

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

10 – 12 ноября 2021 г., г.Орёл



ENERGY AND RESOURCES SAVING XXI CENTURY

10th – 12th November 2021, Oryol

Орёл 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ПРАВИТЕЛЬСТВО ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С. ТУРГЕНЕВА»
ФГБОУ ВО «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени И.И. ПОЛЗУНОВА»
ПАДЕРБОРНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (Германия)
ООО «ОРЛОВСКИЙ ЭНЕРГОСБЫТ»
КАФЕДРА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ
(ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»)

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

**Материалы
XIX международной
научно-практической конференции
10 – 12 ноября 2021 г., г. Орёл**

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

Орёл
ОГУ имени И.С. Тургенева
2021

УДК 620.92 (063)
ББК 31.15Я 431
Э65

Э65 Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIX международной научно-практической конференции (10 – 12 ноября 2021 г., г. Орёл) / под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – 139 с.

ISBN 978-5-9929-1048-3

В материалы XIX международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» включены труды ученых и специалистов России, стран ближнего и дальнего зарубежья. Труды, представленные участниками были размещены на сайте конференции <http://myconfs.ru/energoser2021/conferences/info>, которая в условиях ограничений, вызванных COVID 19, проводилась в дистанционном формате на базе кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» в период с 10 по 12 ноября 2021 года.

Работа конференции была организована по следующим секциям:

1. Проблемы энергоресурсосбережения и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и городских территорий.
2. Энергоэффективность систем электроснабжения и направления их развития.
3. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки.
4. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.
5. Интеллектуальные технологии и автоматизированные системы управления в задачах повышения энергоэффективности.
6. Цифровые технологии как средство повышения энергоэффективности.

Материалы конференции адресованы учёным и специалистам, работающим в области энергетики и электротехники, занимающимися вопросами автоматизации и управления технологическими процессами и производствами. Они могут быть полезны студентам, соискателям ученых степеней и инженерно-техническим работникам, занимающимся теоретическими и практическими исследованиями в области энерго- и ресурсосбережения, безопасной эксплуатации зданий, сооружений и городских территорий и активно внедряющими цифровые технологии в различные отрасли экономики.

Материалы конференции подготовлены кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»

УДК 620.92 (063)
ББК 31.15Я 431

ISBN 978-5-9929-1048-3

© ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

1. Федотов Александр Анатольевич – к.э.н., доцент, PhD, председатель организационного комитета, ректор ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», почетный работник сферы образования РФ.
2. Вакулко Анатолий Георгиевич – академик РИА, лауреат Государственной премии РФ, вице-президент Федеральной палаты энергоэффективности и энергобезопасности.
3. Голенков Вячеслав Александрович – д.т.н., профессор, лауреат Государственных премий РФ, руководитель научной школы ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
4. Бутырин Павел Анфимович – член-корреспондент РАН, академик АЭН РФ, президент АЭН РФ, лауреат премии имени П. Н. Яблочкова
5. Качанов Александр Николаевич - заместитель председателя комитета, заслуженный работник высшей школы РФ, д.т.н., профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
6. Кувалдин Александр Борисович – Заслуженный деятель науки РФ, академик АЭН РФ, д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
7. Никольский Олег Константинович – Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор кафедры «Электрификация производства и быта» ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Барнаул.
8. Рыжкова Елена Николаевна – д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
9. Юрьев Юрий Николаевич – генеральный директор ПАО «ИНТЕР-РАО – Орловский энергосбыт», депутат Орловского областного Совета народных депутатов.
10. Чернышов Вадим Алексеевич – технический секретарь комитета, к.т.н., доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

1. Пилипенко Ольга Васильевна – председатель комитета, д.т.н., профессор, депутат Государственной думы Федерального собрания Российской Федерации VIII созыва.
2. Демидович Виктор Болеславович – д.т.н., профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники ФГБОУ ВО «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова», академик-секретарь научно-отраслевого отделения № 6 АЭН РФ.
3. Захидов Ромэн Абуллаевич – академик АН Республики Узбекистан, д.т.н., профессор. Институт энергетики и автоматики АН РУз.
4. Любимов Виктор Васильевич – Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор, член-корр. РАЕН, заведующий кафедрой «Физико-химические процессы и технологии» ФГБОУ ВО ТулГТУ.
5. Марков Андрей Михайлович – д.т.н., профессор, член-корреспондент АИН им. А.М. Прохорова, почетный работник ВПО РФ, ректор ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. Ползунова И.И.», г. Барнаул.
6. Степанов Юрий Сергеевич – заместитель председателя программного комитета, Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор, лауреат премий Президента и Правительства РФ, ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
7. Хейфиц Михаил Львович - д.т.н., профессор, заместитель академика – секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Белоруссии.
8. Ivo Dolezal (Чехия) - Prof., Ing., Westbomische Universitaty of West Bochemia Zapadeceska universitata v Plzňi.
9. Li Qingling (Китай) - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering.

10. Pahl Manfred H. (Германия) - Prof., Dr.-Ing. Dr. h.c., Institute of Energy and Process Engineering Mechanical and Environmental Process.

11. Коренков Дмитрий Андреевич – технический секретарь программного комитета, к.т.н., доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

1. Радченко Сергей Юрьевич – д.т.н., профессор, почетный работник ВПО РФ, проректор по научно-технологической деятельности и аттестации научных кадров ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева».

2. Александрова Анжелика Паруйровна – к.ф.н., доцент, начальник отдела бюро переводов ФГБОУ ВО «ОГУ им. 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 – к.ф.н., начальник отдела организации научных мероприятий и академического развития ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»;

5. Качанов Александр Николаевич - д.т.н., профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, академик АЭН РФ, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

6. Коренков Дмитрий Андреевич – секретарь программного комитета, к.т.н., доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»;

7. Лунев Роман Алексеевич – секретарь технического комитета, к.т.н., доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий;

8. Чернышов Вадим Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»;

НАУЧНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Проблемы энергоресурсосбережения и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и городских территорий.

2. Энергоэффективность систем электроснабжения и направления их развития.

3. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки.

4. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.

5. Интеллектуальные технологии и автоматизированные системы управления в задачах повышения энергоэффективности.

6. Цифровые технологии как средство повышения энергоэффективности.

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 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
- 8 Ryzhkova Elena Nikolajevna - Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Energy supply of Industrial Enterprises, National Research University "MEI" (Moscow Power Institute)
- 9 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
- 10 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 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
- 3 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
- 4 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
- 5 Markov Andrey Mikhailovich - Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of the AES n.a. A.M. Prokhorov, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Rector of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov, Barnaul
- 6 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

- 7 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
- 8 Ivo Dolezal - Prof., Ing., Westbomische Universitaty of West Bochemia Zapadeceska universitata v Plzňi (Czech Republic)
- 9 Li Qingling - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering (China)
- 10 Pahl Manfred H. - Prof., Dr.-Ing. Dr. h.c., Institute of Energy and Process Engineering Mechanical and Environmental Process (Germany)
- 11 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 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 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
- 7 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
- 8 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

SCIENTIFIC AND ENGINEERING AREAS

1. Problems of energy saving and safe operation of buildings, structures and urban areas.
2. Energy effectiveness of power supply systems and their development lines
3. Energy saving electro-technological processes and equipment
4. Energy- and resource saving in agro-industrial complex
5. Intellectual technologies and automated control systems in effective energy and resource saving processes.
6. Digital technologies as means of improving energy efficiency

СЕКЦИЯ 1. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Руководитель:

Турков Андрей Викторович, д.т.н., профессор кафедры строительных конструкций и материалов АСИ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл

УДК 64-51

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

Павлов Ю.В., Соколова Е.В.

Россия, г. Орёл, ООО «Орловский энергосбыт»

Цель статьи – обобщить информацию о наружном освещении с точки зрения выбора оптимального оборудования, экономической эффективности, безопасности граждан и снижения социальной напряженности. В результате анализа была обоснована целесообразность использования энергосервисного контракта в качестве инструмента для решения проблемы недоосвещенности населенных пунктов при дефиците финансирования, рассмотрены законодательная база и параметры расчетов экономии.

Ключевые слова: наружное освещение, уличное освещение, световой прибор, светодиодный светильник, энергосервисный контракт, ООО «Орловский энергосбыт».

История появления наружного электрического освещения в регионе

В Орловской области электрическая энергия для наружного освещения улиц стала использоваться впервые в городе Орле, который, в свою очередь, обязан его появлением началу трамвайного движения. Осенью 1898 года, когда были проложены трамвайные линии и построена первая городская электростанция, электроэнергия стала использоваться для освещения улиц по пути следования трамваев. В начале XX века электрические фонари стали появляться уже на других улицах и на окраинах города, началось подключение к электроснабжению частных абонентов. К 1913 году электрическое освещение охватило почти все улицы города.

С тех пор устройство наружного освещения в населенных пунктах региона претерпело немало изменений, и современный подход к его выполнению не только обеспечивает реализацию его основной функции, но и значительный эффект от экономии энергоресурсов.

Определения и нормативная база

Утилитарное наружное освещение - стационарное освещение, обеспечивающее безопасное и комфортное движение транспортных средств и пешеходов на дорогах, улицах, велосипедных дорожках и в пешеходных зонах парков и скверов в темное время суток [1].

Основной регламентирующий документ в области уличного освещения – ГОСТ Р 55706 – 2013. В этом документе приведены расчеты оптимального освещения для разного типа улично-дорожной сети в зависимости от застройки, категории расположенных объектов, геометрии и ландшафта местности.

Выбор качественного и долговечного оборудования при модернизации наружного освещения необходим не только для беспрепятственной ориентации людей на местности, но и для обеспечения безопасности участников дорожного движения и профилактики преступности. При этом освещение в жилых районах должно быть комфортным для зрения и не допускать ослепления людей. Также при установке светильников необходимо принять меры, исключающие попадание прямого направленного света в дома и квартиры.

Таблица 1 - Категории и классы по освещению объектов улично-дорожной сети, предназначенных для движения транспорта (на основе ГОСТ Р 55706 - 2013)

| Категория объекта | | Класс объекта по освещению | Основное назначение объекта | Расчетная скорость движения, км/ч | Число полос движения |
|---|--|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|
| А Магистральные дороги и улицы общегородского назначения | За пределами центра города | A1 | Автомагистрали, федеральные и транзитные трассы, основные магистрали города | 100 | 6-8 |
| | | A2 | Прочие федеральные дороги и основные улицы | 80-100 | 6-8 |
| | В центре города | A3 | Центральные магистрали, связующие улицы с выходом на магистрали класса A1 | 90 | 6-8 |
| | | A4 | Основные исторические проезды центра, внутренние транспортные связи центра города | 80 | 4-6 |
| Б Магистрали и улицы районного значения | За пределами центра города | B1 | Основные дороги и улицы города районного значения | 60-70 | 4-6 |
| | В центре города | B2 | | 60 | 3-6 |
| В Улицы местного значения | Жилая застройка за пределами центра города | B1 | Транспортные и пешеходные связи в пределах жилых районов и выход на магистрали, кроме улиц с непрерывным движением | 60 | 2-4 |
| | Жилая застройка в центре города | B2 | Транспортные и пешеходные связи в жилых микрорайонах, выход на магистрали | 60 | 2-4 |
| | В городских промышленных, коммунальных и складских зонах | B3 | Транспортные связи в пределах производственных и коммунально-складских зон | 60 | 2-4 |

Влияние наружного освещения на вероятность возникновения ДТП

В темное время суток количество информации, поступающей в мозг человека, снижается из-за недостаточного уровня освещенности, отражения света от поверхностей, бликов. Всё это создает предпосылки для дорожно-транспортных происшествий. Несмотря на снижение интенсивности дорожного движения в темное время суток, доля происшествий в этот период выше и последствия аварий серьезнее.

На сегодняшний день плохая освещенность является причиной около половины всех ДТП (рисунок 1 – вертикальная штриховка на рисунке).

Несмотря на то, что всего около четверти времени автомобильного движения происходит без естественного освещения, а интенсивность движения падает, именно в этот период происходит примерно 35% дорожно-транспортных происшествий, из которых большая часть – это аварии с наездом на пешеходов и съезды транспортных средств с дороги.

Должный уровень освещенности, напротив, облегчает обнаружение препятствий на дороге, увеличивает видимость других участников движения, позволяет просматривать дорожное полотно на расстоянии, достаточном для принятия решения о совершении или несвершении маневра [5].

Таким образом, фактические выгоды от реализации проектов по обеспечению качественного уличного освещения в виде профилактики дорожно-транспортных происшествий значительно превосходят затраты на него.

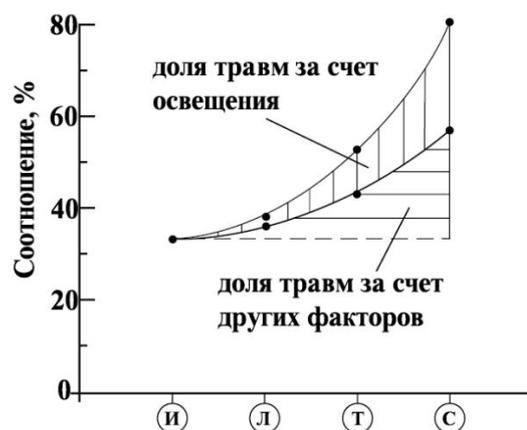


Рисунок 1 - Соотношение в темное и светлое время суток:

И – интенсивности движения, Л (Т) – легких (тяжелых) травм, С – летальных исходов

Проблемы финансирования

Ограниченные бюджетные возможности представляют собой серьезный барьер для муниципальных образований при принятии решения о модернизации наружного освещения в населенных пунктах. В соответствии с Федеральным законом № 131-ФЗ от 06.10.2003 «Об общих принципах организации местного самоуправления в РФ» освещение улиц входит в компетенцию органов местного самоуправления [2]. При всем понимании важности наружного освещения администрации муниципальных образований вынуждены экономить на этом виде благоустройства: включать освещение не на весь период темного времени суток, а только на несколько часов, когда люди идут на работу и возвращаются с нее. При этом большую часть ночного времени улицы остаются неосвещенными.

На улицах населенных пунктов ранее были установлены фонари типа ДРЛ и/или ДНаТ, потребляющие электроэнергию значительно больше, нежели современные светодиодные. Некоторые из них вышли из строя, поэтому даже при формальном наличии светильников фактически освещение неравномерное и не обеспечивает своих функций в полном объеме.

В условиях необходимости экономии затрат на электроэнергию установки уличного освещения включаются поздно, и до момента включения дорожное полотно и прилегающие к нему участки освещаются только естественным светом, а также светом из окон домов и предприятий, а в населенных пунктах покрупнее – еще и рекламными и информационными конструкциями. Фигура человека в таких условиях плохо различима: объект и фон воспринимаются глазом водителя как диффузные поверхности серого цвета с близкими коэффициентами отражения.

При частичном включении (например, при включении каждого второго или каждого третьего светильника) освещенность и, соответственно, яркость получается резко неравномерной, и это приводит к восприятию водителем дороги как пульсирующей поверхности, различить объект на таком неоднородном фоне трудно.

При увеличении освещенности, напротив, пропорционально увеличивается яркость фона и, следовательно, контрастная чувствительность и различимость человека на дороге [5].

В условиях дефицитности бюджетов многих муниципальных образований важно, чтобы вышеперечисленные характеристики сочетались с экономичностью использования системы уличного освещения.

Энергосервисный контракт—оптимальное решение задачи модернизации системы наружного освещения

В сложившейся ситуации оптимальным решением задачи модернизации системы уличного освещения для муниципальных образований является энергосервисный контракт, заключаемый с энергосервисной компанией и сочетающий в себе реализацию светотехнических и энергосберегающих мероприятий.

