Тираж 500 экз.
Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95,
http:/oreluniver.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95