Энергосервисный контракт, алгоритм которого приведен на рисунке 2, предполагает внедрение комплекса мероприятий по замене уличных источников освещения, освещения промышленных объектов и площадок, социальных учреждений на энергоэффективные. Это позволяет значительно сэкономить средства, которыми собственник сможет распорядиться после определённого периода. Отличительная особенность энергосервиса состоит в том, что от заказчика не требуется первоначальных вложений на модернизацию, все затраты на реализацию проекта лежат на исполнителе договора (контракта) и возмещаются ему в дальнейшем за счёт полученной заказчиком экономии от использования энергетических ресурсов (в нашем случае электрической энергии). То есть оплата за электроэнергию остается на прежнем уровне в течение всего срока действия контракта: энергосервисная компания возмещает свои затраты за счет экономии, полученной заказчиком (муниципальным образованием) в результате более низкого энергопотребления.



Рисунок 2 - Алгоритм заключения энергосервисного контракта

По окончании срока действия энергосервисного контракта высвободившиеся в результате экономии средства собственники могут расходовать по своему усмотрению – внедрять энергосберегающие технологии, использовать на благоустройство, перераспределять на другие цели, на территории муниципалитета. Как правило, энергосервисные контракты заключаются на срок от 6 месяцев до 5-7 лет, а экономия электроэнергии в натуральном выражении может достигать 80% [6].

На подготовительном этапе крайне важно правильно выполнить расчеты по модернизации наружного освещения, чтобы оно отвечало ожиданиям, возложенным на него. Пример уличного освещения с неверно выполненными расчетами, но реализованного в полном соответствии с техническим заданием, мы можем наблюдать на улицах областного центра.

Поэтому расчетам уровня освещенности уделяется много времени. Наружное освещение абсолютного большинства населенных пунктов Орловской области соответствует классу В Национального стандарта Российской Федерации «Освещение наружное

утилитарное» (дороги в жилой застройке в центре города и за его пределами, а также в промышленных зонах).

В светотехнике используют три основных метода расчета наружного освещения:

- Точечный – суть метода заключается в вычислении показателей для каждого устанавливаемого светового прибора. Он предназначен для расчета освещенности произвольно расположенных поверхностей при любом распределении освещенности. Отраженная составляющая освещенности и действие других световых приборов при применении этого метода учитываются очень приближенно. Точечный метод преимущественно используется для расчета освещенности при наличии множественных затенений.

- Метод коэффициента использования светового потока. Коэффициент светового потока (или световой установки) это отношение светового потока, падающего на поверхность, к световому потоку источников света.

$$U_{oy} = \frac{\Phi_p}{n\Phi_{\text{л}}}$$

где: Φ_p – световой поток, падающий на расчетную плоскость; $\Phi_{\text{л}}$ – световой поток источника света; n – число источников света.

Это очень трудоемкий метод, который чаще используется в проектировании внутреннего освещения.

- Метод удельных мощностей. С его помощью можно определить требуемую мощность светильников исходя из информации о месте установки, высоте подвеса, освещенности на горизонтальной поверхности. Этот метод и используется специалистами, ООО «Орловский энергосбыт» при подборе осветительных приборов для выполнения энергосервисных контрактов.

При выполнении работ по модернизации уличного освещения ООО «Орловский энергосбыт» использует светодиодные светильники региональных производителей. Это позволяет оперативно закупать оборудование, выполнять техническое обслуживание или замену светильников (при необходимости) без промедления.

Выбор LED-светильников обусловлен продолжительностью срока их службы, экономичностью в потреблении электроэнергии при сохранении качества светового потока по сравнению со световыми приборами, где в качестве источника освещения используются газоразрядные и люминисцентные лампы. Светодиодные светильники пригодны для эксплуатации в разных климатических зонах и имеют широкий диапазон температур: от -60 °С до +65 °С. Они огнестойкие, защищены от проникновения влаги, пыли и твердых частиц, соответствуют ГОСТу ИЕС 60598-1-2017 по классу защиты от поражения электрическим током.

Нормативное значение яркости дорожного покрытия зависит от класса дороги (таб. 1).

Светильники, используемые ООО «Орловский энергосбыт» для установки на улицах населенных пунктов, имеют белый нейтральный цвет свечения. Исследования показали, что видимость дороги с таким типом свечения значительно выше по сравнению с белым холодным или наоборот желтым цветом светового потока. Белый цвет вдвое улучшает периферическую видимость дороги, что на 25 % снижает необходимость экстренного торможения.

Важно также верно определить высоту подвеса и нацеленность светильников, учесть угол наклона опор, оценить возможность ослепления участников дорожного движения.

При проведении подготовительных мероприятий производится распределение светильников по мощности в зависимости от загруженности и оживленности дорог, вдоль которых установлены опоры освещения: например, на перекрестках и пешеходных переходах устанавливаются светильники мощностью 100-120 Вт для обеспечения необходимой освещенности и улучшения видимости водителями других участников

дорожного движения. На отдельных улицах устанавливаются сдвоенные светильники – в целях увеличения площади рассеивания светового потока.

С учетом множества факторов для разных видов улиц выбираются оптимальные типы световых приборов.

Экономическая эффективность реализации энергосервисных контрактов

С 2017 года, когда, ООО «Орловский энергосбыт» начало работу по реализации энергосервисных контрактов, выполнено уже десять проектов по модернизации уличного освещения.

Таблица 2 - Перечень объектов, где ООО «Орловский энергосбыт» реализованы энергосервисные контракты

| № п/п | Наименование объекта (системы уличного освещения) | Срок действия контракта | Количество установленных светильников | Экономия электроэнергии в процентах после реализации контракта |
|-------|--|-------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | г. Новосиль | 63 месяца | 348 | 70% |
| 2 | пгт. Змиевка | 72 месяца | 411 | 72% |
| 3 | пгт. Залегощь | 60 месяцев | 313 | 70% |
| 4 | городское поселение Хомутово | 72 месяца | 314 | 73% |
| 5 | пгт. Верховье | 72 месяца | 558 | 72% |
| 6 | г. Дмитровска | 72 месяца | 379 | 73% |
| 7 | г. Ливны (1 этап) | 72 месяца | 600 | 60% |
| 8 | Беломестненское сельское поселение Ливенского района Орловской области | 60 месяцев | 148 | 74% |
| 9 | Крутовское сельское поселение Ливенского района Орловской области | 60 месяцев | 156 | 68% |
| 10 | г. Ливны (2 этап) | 84 месяца | 202 | 70% |

Для определения динамики потребления электроэнергии до и после реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности систем наружного освещения используется расчетно-измерительный способ [3]. Чтобы сравнить объем электроэнергии в натуральном выражении: в базовом (до энергосервисных мероприятий) и отчетном (по завершении модернизации освещения) периодах, используется следующая формула:

$$W_{\text{нар}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{нар}} \cdot P_{\text{нар.расчет}} \text{ (кВт}\cdot\text{ч)},$$

где: i – порядковый номер категории участка; n – количество категорий участков; $T_{\text{нар}}$ – количество часов работы системы наружного освещения, ч; $P_{\text{нар.расчет}}$ – мощность световых приборов на участках i -й категории, кВт.

При этом количество, часов работы световых приборов системы наружного освещения определяется на основании графика его работы, а мощность светильников - по контрольной выборке однотипных световых приборов в объеме 10% от всех установок с одинаковыми техническими характеристиками, количество которых при этом не должно превышать 100 штук.

Мощность светильников в отчетном и базовом периодах определяется на основе измерений, которые проводятся не ранее, чем через 100 часов работы с момента их установки и не ранее, чем через один час после включения светового прибора.

Мощность световых приборов на участках i -й категории ($P_{iнар.расчет}$) в базовом и отчетном периоде определяется по формуле:

$$P_{iнар.расчет} = \sum_{j=1}^m P_{iнар} \text{ (кВт)}$$

где: j – порядковый номер типа световых приборов (световых приборов с одинаковыми техническими характеристиками); m – количество типов световых приборов; $P_{jнар}$ – суммарная мощность световых приборов j -го типа, кВт.

Если в процессе фиксации уровня освещенности в базовом периоде выясняется, что он не соответствует установленным нормам или что имеются неработающие светильники, вместо мощности световых приборов на участках i -й категории ($P_{iнар.расчет}$) в формуле применяется следующий расчет:

$$P_{iб.нар.приведен} = \begin{cases} P_{iб.нар.сумм}, & \text{если } E_{iнар.норм} \leq E_{iнар.расчет} \\ P_{iб.нар.сумм} \cdot \frac{E_{iнар.норм}}{E_{iнорм.расчет}}, & \text{если } E_{iнар.норм} > E_{iнар.расчет}, \text{ (кВт}\cdot\text{ч)} \end{cases}$$

где: i – порядковый номер категории участка; $P_{iб.нар.сумм}$ – суммарная мощность работающих и неработающих световых приборов на участках i -й категории, кВт; $E_{iнар.норм}$ – нормативный уровень освещенности на участках i -й категории, зафиксированной в санитарных нормах и правилах, люкс; $E_{iнар.расчет}$ – средний уровень освещенности на участках i -й категории, рассчитанный с учетом мощности неработающих световых приборов, люкс.

Исходя из актуального состояния наружного освещения во многих населенных пунктах применение последней формулы, учитывающей возможность отсутствия осветительных приборов на некоторых участках территории, является частым.

Законодательство [4] защищает заказчика (муниципалитет) от изменения цены контракта в течение срока его действия. Для демонстрации расчета затрат и выгод заказчика возьмем в качестве примера реальные условия контракта с одним из среднестатистических муниципальных образований Орловской области.

Начальная (максимальная) цена энергосервисного контракта определяется как произведение:

- объема потребления энергетического ресурса (электрической энергии) за прошедший год;
- стоимости единицы энергетического ресурса (действующего тарифа) на дату объявления отбора исполнителей;
- минимального целого количества лет, составляющих срок исполнения контракта.

В нашем примере объем электроэнергии, потребленной муниципальным образованием за прошедший год, равен 119 571,50 кВт·ч/год. Стоимость единицы потребленного ресурса составила 8,76 руб., а целое количество лет исполнения контракта - 7 лет.

Таким образом, начальная максимальная цена равна:

$$119\,571,50 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \times 8,76 \text{ руб.} \times 7 \text{ лет} = 7\,332\,124,38 \text{ руб.}$$

Модернизация наружного освещения благодаря более низкому потреблению электроэнергии новыми светильниками сокращает расходы на оплату ресурса. Так, было высчитано, что минимальный объем электроэнергии в натуральном выражении за весь период действия контракта должен составить не менее 167 400,10 кВт/ч., что в денежном выражении соответствует 1 466 424,88 руб.

Полученная экономия, как правило, распределяется следующим образом: 10% остается в распоряжении заказчика (администрации муниципального образования), 90% поступает на счет энергосервисной компании для возмещения произведенных затрат.

Таким образом, муниципальное образование как заказчик энергосервисного контракта не только не изыскивает дополнительные средства в бюджете для заказа услуг по модернизации освещения, но и получает по итогу выполнения работ:

- экономичное, надежное, долговечное оборудование в собственности;
- значительное снижение затрат на электроэнергию;
- дополнительную выгоду в денежном выражении;
- повышение качества жизни граждан, проживающих в населенном пункте, и вытекающее из этого снижение социальной напряженности;
- создание более безопасных условий для всех участников дорожного движения;
- улучшение эстетической составляющей восприятия населенного пункта.

В целом динамика оплаты по договорам энергоснабжения в части уличного освещения в населенных пунктах, где установлено энергосберегающее оборудование, демонстрирует эффективность энергосервисного контракта. Дебиторская задолженность муниципальных образований снижается. Для сравнения взяты периоды «июль» и «январь» в период до модернизации уличного освещения и после выполнения работ. В абсолютном большинстве случаев платежная дисциплина муниципальных образований в отношении уличного освещения повысилась.

Для ООО «Орловский энергосбыт» как гарантирующего поставщика электроэнергии на территории региона это означает частичное решение проблем с неплатежами и в перспективе – уменьшение энергопотребления на территориях, где реализованы энергосервисные контракты, что может служить профилактикой невыполнения обязательств муниципальных образований по оплате потребленного ресурса. В свою очередь своевременная оплата электроэнергии потребителями способствует выполнению производственных программ электросетевых компаний: поддержанию в нормативном состоянии объектов энергокомплекса региона, строительству новых линий электропередач и центров питания.

Динамика дорожно-транспортных происшествий в регионе

Насколько нам удалось выяснить, специальных исследований о влиянии освещенности на аварийность на дорогах местного значения в Орловской области не проводилось. В открытых источниках имеется информация об общей динамике аварийности в регионе. Так, к примеру, в соответствии с официальной статистикой сайта ГИБДД, аварийность на дорогах региона в 2017 году уменьшилась на 21% по сравнению с 2016 годом, в 2018 году - на 23,2% к 2017 году, в 2019 году – на 13% к 2018 году, в 2020 году – на 12,2% меньше, чем годом ранее [7-9].

Несомненно, снижение аварийности на дорогах является результатом комплексного подхода к профилактике ДТП. Это и установка приборов видеofиксации, рейдовые и штрафные мероприятия. Однако важно отметить, что работа, которая ведется в рамках федеральных проектов «Безопасные и качественные дороги» и «Жилье и городская среда», предполагает, в том числе усовершенствование уличного освещения. Считаем, что модернизация освещения дорог в населенных пунктах и на дорогах местного значения стала одним из факторов снижения количества дорожно-транспортных происшествий.

Выводы

За четыре года, ООО «Орловский энергосбыт» выполнило десять контрактов по модернизации уличного освещения, тем самым поспособствовав росту качества жизни населения районных центров и сельских поселений региона. Для жителей освещенные улицы в темное время суток – самое очевидное преимущество от реализации энергосервисных контрактов. Для водителей главное – улучшение видимости пешеходов и особенностей дорожного полотна. Для муниципальных образований, которые, как правило, находятся в стесненных финансовых обстоятельствах, в первую очередь важно отметить снижение

нагрузки на бюджет ввиду отсутствия необходимости дополнительного выделения средств на внедрение энергоэффективных технологий в наружном освещении. Энергосистема региона получает преимущества благодаря повышению способности муниципальных образований к своевременной оплате потребленного ресурса, что положительно сказывается на возможности модернизации объектов электросетевого хозяйства. Таким образом, энергосервисный контракт способствует решению многих острых задач и профилактике правонарушений в дорожно-транспортной и экономической сферах.

На сегодняшний день еще значительная часть городских и сельских территорий не имеет качественного наружного освещения. Это актуальная проблема и объемная задача. Для достижения ожидаемого результата необходима большая подготовительная работа, участниками которой должны быть совместно представители власти, ГИБДД, энергосервисных компаний и общественных организаций. Только в этом случае, при взаимной заинтересованности в высоком результате работы удастся достичь и социального, и экономического эффекта от выполнения поставленных задач по усовершенствованию системы уличного освещения.

Список литературы

1. ГОСТ Р 55706-2013. Национальный стандарт Российской Федерации «Освещение наружное утилитарное».
2. Федеральный закон от 06.10.2003 г. № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации».
3. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 04.02.2016 № 67.
4. Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд».
5. В.Д. Никитин, К.П. Толкачева «Световое поле в установках наружного освещения»: Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 113 с.
6. Энергосервисные услуги // ООО «Орловский энергосбыт». URL: <https://www.interra-orel.ru/services-legal/energoserwis-uslugi/> (дата обращения 02.11.2021)
7. В Орловской области аварийность в 2018 году снизилась на 23,2 % по сравнению с минувшим годом // Портал Орловской области. 2018 г. 28 мая. URL: <https://orel-region.ru/index.php?head=1&op=news&unit=12631> (дата обращения 03.11.2021).
8. На расширенном заседании коллегии УМВД РФ по Орловской области подвели итоги работы ведомства за 2019 год // Портал Орловской области. 2020. 21 янв. URL: <https://orel-region.ru/index.php?head=1&op=news&unit=16303> (дата обращения 03.11.2021).
9. В 2020 году в Орловской области произошло 5359 ДТП // Вечерний Орел, первая орловская электронная газета. 2027. 21 янв. URL: https://vechor.ru/accident/v-2020-godu-v-orlovskoj-oblasti-proizoshlo-5359-dtp?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения 10.11.2021).

Павлов Юрий Васильевич – начальник управления по коммерческим услугам ООО «Орловский энергосбыт». Россия, 302020, г. Орел, ул. Полесская, 28К, e-mail: pavlov_yv@interra-orel.ru. 8 (4862) 54-59-55.

Соколова Елена Викторовна – руководитель направления группы корпоративных коммуникаций и PR ООО «Орловский энергосбыт». Россия, 302020, г. Орел, ул. Полесская, 28К, e-mail: sokolova_evi@interra-orel.ru. 8 (4862) 54-59-90.

UDC 64-51

SOME ASPECTS OF THE CHOICE OF OUTDOOR LIGHTING IN THE SETTLEMENTS OF THE OREL REGION AND THE EFFECTIVENESS OF ITS MODERNIZATION

Pavlov Yu. V., Sokolova E. V.

Russia, Orel, LLC Orlovskiy energosbyt

The article target is summarizing information about outdoor lighting in terms of the choice of optimal equipment, economic efficiency, citizens, safety and social tension reduction. We analyzed the data, reviewed the legal

framework, and the parameters for calculating savings. All this confirms the expediency of using the energy service contract to solve the problem of under-lighting of settlements with a lack of funding.

Key words: outdoor lighting, street lighting, lighting device, LED lamp, energy service contract, LLC Orlovsky Energosbyt.

Bibliography

1. GOST R 55706-2013. The national standard of the Russian Federation "Outdoor utilitarian lighting".
2. Federal Law No. 131-FZ of 06.10.2003 "On the General principles of the Organization of Local Self-government in the Russian Federation".
3. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 67 dated 04.02.2016.
4. Federal Law No. 44-FZ dated 05.04.2013 "On the contract system in the field of procurement of goods, works, services for State and Municipal needs".
5. V.D. Nikitin, K.P. Tolkacheva "Light field in outdoor lighting installations": Textbook. - Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2010. - 113 p.
6. Energy service services // LLC "Orlovsky energosbyt". URL: <https://www.interrao-orel.ru/services-legal/energoservis-uslugi/> (accessed 02.11.2021)
7. In the Orel region, the accident rate in 2018 decreased by 23.2% compared to last year // Portal of the Orel region. 2018 May 28. URL: <https://orel-region.ru/index.php?head=1&op=news&unit=12631> (accessed 03.11.2021).
8. At an expanded meeting of the Board of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation in the Orel region, the results of the department's work for 2019 were summed up // Portal of the Orel region. 2020. Jan 21. URL: <https://orel-region.ru/index.php?head=1&op=news&unit=16303> (accessed 03.11.2021).
9. In 2020, 5,359 road accidents occurred in the Orel region // Evening Oryol, the first Oryol electronic newspaper. 2027. 21 Jan. URL: https://vechor.ru/accident/v-2020-godu-v-orlovskoj-oblasti-proizoshlo-5359-dtp?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (accessed 10.11.2021).

Pavlov Yuri Vasilievich - Head of the Commercial Services Department of LLC Orlovskiy energosbyt. Russia, 302020, Orel, st. Polesskaya, 28K, e-mail: pavlov_yv@interrao-orel.ru. 8 (4862) 54-59-55.

Sokolova Elena Viktorovna - Head of the corporate communications and PR group of LLC Orlovskiy energosbyt. Russia, 302020, Orel, st. Polesskaya, 28K, e-mail: sokolova_evi@interrao-orel.ru. 8 (4862) 54-59-90.

УДК 620.9: 632.15

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МИКРО-ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.

Россия, г. Москва, НИУ-Московский энергетический институт

В областях Сибири и Дальнего Востока, а также в горных районах Средней Азии и Кавказа, Казахстане и т.д. очень невысокая плотность населения на больших, слабо освоенных в промышленном отношении территориях. Поэтому, даже имея сформированную энергетическую систему, есть большое количество удаленных потребителей малой мощности без электроэнергетики. В данной работе представлен анализ конструкций микро-гидроэлектростанций для электроснабжения потребителей малой мощности.

Ключевые слова: микро-гидроэлектростанция, потребители малой мощности, дальность электропередачи.

В истории создания гидроэлектростанций (ГЭС) важную роль играли микро-гидроэлектростанции. Этот класс гидроэлектростанций был первым прототипом больших гидротурбин, которые сейчас применяют при строительстве ГЭС. Микро-гидроэлектростанции относятся к возобновляемым источникам энергии, их, возможно, эффективно использовать для электроснабжения удаленных потребителей малой мощности [1].

Энергетический потенциал водотока малых равнинных и горных рек можно разделить на два типа: 1) кинетическая энергия водотока; 2) потенциальная энергия водотока. Кинетическую энергию водотока используют гирляндные микро-гидроэлектростанции конструкции Блинова Б.С., плоскоподъемная Логинова М.И. и триллексная вертикальная Новикова Ю.М., капсульные гидроагрегаты, торцевые мембранные. Все эти типы микро-гидроэлектростанций

устанавливаются непосредственно в водотоке. Потенциальную энергию водотока используют русловые, рукавные и деривационные микро-гидроэлектростанции [2].

Строительство микро-гидроэлектростанций, как правило, ограничивается мощностью до 100 кВт. Это ограничение имеет условный характер, но данному ограничению придерживаются многие зарубежные страны, а также Российская Федерация. Стоит заметить, что мощность одной гидротурбины микро-гидроэлектростанции, как правило, не превышает 50 кВт. За рубежом хорошо развито комплексное решение микро-гидроэлектростанций в виде контейнерного типа. Например, компании «Voith», «Kössler» поставляют комплексные решения гидравлических конструкций и электромеханического оборудования в разные страны. Их оборудование сделано, испытанно на предприятии и доставляется к месту установки в собранном виде, что серьезно облегчает монтажные работы.

Очень часто при строительстве новых микро-гидроэлектростанций в Российской Федерации применяют классические гидротурбины рис.1. Проведенные исследования по соотношению размеров гидротурбин, стоимости производства, начального водонапора и сооружения здания микро-гидроэлектростанций показывают, что для электроснабжения потребителей малой мощности с применением генераторов малой мощности классические гидротурбины не всегда являются оптимальным решением.

Классические гидротурбины, устанавливаемые в микро-гидроэлектростанциях для малых равнинных и горных рек, требуют больших финансовых затрат в производстве и на строительство гидротехнических сооружений, а также трудны по устройству. Для применения других типов гидротурбин необходимо строительство плотин для увеличения начального напора, что приведет к затоплению близлежащей территории. Для строительства плотин необходимо обоснование с экономической и экологической точек зрения.

Выводы

Исследования по применению энергетического потенциала водотока малых равнинных и горных рек для микро-гидроэлектростанций в Российской Федерации не проводились. Но предварительный анализ показывает, что применение микро-

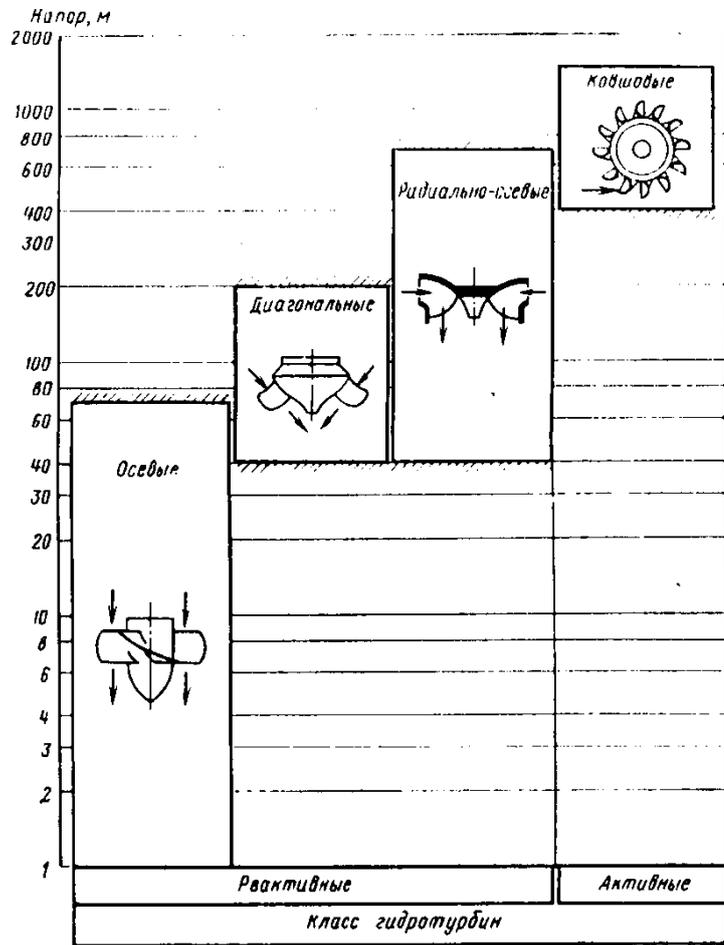


Рисунок 1 – Применение классических гидротурбин в зависимости от напора

гидроэлектростанций для электроснабжения удаленных потребителей малой мощности является хорошей альтернативой дизельным генераторам по многим экономическим аспектам. К сожалению, в Российской Федерации по сравнению с зарубежными странами, отсутствуют рекомендации и методологические положения по применению микро-гидроэлектростанций. В данной работе представлен анализ конструкций микро-гидроэлектростанций для электроснабжения потребителей малой мощности. Анализ показывает, что применение классических турбин для низконапорных водотоков ограничивается реактивно-осевым типом, что не всегда является оптимальным решением.

Список литературы

1. Михайлов Л.П., Фельдман Б.Н., Марканов Т.К. и др. Малая гидроэнергетика – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
2. Блинов Б.С. Гирляндная ГЭС – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 64 с.

UDC 620.9: 632.15

ANALYSIS OF MICRO-HYDROELECTRIC POWER STATION STRUCTURES FOR POWER SUPPLY OF LOW POWER CONSUMERS

Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R.

Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute

In the regions of Siberia and the Far East, as well as in the mountainous regions of Central Asia and the Caucasus, Kazakhstan and so on, there is a very low population density on big and industrially undeveloped areas. That is why, even having the formed electric system, there is a large number of remote low power consumers without electrical power. The present work presents the analysis of micro-hydroelectric power station structures for power supply of low power consumers.

Keywords: micro-hydroelectric power station, low power consumers, distance of electro transmission

Bibliography

1. Mikhailov L.P., Feldman B.N., Markanov T.K. and others Malaya Gidroenergetika, edited by Mikhailov L.P. – М.: Energoatomizdat Publ., 1989. – p. 184.
2. Blinov B.S. Girlyandnaya GES – М.-Л.: Gosenergoizdat Publ., 1963. – p. 64.

УДК 621.3.052.6

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ УМНЫЙ ДОМ, ЗАПИТЫВАЕМОЙ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Кудрявцев А.Е., Зацепин Е.П.

Россия, г. Липецк, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)

Рассмотрена концепция технологии умный дом, построенной на использовании возобновляемых источников энергии с применением различных датчиков движения, освещения и питаемой от сети постоянного тока с внедрением накопителей электрической энергии. Исследуется эффективность внедрения системы с учетом различных форм сравнения с существующими традиционными аналогами, приводится макет схематичной версии электроснабжения дома, а также концепция сети постоянного тока.

Ключевые слова: умный дом, система постоянного тока, энергоэффективность, альтернативные источники энергии.

За прошедшие десять-пятнадцать лет было зафиксировано большое количество потерь электрической энергии, которые возникают, когда ее необходимо доставить до непосредственно потребляемой нагрузки в сетях низкого напряжения из-за увеличивающегося числа нелинейной нагрузки переменного тока напряжением до 1000 В. Причиной снижения пропускной способности проводников электрической энергии и

непосредственно преобразующих силовых трансформаторов является реактивная мощность, присутствующая в сетях переменного тока. Учитывая данный факт, можно использовать провода, поперечное сечение которых будет равно таким же или больше, но осуществляя более эффективную передачу энергии на постоянном токе. Это обусловлено еще и отсутствием, так называемого поверхностного эффекта, что дает возможность задействовать провод по максимуму. Стоит также упомянуть о вопросе безопасности, ведь при том же уровне напряжения, а именно при 550 В используемый в современных реалиях переменный ток может оказать более губительное воздействие. Далее несколько параметров, показывающих несомненные положительные стороны системы постоянного тока:

- не нужно осуществлять синхронизацию элементов сети;
- альтернативные источники энергии способны результативно интегрироваться в систему;

- электромагнитные излучения оказывают менее пагубное воздействие;

- надежность сети обладает более высокими показателями.

Говоря о системах освещения, спроектированных на основе постоянного тока, можно отметить также несколько неоспоримых плюсов:

- возможность экономить электрическую энергию в размере 50 % и более;

- уменьшенная цена и более высокая надежность светильников, которыми можно управлять;

- длительность службы ламп существенно превышает стандартный срок службы более чем в 2 раза;

- отсутствие так называемых пусковых токов линий освещения;

- возможность быстрой диагностики освещения.

Конечно, для того, чтобы придать системам постоянного тока ключевую роль необходимо достаточно времени для создания определенной базы документов и нормативов, а также внедрения стандартов и электрического оборудования.

Как известно, в «умных домах» современного поколения присутствует большое количество электрического оборудования, которое работает в режиме контроля и управления, обеспечивая комфортную атмосферу проживания. Данные технологии способны управлять сигнализацией, самостоятельно блокируют двери дома, а также следят за оптимальным температурным режимом. Работу устройств можно контролировать, используя современные гаджеты, а также специально устанавливаемые сенсорные панели. Не смотря на то, что к современным домам подключается сеть переменного напряжения, некоторое количество электрического оборудования в этот момент работает на постоянном токе. В дальнейшем системы освещения также будут работать на постоянном токе. Именно поэтому в будущем технология умный дом сможет использовать подобную систему электроснабжения [1].

Говоря о системе умного дома, подразумевается также использование альтернативных возобновляемых источников энергии, к примеру, солнечных станций и батарей, так как солнце вырабатывает энергию практически ежедневно. Несмотря на это фотоэлектрические станции и основная сеть не обладают абсолютной совместимостью. К тому же, произведенное солнечными панелями электричество нельзя применять, если предварительно не трансформировать в привычную величину переменного напряжения 230 вольт и 50 Гц. Это стало возможным благодаря специальным инверторам, но даже при имеющейся эффективности определенная часть мощности теряется. Поэтому стоит вопрос об эффективном использовании подобных станций наряду с основной питающей сетью. Владельцы установок вполне могут рассматривать систему питания, при которой вырабатываемый солнечными батареями постоянный ток будет использоваться для собственных нужд как независимое электроснабжение, запасая при этом избыточное количество энергии в буферной батарее.

Как известно отличие постоянного тока от переменного заключается в отсутствии какой-либо величины реактивной мощности, благодаря чему использование проводника, по которому протекает, только активная мощность становится более энергоэффективным. При наличии напряжения 550 В постоянный ток в 2 раза безопаснее переменного тока частоты 50 Гц [2]. Домашняя сеть, представленная на рисунке 1 и построенная на основе DC – сети, имеет все шансы, чтобы возглавить лидирующее положение и стать основной сетью для рассматриваемой технологии. Электроснабжение умного дома от сети постоянного тока (синяя цепь), сеть переменного тока (красная цепь), используемая для питания электрического оборудования, потребляющего значительно большее количество энергии и заряжающая аккумуляторы.



Рисунок 1 – Электроснабжение умного дома

Концепция описанного метода электроснабжения также может быть отражена следующим образом. К выпрямительной подстанции 0,4 кВ постоянного тока подключается линия переменного тока напряжением десять или 6 кВ с присоединением к аккумуляторной батарее, которая позволяет хранить электрическую энергию во время стабильности ее потребления нагрузкой и выдачи с целью компенсации недостатка. Транспортировка энергии может осуществляться несколькими способами. Это кабельные линии, которые позволяют доставлять электрическую энергию в безопасном и экологичном ключе, нежели привычные и чаще встречаемые воздушные линии. Для избежания перенапряжения в приборах необходимо устанавливать инвертор, позволяющий преобразовывать постоянный ток в переменный. Так же устройство дает возможность самостоятельно контролировать и устанавливать величину напряжения, которая будет наиболее благоприятной для соответствующих электрических приборов. Здесь речь идет о величине напряжения 220 В или 380 В соответственно. Осуществлять контроль непосредственно за нагрузкой можно будет через WEB-портал. На рисунке 2 изображена схема рассматриваемой концепции. Зеленым цветом отражена сеть переменного тока 10(6) кВ, синий цвет используется для отображения сети постоянного тока и красным изображается наружное освещение.

Система умный дом, в свою очередь, предоставляет множество функций, которые экономят ресурсы. Свет и температурный режим в комнатах, где отсутствуют люди можно снизить до минимального уровня, что позволит затрачивать меньшее количество электрической энергии и соответственно снизить расходы. В данном случае подразумевается не просто установка специализированных экономящих электрическую энергию ламп, а именно спроектированная версия различных световых сценариев или автоматизированное освещение. Функция выключателей становится все менее востребованной в связи с наличием

управления светом у автоматики, которая отключает его, когда жильцы покидают помещение и включает при их появлении. В темное время суток для создания более комфортной атмосферы свет будет приглушенным и мягким, но в тоже время не будет создавать неудобств, для передвижения по

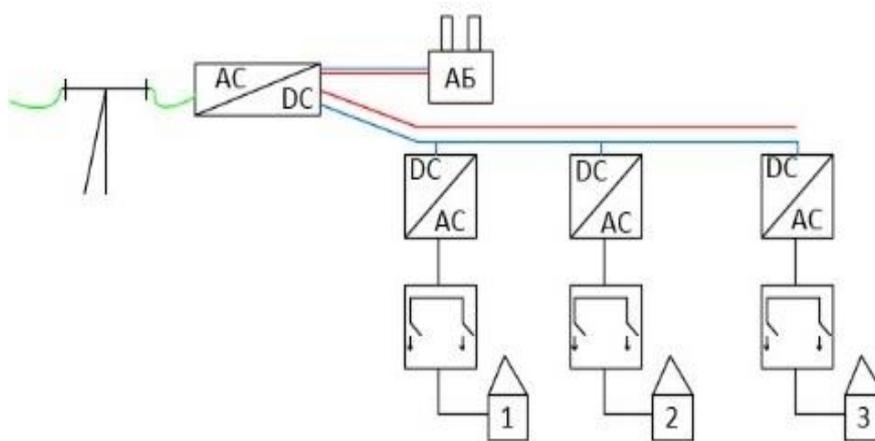


Рисунок 2– Концепция сети 0,4 кВ

комнатам. Вечером можно наблюдать оттенки, которые не нагружают зрение, а в светлое время суток более холодные тона. Работоспособность рассматриваемой системы поддерживается наличием датчиков движения, освещенности, а также самих ламп с функцией изменения уровня освещения. Как ранее уже было упомянуто управление происходит с помощью определенных алгоритмов, интегрированных в программу, поддерживаемую различными современными девайсами. Как актуальный пример можно рассмотреть установку TeslaSolarRoof и батареи PowerWall 2. Получившаяся система будет абсолютно, автономная и не будет зависеть от общей сети питания, ее стоимость будет намного превышать уже знакомые традиционные конфигурации, но цены на электрическую энергию стабильно растут, а это означает, что впоследствии данная система сможет себя окупить благодаря энергоэффективности в долгосрочной перспективе[3]. В свою очередь, потребители могут получить технологию, обеспечивающую достаточный уровень удобства и генерирующую около 9000 кВт·ч в год. Выход общей сети питания не скажется на подобной технологии.

Вопрос безопасности также закрывается установкой камер видеонаблюдения, аварийного освещения, различных датчиков. Доступна технология интеграции систем, которые дают возможность проникнуть в дом, имея электронный пропуск или же встроенный в базу отпечаток пальца.

Выводы

Таким образом, технология умного дома, построенная, на основе сети постоянного тока является достаточно перспективной альтернативой современным подходам организации электроснабжения. При отсутствии достаточного количества энергии, получаемой от солнечных станций, можно использовать стандартную сеть переменного тока, которая будет резервировать основную, и являться «зарядным устройством».

Список литературы

1. РехлинТ. Краткая история электричества, или почему умные дома питаются постоянным током// Компоненты и технологии. 2015. № 3. С. 84–86.
2. Индылова Н. В., Цыгулев Н. И., Зитляева Н. С., Кулькин Р. В. Возможность снижения потерь электроэнергии с помощью постоянного тока// Молодой исследователь Дона. 2020. № 6. С. 16–20.
3. Какаев. Р. Р. Умный дом. Новейшие технологии, применение для частного дома// Вопросы образования и науки. 2017. С. 30–34.

Кудрявцев АртемЕвгеньевич, магистрантЛПТУ,398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. E-mail: tembich001@mail.ru, тел.: +7(950)8082153

Зацепин Евгений Петрович, к.т.н., зав. кафедрой Электрооборудования ЛПТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.E-mail: ezats@mail.ru,тел.: +7(906)6879617

UDC 621.3.052.6

**THE CONCEPT OF CREATING AN ENERGY-SAVING SMART HOME TECHNOLOGY
POWERED BY A DC NETWORK BASED ON ALTERNATIVE ENERGY SOURCES**

Kudryavtsev A.E., Zatsepin E.P.

Russia, Lipetsk, Lipetsk State Technical University (LSTU)

The concept of smart home technology based on the use of renewable energy sources with the use of various motion sensors, lighting and powered by a DC network with the introduction of electric energy storage is considered. The effectiveness of the implementation of the system is investigated, taking into account various forms of comparison with existing traditional analogues a layout of a schematic version of the power supply of the house, as well as the concept of a DC network is given.

Key words: smart home, DC system, energy efficiency, alternative energy sources.

Bibliography

1. Rechlin T. A brief history of electricity, or why smart homes are powered by direct current // Components and technologies. 2015. № 3. S. 84–86.
2. Indylova N. V., Tsygulev N. I., Zitlyeva N. S., Kulkin R. V. The possibility of reducing electricity losses using direct current // Young researcher of the Don. 2020. № 6. S. 16–20.
3. Kakaev R. R., Smart home. The latest technologies, application for a private home // Education and science issues. 2017. S. 30–35.

Kudryavtsev Artem Evgenievich, Master's student of the LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: tembich001@mail.ru, tel.: +7(950)8082153

Zatsepin Evgeny Petrovich, Ph.D., head of Electrical equipment department LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: ezats@mail.ru, tel.: +7(906)6879617

**СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И
НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ**

Руководитель:

Качанов Александр Николаевич, академик АЭН РФ, Заслуженный работник высшего образования РФ, д.т.н., профессор, зав. каф., электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл

УДК 621.311.1

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ
СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Плотников Ю. В.

Россия, г. Омск, ФГБОУ ВО ОмГУПС

В работе рассмотрены вопросы влияния внешних воздействий электрической и неэлектрической природы на энергоэффективность железнодорожной системы тягового электроснабжения постоянного тока. Приведена упрощенная структурная схема системы тягового электроснабжения на основе идеальных электрических элементов, представлены основные виды внешних воздействий, рассмотрено их влияние на параметры схемы.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, энергоэффективность, электроподвижной состав, потери электроэнергии.

По итогам 2020 года доля холдинга «РЖД» в общем потреблении электроэнергии в России составила 50,26 млрд. кВт·ч., что соответствует 4,8% от всего объема потребления электроэнергии в стране [1]. При этом большая часть, а именно 43,7 млрд. кВт·ч., была израсходована непосредственно на тягу поездов, поэтому вопросы энергосбережения и энергоэффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) являются одними из наиболее актуальных, особенно в свете постоянного роста тарифов на энергоресурсы.

На рисунке 1 представлен фрагмент системы тягового электроснабжения постоянного тока, имеющий упрощенную структурную схему, состоящую из идеальных электрических элементов.

Поскольку на практике в СТЭ принимаются специальные меры, направленные на подавление высокочастотных составляющих напряжения контактной сети [2], их влияние следует считать незначительным, что позволяет исключить из схемы элементы с реактивным сопротивлением, построив ее только на основе источников постоянного напряжения и активных сопротивлений, моделирующих расход электроэнергии на тепловые потери и полезную нагрузку. Кроме того, в конструкции реальной контактной сети используются изоляторы, имеющие сравнительно низкие токи утечки, и, как следствие, низкие потери мощности на нагрев, несоизмеримые с мощностями, потребляемыми электроподвижным составом, что позволяет не учитывать влияние потерь на изоляторах в общей картине потерь электроэнергии.

Представленный фрагмент состоит из двух тяговых подстанций ТП1 и ТП2, питаемых ими трех межподстанционных зон МПЗ₁ – МПЗ₃, и четырех единиц электроподвижного состава ЭПС₁ – ЭПС₄, выполняющих перевозочную работу на этих зонах. Обе тяговые подстанции построены по одинаковой электрической схеме, и содержат по два преобразовательных агрегата, представленных источниками постоянного напряжения $E_1 – E_4$ с номинальным значением 3,3 кВ, и диодами $VD_1 – VD_4$. Диоды в этой схеме необходимы для моделирования работы выпрямительных агрегатов и исключения протекания токов через источники напряжения $E_1 – E_4$ в обратном направлении. Резисторы $R_1 – R_4$, включенные параллельно источникам, моделируют потери электроэнергии, возникающие в преобразовательных трансформаторах в режиме холостого хода. Резисторы $R_5 – R_8$ и $R_9 – R_{12}$

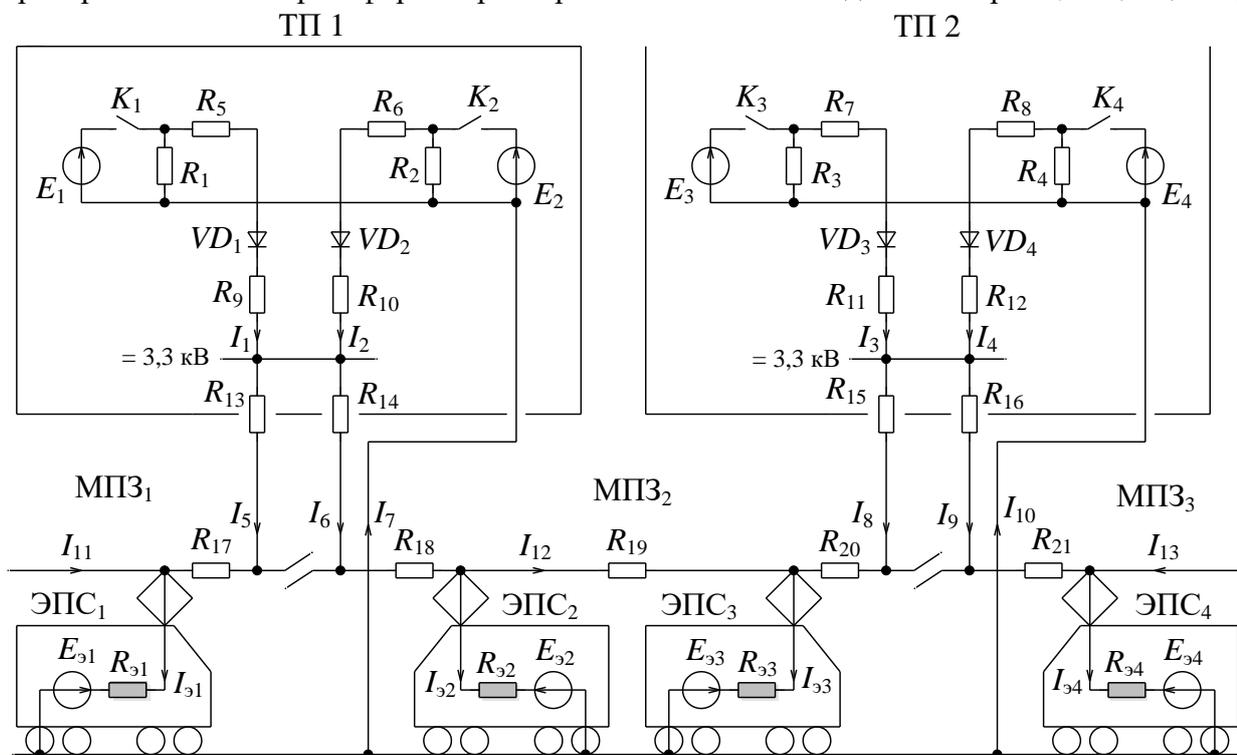


Рисунок 1 – Упрощенный фрагмент СТЭ постоянного тока из идеальных электрических элементов

включены последовательно с источниками напряжения и моделируют соответственно тепловые потери преобразовательных трансформаторов в режиме нагрузки и тепловые потери выпрямительных агрегатов. Активные сопротивления $R_{13} - R_{16}$ отражают тепловые потери, возникающие в шинах 3,3 кВ тяговых подстанций и в соответствующих фидерах контактной сети. Потери на активном сопротивлении контактного провода и прочие потери в контактной сети, возникающие в процессе ее работы, представлены сопротивлениями $R_{17} - R_{21}$. Каждая из четырех единиц подвижного состава представлена источниками постоянного напряжения $E_{31} - E_{34}$ и активными сопротивлениями $R_{31} - R_{34}$, соединенными последовательно и подключенными одним концом к контактному проводу, другим к рельсам, что полностью отражает работу локомотива в трех основных состояниях [3]:

– в режиме тяги, когда напряжение источников $E_{31} - E_{34}$, равно нулю, а сопротивления $R_{31} - R_{34}$, имеют средние значения, обеспечивающие протекание тягового тока по направлению из контактной сети в электровоз;

– в режиме горячего простоя, когда напряжение источников $E_{31} - E_{34}$, так же равно нулю, а сопротивления $R_{31} - R_{34}$, имеют высокие значения, обеспечивающие протекание тока горячего простоя так же из контактной сети в электровоз;

– в режиме рекуперативного торможения, когда напряжение источников $E_{31} - E_{34}$, находится чуть выше обычного напряжения контактной сети, а сопротивления $R_{31} - R_{34}$, имеют низкие значения, обеспечивающие протекание тока рекуперативного торможения по направлению от электровоза в контактную сеть.

Если рассмотреть представленную схему с точки зрения энергоэффективности, то очевидно, что полезная работа совершается только энергией, выделяемой на сопротивлениях $R_{31} - R_{34}$, в режимах тяги и горячего простоя, в то время как на всех остальных сопротивлениях выделяется только энергия потерь. Поэтому, для повышения энергетической эффективности, следует стремиться максимально увеличивать сопротивления $R_1 - R_4$, и максимально уменьшать сопротивления $R_5 - R_{21}$.

Оптимальным режимом работы СТЭ следует считать режим, при котором:

- сопротивления $R_1 - R_4$ максимальны;
- сопротивления $R_5 - R_{21}$ минимальны;
- напряжения $E_1 - E_4$ подобраны так, что все тяговые токи протекают по наиболее коротким путям.

Под внешними воздействиями на систему тягового электроснабжения следует понимать любые воздействия электрической или неэлектрической природы, поступающие извне и изменяющие режимы работы СТЭ [4]. Можно выделить много различных внешних воздействий и их комбинаций, но основными из них являются следующие.

1. Изменение напряжения сети внешнего электроснабжения, или величины районной нагрузки. В классическом случае под сетью внешнего электроснабжения принято понимать сеть, которая поставляет энергию на тяговую подстанцию. Как правило, это трехфазная сеть напряжением 110 либо 220 кВ, напряжение которой поступает на силовые понижающие трансформаторы, находящиеся в составе оборудования тяговой подстанции, и формирующие выходное трехфазное напряжение значением 10 или 6 кВ. Это напряжение поступает на вход преобразовательных трансформаторов, формирующих напряжение значением 3,3 кВ для тяговых выпрямительных агрегатов и на трансформаторы районной нагрузки, формирующие напряжение значением 0,4 кВ, от которого, питаются различные районные потребители. Любые изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо колебания мощности, потребляемой районной нагрузкой, приводят к изменениям входного напряжения преобразовательных трансформаторов, и, как следствие, к изменению выходного напряжения выпрямительно-преобразовательных агрегатов, подающих напряжение в контактную сеть [5].

Таким образом, влияние изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо влияние изменения величины районной нагрузки приводит к изменению выходного напряжения источников $E_1 - E_4$ как в большую, так и в меньшую сторону.

2. Изменение оперативной поездной обстановки. Оперативная поездная обстановка включает в себя множество факторов и может изменяться в различных направлениях. В частности, изменения тяговой нагрузки может быть обусловлено различными массами поездов, проходящих через межподстанционную зону за одни сутки, изменениями в графике движения поездов, который вместо равномерной загрузки может состоять из отдельных пакетов, и продолжительных окон между ними [6]. Так же на оперативную поездную обстановку влияет стиль вождения машинистов, производящих работу на зоне, которые могут по-разному осуществлять разгон, использовать либо не использовать рекуперативное торможение взамен пневматического, могут по-разному поддерживать необходимую скорость движения, либо изменением выбранной позиции контроллера машиниста, либо используя ослабление поля тяговых двигателей при неизменной позиции контроллера. Так же в процессе движения могут случаться различные нештатные ситуации, приводящие к отклонениям от нормативного графика движения поездов. Применительно к рассматриваемой схеме, любое изменение оперативной поездной обстановки приводит к изменениям значений сопротивлений $R_{31} - R_{34}$, $R_{17} - R_{21}$, и изменениям выходного напряжения источников $E_{31} - E_{34}$.

3. Изменение нормальных режимов работы со стороны энергодиспетчера. В процессе работы СТЭ по сигналам энергодиспетчера может осуществляться как изменение электрических режимов работы оборудования, так и изменение схемы соединения его отдельных элементов [7]. В частности, по этим сигналам могут быть изменены режимы работы коммутационных аппаратов линейных устройств постов секционирования, пунктов параллельного соединения и секционных разъединителей контактной сети (условно не показанных на схеме), что не нарушит питание межподстанционной зоны, но может значительно изменить ее работу в энергетическом плане. Применительно к схеме это вызовет изменение сопротивления резисторов $R_{17} - R_{21}$. Кроме того, энергодиспетчер может подключать или отключать отдельные преобразовательные агрегаты ТП, коммутируя выключатели $K_1 - K_4$, изменяя всю структуру схемы и вызывая тем самым как изменение выходного напряжения тяговых подстанций, так и изменение их выходного сопротивления.

4. Возникновение вынужденных и аварийных режимов работы под влиянием внешних факторов. При возникновении различных нештатных ситуаций, например таких, как короткие замыкания, обрывы контактного провода на межподстанционной зоне и пр., под действием систем защиты и автоматики нормальные режимы работы оборудования изменяются на вынужденные или аварийные [8]. При этом возможно изменение состояния и характеристик всех элементов схемы, включая источники $E_{31} - E_{34}$ и сопротивления $R_{31} - R_{34}$ электроподвижного состава.

5. Краткосрочное и долгосрочное влияние погодных условий. Атмосферные осадки, температура окружающей среды и прочие природные факторы так же оказывают влияние на состояние элементов системы тягового электроснабжения [9]. Резкие изменения погодных условий, такие как снег, дождь, понижение температуры способны вызвать обледенение контактного провода. Повышенная влажность, совместно с колебаниями температуры окружающего воздуха, периодически пересекающими нулевую отметку, в долгосрочной перспективе способны вызвать возникновение коррозионных явлений, приводящих к постепенному увеличению сопротивлений шин тяговых подстанций и элементов контактной сети. На рассматриваемой схеме это приводит к увеличению значений «последовательных» сопротивлений $R_5 - R_{16}$ и $R_{17} - R_{21}$.

Таким образом, все рассмотренные основные внешние воздействия, не зависимо от природы их возникновения, приводят к изменениям характеристик элементов рассматриваемой схемы за исключением, разве что, сопротивлений резисторов $R_1 - R_4$, моделирующих потери электроэнергии холостого хода преобразовательных трансформаторов. Значения этих потерь в основном определяются конструкцией трансформаторов и практически не зависят от влияния внешних факторов. В остальном, внешние воздействия практически всегда способны нарушить оптимальный режим работы

системы тягового электроснабжения постоянного тока, что требует принятия специальных мер по устранению их негативного влияния.

Список литературы

1. Белозеров, О. В. Доклад генерального директора - председателя правления открытого акционерного общества "Российские железные дороги" О.В. БЕЛОЗЕРОВА на итоговом заседании правления ОАО "РЖД" / О. В. Белозеров // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 7-16.
2. Яковлева, Т. Д. Нормализация напряжений высших гармоник на нагрузке, подключенной к сети, питающей тяговые нагрузки / Т. Д. Яковлева, С. Г. Тигунцев // Энергетика в современном мире: VIII Международная заочная научно-практическая конференция, Чита, 11–15 декабря 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет». – Чита: Забайкальский государственный университет, 2017. – С. 143-147.
3. Кейно, М. Ю. Современный подход к исследованию режимов работы локомотивов / М. Ю. Кейно // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 1. – С. 36-38.
4. Бочарников, Ю. В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами / Ю. В. Бочарников // Технологии электромагнитной совместимости. – 2008. – № 1(24). – С. 45-55.
5. Никифоров, М. М. Влияние условий сопряжения систем внешнего и тягового электроснабжения на уровень потерь электроэнергии в тяговой сети / М. М. Никифоров, Ю. В. Кондратьев, А. Л. Каштанов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 19–21 мая 2005 года. – Красноярск: Гротеск, 2005. – С. 101-104.
6. Мороз, А. И. К теории движения железнодорожного транспорта с внеграфиковыми поездами / А. И. Мороз // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – № 3. – С. 12-15.
7. Чекулаев, В. Е. Энергодиспетчер - главный управляющий электроустановками дистанции электроснабжения / В. Е. Чекулаев, Е. Н. Горожанкина // Локомотив. – 2014. – № 8(692). – С. 39-41.
8. Тимофеев, А. Н. Моделирование аварийных режимов с целью решения основных проблем при проектировании тяговой подстанции / А. Н. Тимофеев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 15–16 марта 2018 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2018. – С. 484.
9. Перспективы электрической тяги // Железные дороги мира. – 2018. – № 5. – С. 59-64.

Плотников Юрий Викторович, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35. E-mail: ra9mjg@mail.ru, тел.: +7(913) 988-45-20

UDC 621.311.1

INFLUENCE OF EXTERNAL IMPACTS ON THE EFFICIENCY OF THE DIRECT CURRENT TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Plotnikov Y.V.

Russia, Omsk, FGBOUVO OmGUPS

The paper considers the issues of the influence of external influences of electrical and non-electrical nature on the energy efficiency of the railway system of direct current traction power supply. A simplified block diagram of a traction power supply system based on ideal electrical elements is presented, the main types of external influences are presented, and their influence on the parameters of the circuit is considered.

Key words: traction power supply system, energy efficiency, electric rolling stock, power losses.

Bibliography

1. Belozеров O.V. Report of the General Director - Chairman of the Board of the Open Joint Stock Company "Russian Railways" O.V. БЕЛОЗЕРОВ at the final meeting of the board of JSC "Russian Railways" / O.V. Belozеров // Railway transport. - 2021. - No.3. - P. 7-16.

2. Yakovleva T. D. Normalization of voltages of higher harmonics on a load connected to the network supplying traction loads / T. D. Yakovleva, S. G. Tiguntsev // Energy in the modern world: VIII International Correspondence Scientific and Practical Conference, Chita, December 11-15, 2017 / Ministry of Education and Science of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Trans-Baikal State University". - Chita: Trans-Baikal State University, 2017.- P. 143-147.
3. Keino M. Yu. Modern approach to the study of locomotive operating modes / M. Y. Keino // Automation in industry. - 2007. - No.1. - S. 36-38.
4. Bocharnikov Y. V. Modeling of the traction power supply system for the assessment of electromagnetic compatibility with adjacent systems / Y. V. Bocharnikov // Technologies of electromagnetic compatibility. - 2008. - No.1 (24). - S. 45-55.
5. Nikiforov M. M. Influence of the conditions of conjugation of external and traction power supply systems on the level of power losses in the traction network / MM Nikiforov, Y. V. Kondratyev, A.L. Kashtanov // Resource-saving technologies in railway transport: Materials All-Russian scientific and technical conference with international participation, Krasnoyarsk, May 19-21, 2005. - Krasnoyarsk: Grotesk, 2005.- S. 101-104.
6. Moroz AI Towards the theory of railway transport with off-schedule trains / AI Moroz // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. - 2013. - No.3. - S. 12-15.
7. Chekulaev V. E. Energy dispatcher - chief manager of electrical installations of the power supply distance / V. E. Chekulaev, E. N. Gorozhankina // Locomotive. - 2014. - No.8 (692). - S. 39-41.
8. Timofeev A. N. Modeling of emergency modes in order to solve the main problems in the design of a traction substation / A. N. Timofeev // Radio electronics, electrical engineering and energy: Abstracts, Moscow, March 15-16, 2018. – Moscow: Limited Liability Company "Center for Printing Services" RADUGA ", 2018. - P. 484.
9. Prospects for electric traction // World Railways. - 2018. - No.5. - S. 59-64.

Yuri V. Plotnikov, postgraduate student of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State University of Railways, Russia, 644046, Omsk, Marksa Ave., 35. E-mail: ra9mjr@mail.ru, tel.: +7 (913) 988-45-20

УДК 631.192

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Королева Т.Г., Филатенко М.А.

*Россия, г. Орел, Орловский государственный технический
университет имени И.С. Тургенева*

В статье выполнен анализ потребления электрической энергии на нужды освещения в различных странах мира и в различных отраслях экономики подтверждает актуальность экономии электрической энергии в системах освещения. Исследовано влияние отклонения напряжения на величину потребляемой активной мощности и световую отдачу разных типов ламп. Результаты работы позволяют на практике производить энергоэффективный выбор источников света с учетом показателей электропотребления при изменении величины напряжения.

Ключевые слова: электрическая энергия, источники света, световая отдача, колебания напряжения, потребляемая мощность.

Значительным потребителем электрической энергии (ЭЭ) являются осветительные установки. Доля электроэнергии, затрачиваемой в некоторых странах на нужды освещения, может достигать 20 процентов от общего объема производства. Диаграмма потребления осветительными установками ЭЭ от общего объема вырабатываемой энергии в различных странах мира представлена на рисунке 1.

Доля ЭЭ на освещение, %

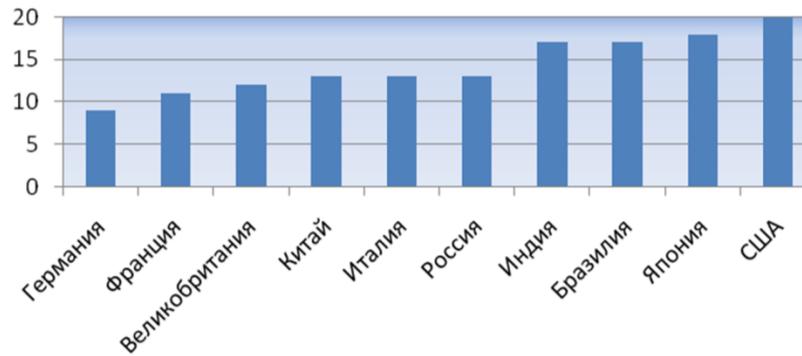


Рисунок 1 - Диаграмма потребления электрической энергии осветительными установками в различных странах мира

Следует учитывать, что в отдельных секторах экономики расход электроэнергии на освещение может существенно отличаться. Например, доля ЭЭ затрачиваемая на освещение в административных и офисных зданиях составляет от 30 до 50 % от всего объема потребляемой в них электроэнергии. Наиболее весомая часть от общего потребления ЭЭ затрачивается на освещение в промышленности. В некоторых отраслях промышленности доля электроэнергии, идущая на освещение, может достигать 55 %. В жилищном секторе эта доля составляет около 25 % [2]. Анализ потребления электрической энергии на освещение по отдельным категориям потребителей наглядно представлен на рисунке 2.

Учитывая выше сказанное можно утверждать, что осветительные установки представляют важный объект исследования в области экономии энергетических ресурсов, а система освещения имеет значительный потенциал для повышения энергоэффективности и энергосбережения. При этом следует помнить, что решая вопросы экономии электрической энергии нельзя пренебрегать нормативными требованиями, предъявляемыми к осветительным установкам в части обеспечения комфортности и работоспособности пользователей.

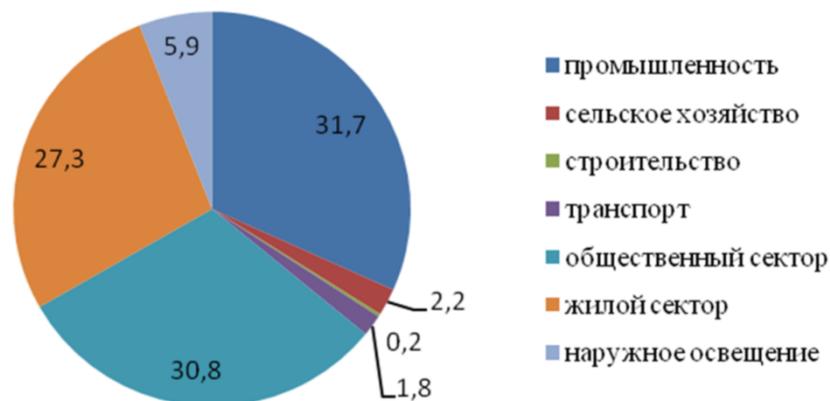


Рисунок 2 - Диаграмма потребления электрической энергии на освещение по отдельным категориям потребителей

Промышленностью выпускаются различные источники света. Одним из основных параметров, характеризующих уровень энергоэффективности источника света, является светоотдача. Световая отдача (лм/Вт) определяется как отношение светового потока лампы к ее мощности и характеризует экономичность источника света [3].

Значения потребляемой мощности, светового потока, световой отдачи в справочной литературе указываются для источников света различного типа, работающих при номинальном напряжении. Однако все отклонения напряжения согласно ГОСТу 32144-2013 «допускаются в пределах $\pm 10\%$ номинального значения в течение 100 % времени интервала в одну неделю» [4]. Следовательно, эксплуатационные характеристики ламп при допустимых отклонениях напряжения будут отличаться от указанных в справочнике.

Известно, что отклонения напряжения практически не вызывают изменений световой отдачи ламп типа ДРЛ. Для ламп типа ДРИ характерно практически пропорциональное снижение световой отдачи при отрицательных отклонениях напряжения. Наиболее сильно сказываются отклонения напряжения на световую отдачу ламп накаливания (ЛН). При положительных отклонениях напряжения световая отдача ЛН увеличивается более чем на 20%, а при отрицательных снижается. При этом надо учитывать, что при эксплуатации ЛН на напряжении выше номинального значительно сокращается и срок их службы. При увеличении напряжения незначительно меняется световая отдача люминесцентных (ЛЛ) и светодиодных ламп. А при снижении напряжения питания световая отдача у этих ламп увеличивается и, достигая максимума при 80-90% от номинального напряжения, начинает снижаться [3].

Проанализируем, как будет изменяться величина потребляемой активной мощности P осветительными устройствами с разными типами ламп в процентах от номинальной мощности лампы $P_{ном}$ при изменении напряжения. Такая зависимость называется статической характеристикой электрической нагрузки по напряжению.

Статическая характеристика для осветительной нагрузки с ЛН описывается уравнением

$$\delta P = \left[\left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^m - 1 \right] \cdot 100,$$

где m – показатель, характеризующий регулирующий эффект нагрузки освещения. Под регулирующим эффектом нагрузки «понимается изменение потребляемой мощности в процентах при изменении напряжения на 1 %» [5].

Статическая характеристика активной нагрузки с газоразрядными ЛЛ в комплекте с электромагнитными ПРА представляет собой линейную зависимость и изменение электропотребления осветительными установками с ГЛНД и лампами типа ДРИ при отклонении напряжения вычисляется по формуле

$$\delta P = m \delta U_y,$$

где $m = 2$ – для ЛЛ низкого давления; $m = 2,2$ – для ламп типа ДРИ.

Изменение потребления активной мощности газоразрядными лампами высокого давления типа ДРЛ с использованием ПРА в процентах в зависимости от величины отклонения напряжения, определяется по формуле

$$\delta P = 2,43 \delta U_y.$$

На рисунке 3 представлены характеристики, отражающие изменение потребления различными источниками света активной мощности при отклонении напряжения питающей сети в

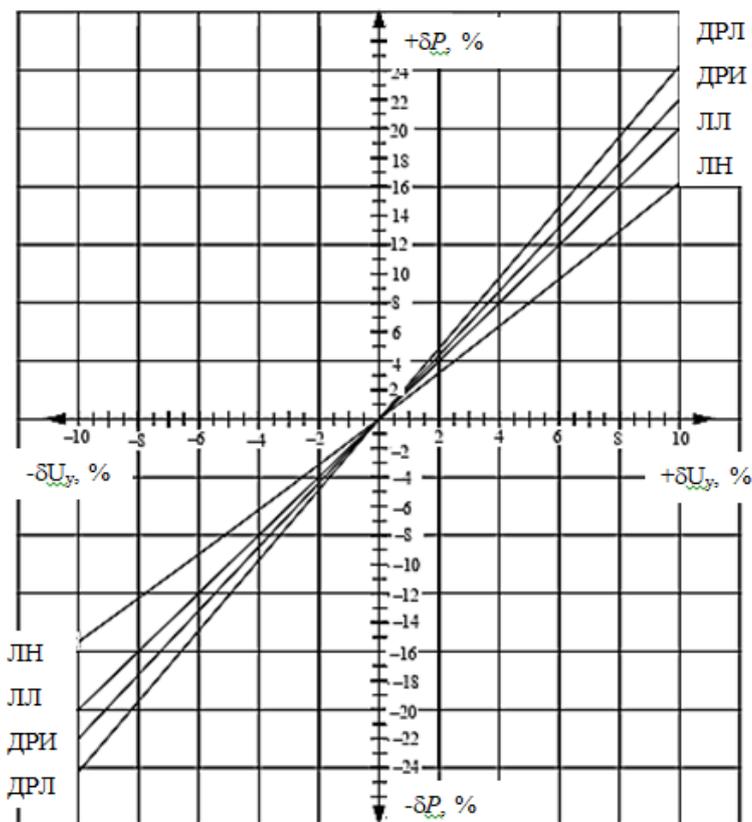


Рисунок 3 – Изменения потребления активной мощности различными источниками света при отклонении напряжения питающей сети

пределах нормируемых ГОСТом 32144-2013.

Выводы

1. Наиболее значительное изменение потребляемой активной мощности при отклонениях напряжения от номинального характерно для ламп типа ДРИ и ДРЛ.

2. При увеличении напряжения световая отдача люминесцентных и светодиодных ламп практически не меняется. А при снижении напряжения на 10-20 % от номинального световая отдача достигает максимального значения.

3. Результаты проведенного анализа позволяют оценивать изменения потребления активной мощности и световой отдачи различных типов ламп при допустимых ГОСТом 32144-2013 отклонениях напряжения от номинального значения.

Список литературы

1. Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Малафеев О.Ю. Оценка характеристик систем освещения в России // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2016. №3 (51).

2. Вагин Г.Я., Терентьев П.В., Малафеев О.Ю. О необходимости корректировки нормативных документов по показателям энергетической эффективности источников света // Промышленная энергетика. – 2015. – № 12. – С. 30–33.

3. Вагин Г.Я., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Терентьев П.В. Влияние качества питающего напряжения на параметры искусственного освещения рабочего места // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3-2. – С. 247-252.

4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ. 2014.07.01. - М.:Стандартинформ, 2013. – 10 с.

5. Козловская В.Б., Радкевич В.Н., Колосова И.В. Влияние напряжения на основные характеристики ламп электрического освещения// Энергетика. Труды высших учебных заведений и энергетических ассоциаций СНГ. 2009. № 1.

Королева Татьяна Геннадьевна, к.т.н., доцент кафедры ЭиЭ ОГУ имени И.С. Тургенева, 302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, д.29. E-mail: tgoroleva@mail.ru

Филатенко Максим Алексеевич, магистрант ОГУ имени И.С. Тургенева, 302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, д.29. E-mail: maksimf000@mail.ru

UDC 631.192

ANALYSIS OF THE EFFECT OF VOLTAGE ON THE ENERGY EFFICIENCY OF LIGHT SOURCES

Koroleva T.G., Filatenko M.A.

Russia, Orel, Orel State Technical University I.S. Turgenev Estate

In the article, the analysis of electric energy consumption for lighting needs in various countries of the world and in various sectors of the economy confirms the relevance of saving electric energy in lighting systems. The influence of voltage deviation on the amount of active power consumed and the light output of different types of lamps is investigated. The results of the work make it possible in practice to make an energy-efficient choice of light sources, taking into account power consumption indicators when the voltage value changes.

Keywords: electrical energy, light sources, light output, voltage fluctuations, power consumption.

Bibliography

1. Vagin G.Ya, Solntsev E.B., Malafeev O.Yu. Assessment of the characteristics of lighting systems in Russia // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2016. №3 (51).

2. Vagin G.Ya, Terentyev P.V., Malafeev O.Yu. On the need to adjust regulatory documents on indicators of energy efficiency of light sources // Industrial Power Engineering. - 2015. - No. 12. - pp. 30-33.

3. Vagin G.Ya, Masleeva O.V., Pachurin G.V., Terentyev P.V. The influence of the quality of the supply voltage on the parameters of artificial workplace lighting // Fundamental research. - 2014. - № 3-2. - pp. 247-252.

4. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. - Introduction. 2014.07.01. - Moscow:Standartinform, 2013. - 10 p.

5. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Kolosova I. V. Influence of voltage on the main characteristics of electric lighting lamps // Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2009. No. 1.

Koroleva Tatiana Gennadievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of EIE of the I.S. Turgenev OSU, 302020, Orel, Naugorskoeshosse str., 29. E-mail: tgkoroleva@mail.ru

Filatenko Maxim Alekseevich, Master's student of the I.S. Turgenev OSU, 302020, Orel, Naugorskoeshosse str., 29. E-mail: maksimf000@mail.ru

УДК 621.517.4

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДОВ НА ЛЭП 10 КВ

Чернышов В.А., Лошкарев М.О., Рыков А.А
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»

Аннотация: Обоснована целесообразность применения нового способа дистанционного автоматического контроля и регулирования стрелы провеса проводов на ЛЭП 10 кВ. Рассмотрены специфика функционирования предлагаемого мероприятия и схемотехнические решения для его реализации.

Ключевые слова: воздушные ЛЭП 10 кВ, стрела провеса, обрыв провода, схлестывание провода, пережог провода, дистанционный контроль, автоматический контроль и регулирование.

В настоящее время общая протяженность распределительных сетей напряжением 10кВ в нашей стране превышает 1 млн. километров. От надежности функционирования воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 10 кВ во многом, зависит эффективность работы предприятий агропромышленного и производственных секторов Российской экономики. Как показывают статистика, аварийность на ВЛЭП 10 кВ достигает 66% от общего количества повреждений, возникающих в электросетевом распределительном комплексе 10 кВ (см. рисунок 1) [1].

Возникновение аварийных повреждений на ВЛЭП 10 кВ в большинстве случаев связано с обрывами проводов, имеющих недопустимый уровень стрелы провеса, проводов, при этом основными причинами, способствующими этому являются:

- неблагоприятные воздействия погодно-климатических факторов [1,2];
- неблагоприятное влияние флоры и фауны [3,4];

- технические просчеты на стадиях проектирования и строительства [5];

- неудовлетворительные условия эксплуатации [6].

- недопустимый перегрев, обусловленный увеличением токовой нагрузки.

Отмеченные факторы приводят к чрезмерному провисанию проводов и как следствие к обрыву их в местах крепления к изоляторам, а также их

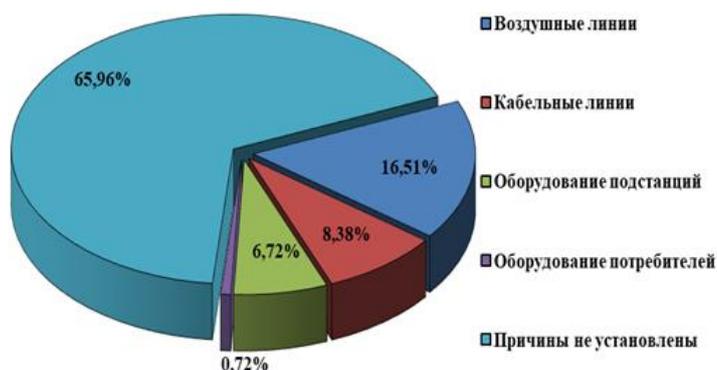


Рисунок 1 – Аварийные отключения электропередач

пережогу при схлестывании. Кроме того, высока доля вероятности обрыва чрезмерно растянутых проводов в случае передвижения под ними крупногабаритной автотракторной техники.

Несмотря на то, что на сегодняшний день в арсенале энергетиков имеются различные рычаги воздействия на существующую проблемную ситуацию, аварийность, связанная с обрывами проводов на ВЛЭП 10 кВ, неуклонно растет вследствие неослабевающего физического и морального износа электросетевой инфраструктуры, а также хронической нехватки рабочей силы и денежных средств на ее обновление [7].

Проведение плановых ремонтно-восстановительных работ с выездом электромонтажной бригады на участки ВЛЭП 10 кВ, для контроля и регулировки стрелы провеса проводов, на современном этапе развития научно-технического прогресса нельзя считать эффективным мероприятием [8]. Это обусловлено тем, что ремонтный персонал не владеет информацией о местоположении участков ВЛЭП 10 кВ, имеющих недопустимую стрелу провеса проводов, что не позволяет ему оперативно приступать к выполнению ремонтно-восстановительных работ на наиболее уязвимых участках электрической сети. Вместо этого, ремонтному персоналу приходится последовательно осматривать каждый пролет ВЛЭП 10 кВ, используя архаичные методы визуального контроля стрелы провеса проводов (см. рисунок 1) и регулировать стрелу провеса с помощью устройств натяжения провода (см. рисунок 2), что требует много времени, сил и средств и крайне негативно отражается на надежности электроснабжения потребителей [9].

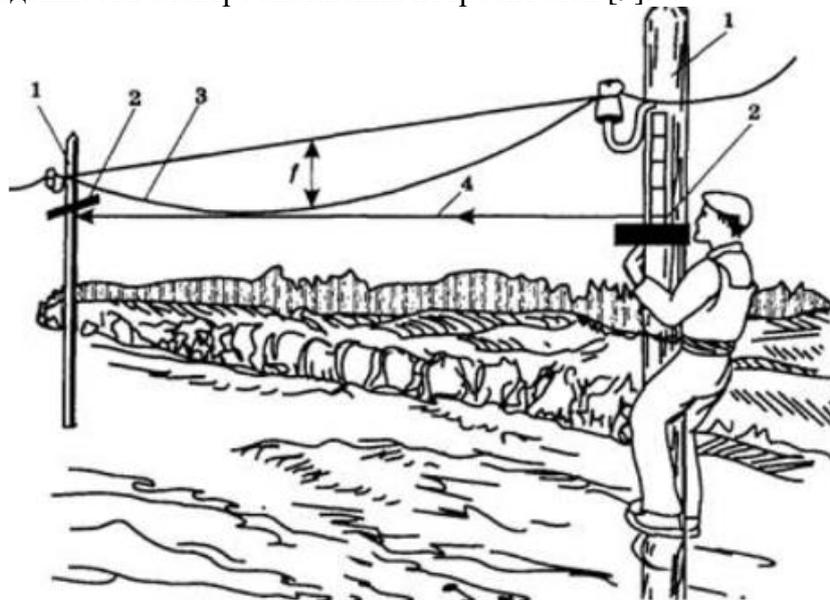


Рисунок 2 – Визирование стрелы провеса провода на ВЛЭП
1 – опоры; 2 – визирные планки; 3 – провод; 4 – линия визирования

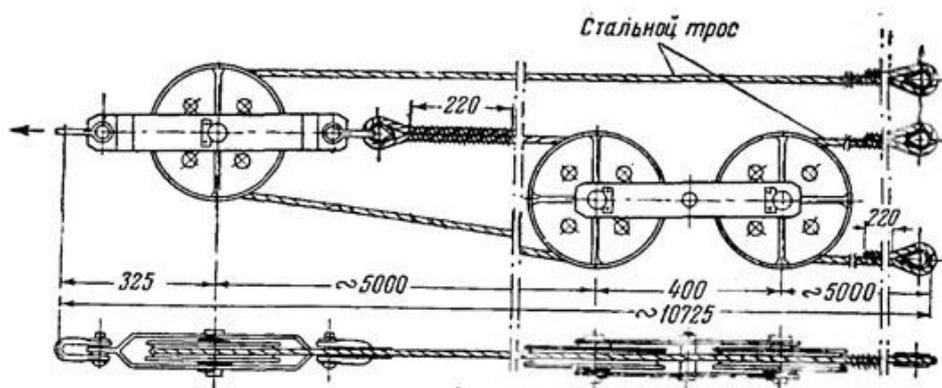


Рисунок 3 – Устройство для одновременного натяжения трех проводов

Не решает проблему и применение универсальной системы разрекламированной, так (см. рисунок 4), для которого деревья на провода не обрезаются. Провода ВЛЭП, прикладываясь по длине в обход, обеспечивают изменение прохода в зоне падения деревьев, выдерживая вес пролетахнатягивается. Неоданный способ также имеет недостатки, ограничивающие повсеместное внедрение в распределительных сетях 10 кВ, к числу наиболее значимых из них можно отнести: необходимость применения только изолированного провода; большие капитальные вложения

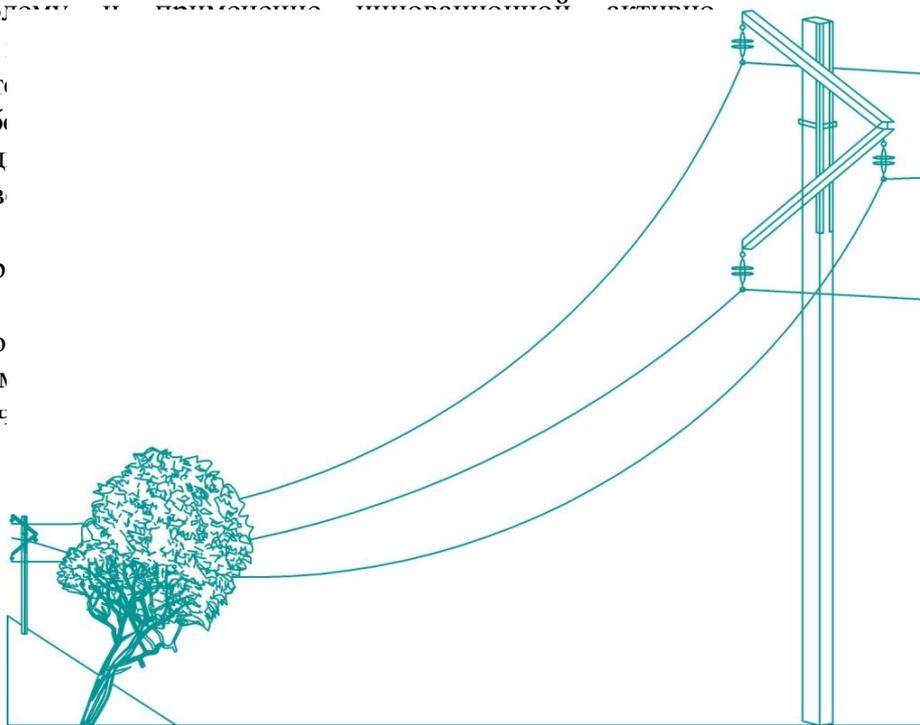


Рисунок 4 – Самовостанавливающаяся ВЛЭП 10 кВ

и эксплуатационные издержки; вероятность отказа механизма траверсы при возникновении сложных метеорологических условий (изморось, гололед, ветер и др.).

Таким образом, существующие на сегодняшний день мероприятия и технические решения, направленные на предотвращение растягивания проводов на воздушных ЛЭП 10 кВ не позволяют в полной мере обеспечивать эффективное функционирование систем электроснабжения. Данные обстоятельства вынуждают научно-технических работников продолжать отыскивать новые, более эффективные варианты повышения надежности функционирования ВЛЭП 10кВ, в том числе и направленные на совершенствование, способов поддержания стрелы провеса проводов в оптимальном диапазоне в условиях неблагоприятного воздействия внешних факторов.

Авторы данной публикации предполагают, что наиболее простым и вместе с тем эффективным мероприятием, направленным на поддержание стрелы провеса проводов в оптимальном диапазоне, может являться новый способ, обеспечивающий дистанционный автоматический контроль и регулирование стрелы провеса провода [11]. При этом для схмотехнической реализации данного способа предполагается использовать микропроцессорный контроль и управление, пневматическое позиционирование, вибрационное воздействие, а также беспроводной канал связи. Специфика функционирования предлагаемого способа представлена на рисунке 2.

Предлагаемый способ функционирует следующим образом. Через заданное количество пролетов на ВЛЭП 10 кВ (определяемое, технико-экономическим расчетом) на железобетонных опорах 7 устанавливают пневматические подъемные устройства 1 способные по команде блоков управления 5 изменять высоту расположения траверсы 2 относительно земли в диапазоне от 0 до 500 мм. Данное действие обеспечивает изменение стрелы провеса проводов 3 на каждом из контролируемых участков ВЛЭП 10 кВ. Контроль, за изменением стрелы провеса проводов осуществляется при помощи ультразвуковых датчиков, смонтированных на блоках управления 5 и контролирующих ближайшую к опорам 7 стрелу провеса проводов 3. При поднятии траверсы 2, стрела провеса на каждом последующем пролете будет уменьшаться с некоторой долей убывания (зависит от количества контролируемых пролетов). Для более эффективного проскальзывания проводов в вязках изоляторов, служат устройства формирования механических колебаний (вибраторы)

6 установленные
распространяться п
контролируемого
проскальзывание
усиления данного
изолятору может
синтетическая
механических коле
10 кВ, также мож
противодействия
гололеда и налипан

Система
пневматического
подъема 1 тра-
версы 2 состоит
из следующих
элементов: раз-
движного метал-
лического кор-
пуса; пневмока-
меры; компрес-
сора; электрод-
вигателя. Мик-
ропроцессор-
ный блок уп-
равления 5
посредством
ультразвуковых

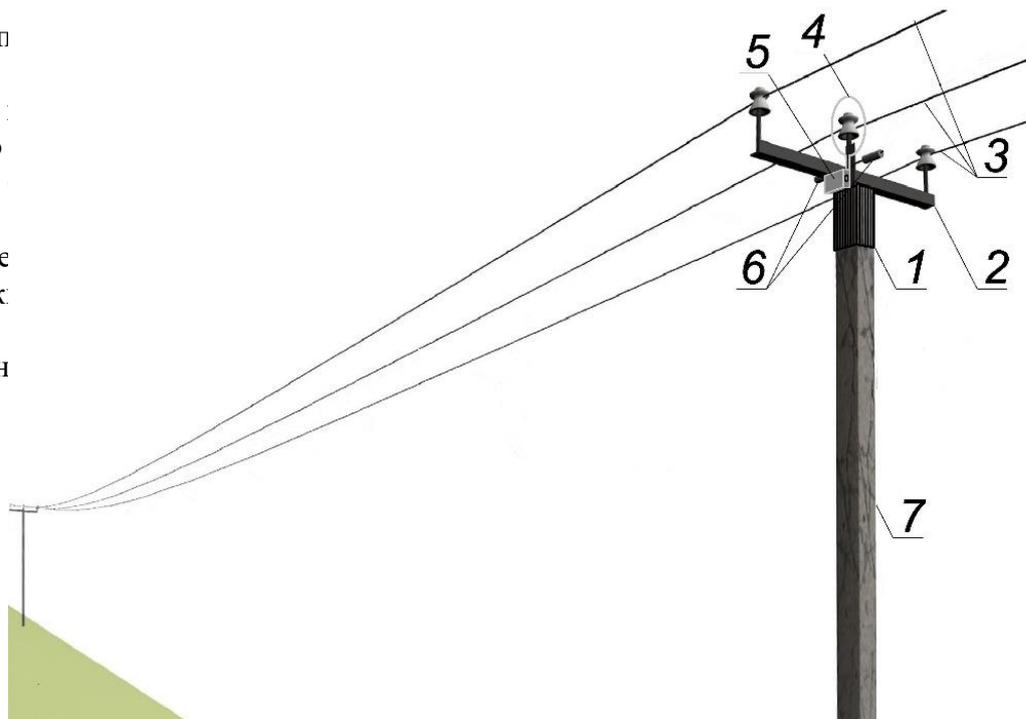


Рисунок 5 - Специфика функционирование способа дистанционного автоматического контроля и регулирования стрелы провисания провода на ВЛЭП 10 кВ

1-система пневматического позиционирования; 2- траверса; 3- провода; 4- устройство электропитания; 5-блок управления со встроенным датчиком контроля положения провода; 6- виброгенератор; 7-железобетонная опора

датчиков, смонтированных на его корпусе, контролирует стрелу провисания проводов 3 и активизирует в работу электродвигатель компрессора, подающего воздух в пневмокамеру, а также электродвигатель вибратора, распространяющего по проводам 3 механические колебания. При расширении пневмокамеры происходит перемещение направляющих секций металлического корпуса, приводящее к изменению высоты подъема траверсы 2 относительно земли до тех пор, пока датчики не зафиксируют оптимальную стрелу провеса проводов 3, после чего блок управления 5 отключит электродвигатели компрессора и вибратора 6. При возникновении неблагоприятных погодных-климатических факторов (снегопад, гололед, ветер и др.) микропроцессорный блок управления 5 может получать команду по беспроводному каналу связи с диспетчерского пункта управления на принудительное изменение стрелы провеса (в большую или меньшую сторону) и включение электропривода вибратора 6. Для питания системы дистанционного автоматического контроля и регулирования стрелы подвеса проводов 3 используется источник питания 4, использующий принцип работы кабельного трансформатора.

Таким образом, на основании вышеизложенного, авторами данной публикации обоснованы предпосылки создания и специфика функционирования нового инженерно-технического мероприятия, способного в значительной степени снизить аварийность в воздушных распределительных сетях 10 кВ, при воздействии неблагоприятных факторов, а также позволяющего существенно сократить эксплуатационные издержки, связанные с проведением технического обслуживания и ремонта на ВЛЭП 10 кВ и не требующего при этом серьезных капиталовложений на реализацию.

Список литературы

1. Качанов, А.Н. Теоретические аспекты краткосрочного прогнозирования однофазных замыканий на землю в воздушных распределительных сетях 10 кВ / А.Н. Качанов, В.А. Чернышов, Е.А. Печагин, А.В. Кобелев // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 2 (60). С.28-38
2. Кабашов В.Ю. Влияние параметров пролета на аварийные отключения сельских ВЛ 6-10 кВ при воздействии ветра / В.Ю. Кабашов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 4, т. 10, 2014
3. Чернышов В.А. Результаты экспериментальных исследований в области экологии биотехнической системы "ЛЭП-Человек-Природа", их анализ и графическая интерпретация / Чернышов В.А., Чернышова Л.А.// Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 515-521.
4. Чернышов В.А. Проблема зарастания трассы ЛЭП в удаленных сельскохозяйственных районах и альтернативный вариант ее разрешения / В.А. Чернышов, Л.А. Чернышова // Менеджер-эколог. 2011. № 5-6. С. 55-59.
5. Хорольский В.Я. Техничко-экономические расчеты распределительных электрических сетей / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, Д.В. Петров. – Ростов-на-Дону: изд. "Терра Принт", 2009. – 132 с.
6. Мешков Б.Н. Диагностика повреждений воздушных линий электропередачи в распределительном сетевом комплексе 10 кВ/Б.Н. Мешков, В.А., Чернышов //Иновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2 (12). С. 87-91.
7. 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. 2014. № 3 (3). С. 54-63.
8. Чернышов В.А. Способ мониторинга, технического состояния элементов воздушной линии электропередач / Чернышов В.А., Виноградов А.В., Семенов А.Е., Мороз А.О. //Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 3 (3). С. 64-68.
9. Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения: Учебное пособие /В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. - Издательство: Инфра-М, 2018 - 288 с.
10. Тверьэнерго испытывает самовосстанавливающуюся линию электропередачи [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://tver.aif.ru/society/jkh/tverenergo_ispytyvaet_samovosstanavli-vayushchuyusya_liniyu_elektroperedachi (дата обращения 25.10.2021)
11. Лошкарёв М.О. Повышение надежности функционирования воздушных линий электропередачи 10 кВ посредством дистанционного автоматического контроля и регулирования стрелы провисания провода// Физика и современные технологии в АПК: Материалы XII Всероссийской (с международным участием) молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников – Орёл: Издательство «Картуш», 2021. – 319-321 с.

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

Лошкарёв Максим Олегович, магистрант 2 курса, направление подготовки 13.04.02 "электроэнергетика и электротехника" ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, тел.89534138034, E-mail: maxim.loshkarev@mail.ru

Рыков Алексей Андреевич, магистрант 2 курса, направление подготовки 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника" ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89963491001, E-mail:rykov-alex@mail.ru

UDC621.517.4

JUSTIFICATION OF THE FUNCTIONING OF THE APPLICATION OF THE REMOTE AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION OF THE WIRE WEIGHT BOOM ON 10 KV ELECTRIC LINE

*Chernyshov V.A., Loshkarev M. O., Rykov A. A.
Russia, Oryol, FSBEI HE "OSU named after I.S.Turgenev"*

Abstract: The expediency of using a new method of remote automatic control and regulation of the sag of wires on 10 kV power transmission lines has been substantiated. The specifics of the functioning of the proposed event and circuit solutions for its implementation are considered.

Key words: overhead transmission lines 10 kV, sag arrow, wire breakage, wire snagging, wire burnout, remote control, automatic control and regulation.

Bibliography

1. Kachanov, A.N. Theoretical aspects of short-term forecasting of single-phase earth faults in overhead distribution networks of 10 kV / A.N. Kachanov, V.A. Chernyshov, E.A. Pechagin, A.V. Kobelev // *VestiVyssikhizucheniiChernozemja*. 2020. № 2 (60). С.28-38
2. Kabashov, V.Yu. Influence of the span parameters on the emergency switching-off of the rural HV lines 6-10 kV under wind influence / V.Yu. Kabashov // *Electrical and Information Complexes and Systems*. № 4, т. 10, 2014
3. Chernyshov V.A. Results of experimental studies in the ecology of the biotechnological system "Power Line-Man-Nature", their analysis and graphical interpretation / V.A., Chernyshov, L.A., Chernyshova // *Agrotechnics and Energy Supply*. 2014. № 1 (1). С.515-521.
4. Chernyshov, V.A. The problem of overgrowth of power line routes in remote agricultural areas and an alternative solution / V.A. Chernyshov, L.A. Chernyshova // *Manager-Ecologist*. 2011. № 5-6. С. 55-59.
5. Khorolskiy, V.Ya. Technical and economic calculations of distributive electric networks / V.Ya. - Rostov-on-Don: Ed. "Terra Print, 2009. - 132 с.
6. Meshkov B.N. Diagnosis of faults of overhead power lines in the distribution grid complex 10 kV / B.N. Meshkov, V.A., Chernyshov // *Innovations in agriculture*. 2015. № 2 (12). С.87-91.
7. Meshkov B.N. Analysis of the impact of investments in maintenance on the frequency of emergency failures of 6-10 kV HV / B.N. Meshkov, V.A. Chernyshov // *Agrotechnics and power supply*. 2014. № 3 (3). С.54-63.
8. Chernyshov V.A. Method of monitoring the technical condition of overhead power line elements / Chernyshov V.A., Vinogradov A.V., Semenov A.E., Moroz A.O. // *Agrotechnics and power supply*. 2014. № 3 (3). С.64-68.
9. Khorolsky V.Y. Operation of power supply systems: Textbook / V.Y. Khorolsky, M.A. Taranov. - Publisher: Infra-M, 2018 - 288 p.
10. Tverenergo tests self-healing power line [Electronic resource]. Access mode: https://tver.aif.ru/society/jkh/tverenergo_ispytyvaet_samovosstanavlivayushchuyusya_liniiyu_elektropredachi (accessed 25.10.2021)
11. Loshkarev M.O. Increase of Reliability of Operation of Overhead Electric Transmission Lines 10 kV by means of Remote Automatic Control and Regulation of the Sag-Wire Sweep // *Physics and Modern Technologies in Agricultural Complex: Proceedings of XII All-Russian (with international participation) Youth Conference of Young Scientists, Students and Schoolchildren - Oryol: Publishing House "Kartush", 2021. - 319-321 с.*

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

Loshkarev Maxim Olegovich, 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: maxim.loshkarev@mail.ru

Rykov Alexey Andreevich, 2nd year undergraduate student, direction of training 04.13.02 "Electric power and electrical engineering" FSBEI VO "OSU named after I.S. Turgenev", Orel, Naugorskoeshosse, 29, tel. 89963491001, E-mail: rykov-alex@mail.ru

УДК 621.517.4

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОНИТОРИНГА СИЛЫ ТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА НА УЧАСТКАХ ЛЭП 10 КВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

Чернышов В.А., Рыков А.А., Лошкарев М.О.
Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»

Аннотация: Обоснована целесообразность применения мониторинга силы тяжения проводов на участках воздушных линиях электропередачи напряжением 10 кВ с учетом влияния ветровой нагрузки. Рассмотрены специфика функционирования предлагаемого мероприятия и основные схмотехнические решения для его реализации.

Ключевые слова: воздушные ЛЭП 10 кВ, тяжение провода, ветровая нагрузка, мониторинг технического состояния, роза ветров.

Анализ статистических данных об отказах воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) 10 кВ указывает на то, что почти половина всех повреждений возникает из-за недооценки влияния ветра на ее основные элементы, наиболее уязвимыми из которых являются провода [1]. Если известны расчетная скорость ветра, его порывистость, профиль ветра по высоте, вероятность ветров различной силы и "роза ветров", то можно с высокой точностью просчитать и минимизировать негативное влияние ветра на проектируемую ВЛЭП [2]. Однако в реальности, ситуация такова, что основными причинами аварий в воздушных электрических сетях разного класса напряжения, зачастую являются просчеты, при назначении величины расчетной ветровой нагрузки, а также неправильное представление о характере её распределения [3]. Все это указывает на то, что, несмотря на накопленный отечественными и зарубежными специалистами богатый опыт, знания о ветре, на сегодняшний день являются, мягко говоря, недостаточными. Это не позволяет электросетевым предприятиям эффективно противостоять обрывам проводов, вследствие чего они несут колоссальные убытки, обусловленные недоотпуском электроэнергии потребителям, а также в связи с неэффективным использованием материально-технических ресурсов, расходуемых при проведении плановых ремонтно-восстановительных работ [4].

При детальном рассмотрении данной проблемной ситуации, необходимо заметить, что влияние ветровой нагрузки на различные участки ВЛЭП 10 кВ не одинаковое, кроме того разные участки испытывают не одинаковое тепловое действие тока, обусловленное разной мощностью питающихся от них потребителей в дневное и вечернее время.

На рисунке 1 представлен план расположения виртуальной распределительной электрической сети 10 кВ относительно сторон света с указанием розы ветров.

Рассматриваемая, в качестве примера, виртуальная электрическая сеть 10 кВ состоит из трех, относительно непротяженных ВЛЭП 10 кВ, отходящих от подстанции (ПС) 35/10 кВ в разных направлениях.

ВЛЭП № 1 запитывает шесть трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 и содержит два характерных направления, одно из которых ориентировано на СЗ(ЮВ) и включает участки: ПС 35/10-1; 6-ТП 02; второе направление ориентировано на СВ(ЮЗ) и включает участки: 1-2; 2-3; 3-4; 1-5; 5-6; 6-7.

ВЛЭП № 2 запитывает четыре ТП 10/0,4 и содержит три характерных направления, первое из которых ориентировано на В(З) и включает участки: ПС 35/10-1; 1-2; 2-3; 3-4; второе направление ориентировано на С(Ю) и включает участки: 1-ТП 08; 2-3; 3-4; третье направление ориентировано на ЮВ(СЗ) и включает участок 2-5.

ВЛЭП № 3 запитывает четыре ТП 10/0,4 и содержит два характерных направления, одно из которых ориентировано на С(Ю) и включает участок ПС 35/10-1; второе направление ориентировано на СВ(ЮЗ) и включает участки: 1-4; 1-2; 2-3.

Учитывая неодинаковое расположение участков относительно сторон света, изменяющиеся во времени направление и силу ветра, а также изменяющийся характер нагрузки, в реальной электрической сети, разные участки ВЛЭП 10 кВ будут в разной степени подвергаться физическому износу, характеризующемуся остаточной прочностью металла проводов, увеличением их электрического сопротивления и уменьшением площади их поперечного сечения [5]. Бесконтрольное и неравномерное снижение технического состояния участков распределительной электрической сети не позволяет ремонтным службам обеспечивать своевременное проведение ремонтно-восстановительных работ для наиболее изношенных ее элементов, т.к. все работы, как правило, проводятся согласно заранее разработанного и утвержденного плана-графика.

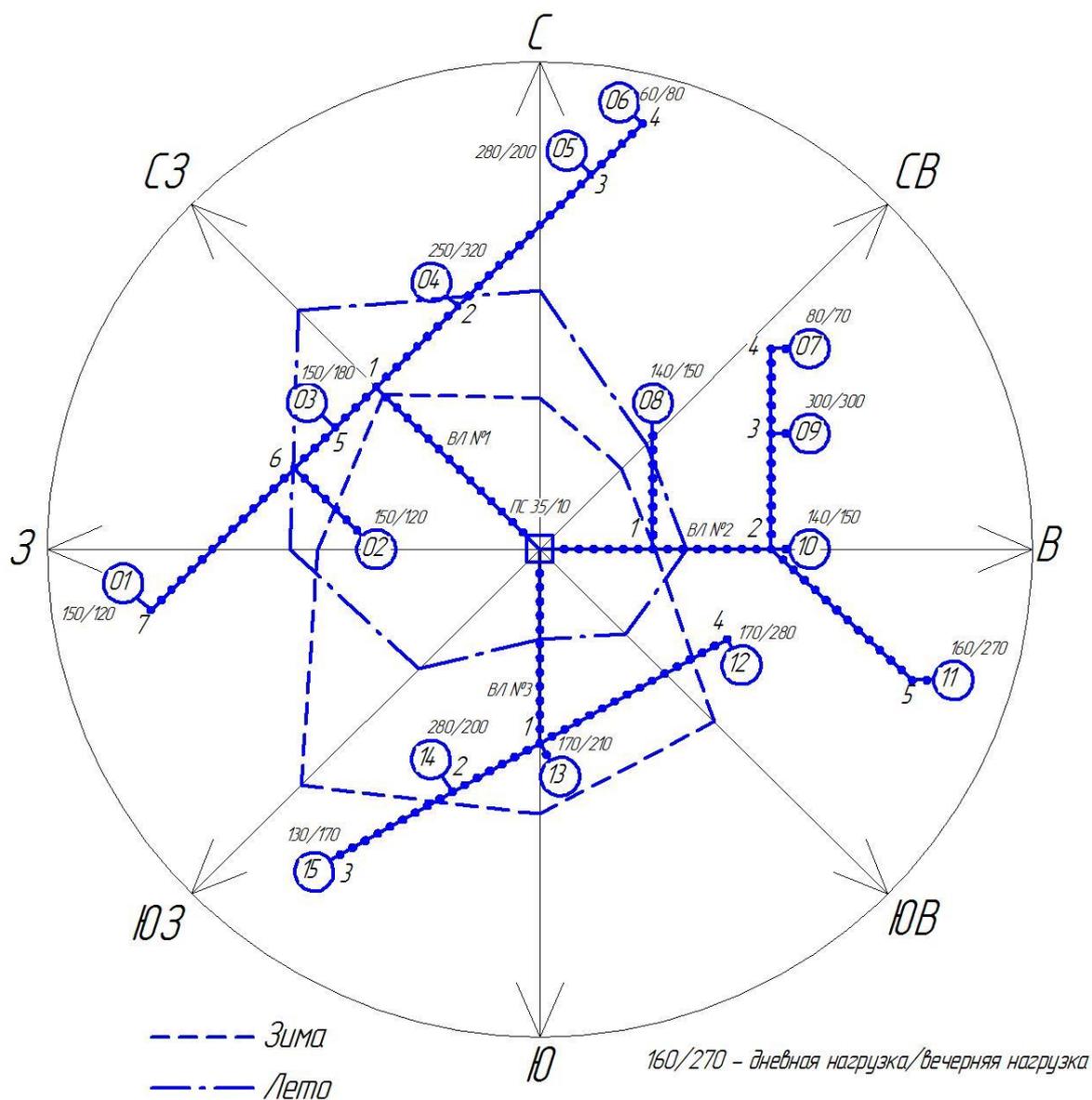


Рисунок 1 - План расположения воздушной электрической сети 10 кВ относительно сторон света с указанием розы ветров

Данная проблемная ситуация является для научно-технических работников веской причиной для разработки новых, более эффективных алгоритмов и способов хозяйствования, позволяющих энергоснабжающим организациям не только поддерживать техническое состояние ВЛЭП 10 кВ на высоком уровне, но при этом и рационально использовать привлекаемые для этого материально-технические ресурсы.

Руководствуясь имеющимися наработками [6], авторы данной публикации предполагают, что принципиально простым, но вместе с этим, весьма эффективным инженерно-техническим мероприятием, в этой связи, может являться проведение непрерывного мониторинга влияния ветровой нагрузки на состояние проводов на экспериментальных участках ВЛЭП 10 кВ и использование выявленных закономерностей при организации технической эксплуатации реальной электрической сети [7].

Предлагаемый способ заключается в следующем, на заранее выделенном участке, в районе расположения контролируемой распределительной сети 10 кВ, организуют стационарный измерительный пост (см. рисунок 1).



Рисунок 2 - Внешний вид стационарного измерительного поста для мониторинга действия ветровых нагрузок на провода ВЛ 10 кВ

Данный объект представляет собой многофункциональный измерительный комплекс открытой установки, имитирующий в реальном масштабе десять двух цепных пролетов провода ВЛЭП 10 кВ, наиболее распространенного типа, веерно расходящихся относительно центральной опоры под углом 10 градусов в горизонтальной плоскости, таким образом, что первый пролет совпадает по направлению с осью абсцис розы ветров, а последний проходит параллельно оси ее ординат.

На центральной опоре установлены тензометрические датчики тяжения провода, внешний вид, одного из которых, представлен на рисунке 1а). Данные датчики контролируют тяжение провода при ветровой нагрузке, действующей на провода каждого из пролетов ВЛЭП 10 кВ, расположенные под разными углами относительно силы ее приложения и формируют, согласно, схемы 1 б) соответствующий управляющий сигнал.

Для контроля скорости ветра применяется анемометр, внешний вид которого представлен на рисунке 2 а), который посредством оптической развязки, изображенной на рис. 2 б), согласно, схемы 2 в), также формирует управляющие сигналы, характеризующие скорость движения потока ветра.

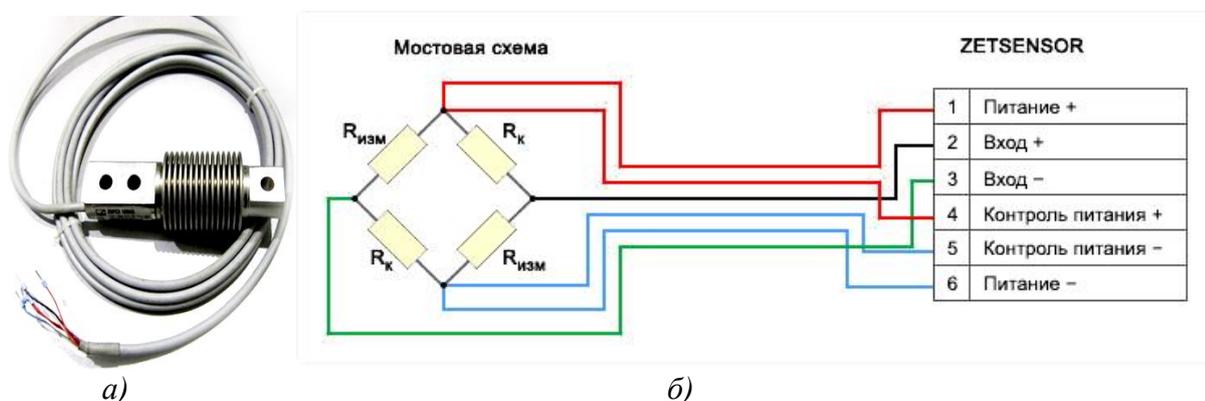


Рисунок 3- Принципиальная схема датчика тяжения провода

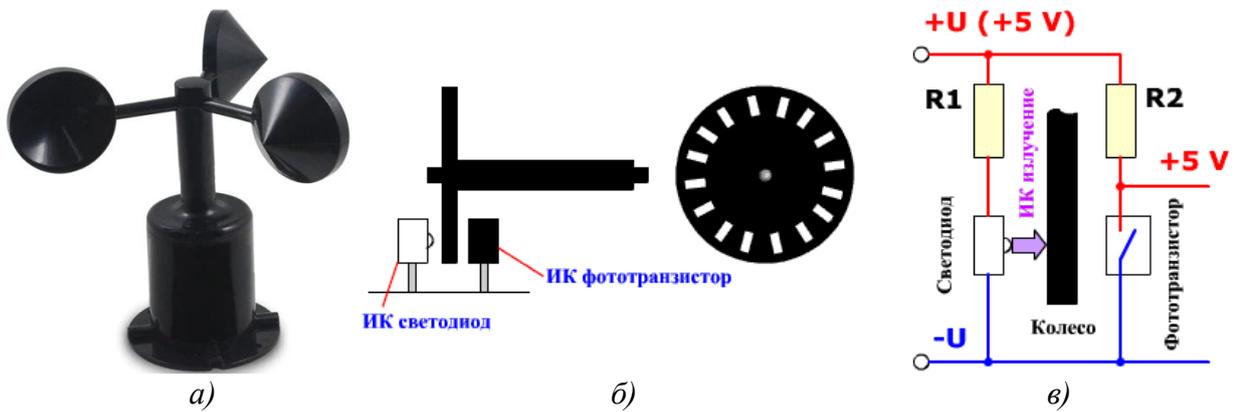


Рисунок 4 - Принципиальная схема анемометра с датчиком скорости ветра

Функциональные возможности стационарного измерительного комплекса позволяют также задавать различные токовые нагрузки для проводов, посредством управляемого тиристорного регулятора мощности, а также изменять стрелу их провеса, посредством гидравлического механизма [8], независимо для каждого из имеющихся пролетов. Вводные настройки поступают с центрального пункта управления энергосистемой по заданию оператора. Стационарный измерительный комплекс работает в автономном режиме, под контролем станция управления. Информация о скорости ветра и, соответственно, о тяжении провода, на каждом пролете, характеризующимся заданными токовой нагрузкой и стрелой провеса проводов, поступает в микроконтроллер базовой станции управления, где она накапливается и обрабатывается. Для связи центрального пункта управления с базовой станцией управления, может использоваться любой канал связи, обеспечивающий ввод и вывод аппаратной информации.

Для оперативной обработки результатов, необходимо иметь специализированное программное обеспечение, выдающее массив данных с номерами участков, ранжированных по очередности проведения на них ремонтно-восстановительных работ, в зависимости от силы и продолжительности действия на них ветровых нагрузок. Массив данных должен содержать информацию о протяженности участков и информацию, необходимую для идентификации их местоположения на местности [9].

Также обязательным условием для реализации предлагаемого мероприятия является наличие информации о расположении каждого прямолинейного участка ВЛЭП 10 кВ относительно, так называемого румба линии - угла ориентирования (см. рис. 5). Румб является разновидностью азимута, отсчитываемого от ближайшего направления – северного или южного меридиана до заданной линии. Направление участка может находиться в одной из четырех четвертей, и для однозначного её определения к градусной величине румба добавляется название четверти: СВ (северо-восток), ЮВ (юго-восток), ЮЗ (юго-запад) или СЗ (северо-запад). Румбы имеют значения от 0° до 90° и обозначаются буквой γ . Численные значения румбов называются табличными углами.

Исходными данными для автоматизированного расчета являются координаты каждого прямолинейного участка ВЛЭП 10 кВ, точные данные о которых можно получить только при обходе трассы ВЛЭП 10 кВ.

По известным координатам рассчитывается длина участка - S_{AB} и направление линии АВ: румб γ_{AB} и дирекционный угол α_{AB} .

Для этого на первом этапе определяется приращение координат:

$$\Delta X = X_B - X_A \quad (1)$$

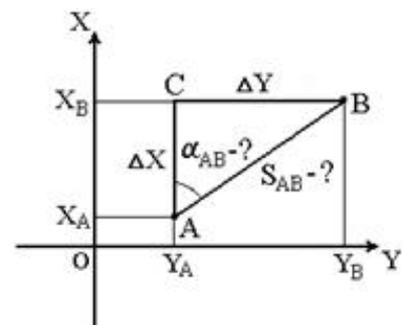


Рисунок 5 - Расположение участка ВЛЭП 10 кВ на координатной плоскости

$$\Delta Y = Y_B - Y_A \quad (2)$$

А затем вычисляется величина угла γ_{AB} :

$$\operatorname{tg} \gamma_{AB} = \Delta Y / \Delta X \quad (3)$$

По знакам приращений координат вычисляется четверть, в которой располагается румб, и его название. Используя зависимость между дирекционными углами и румбами, находится дирекционный угол α_{AB} .

Для контроля расстояние S_{AB} дважды вычисляется по формулам:

$$S_{AB} = \Delta X = \Delta Y = \Delta X \cdot \sec \alpha_{AB} = \Delta Y \cdot \operatorname{cosec} \alpha_{AB} \quad (4)$$

$$\cos \alpha_{AB} \sin \alpha_{AB} \quad (5)$$

$$S_{AB} = \Delta X = \Delta Y = \Delta X \cdot \sec \gamma_{AB} = \Delta Y \cdot \operatorname{cosec} \gamma_{AB} \quad (6)$$

$$\cos \gamma_{AB} \sin \gamma_{AB} \quad (7)$$

Длину провода на участке SAB можно определить также по формуле

$$S_{AB} = (dx \cdot 2 + dy \cdot 2) \cdot 0.5 \quad (8)$$

Применение предлагаемой системы мониторинга действия ветровых нагрузок на провода ВЛЭП 10 кВ позволит оперативно и своевременно оценивать фактический износ провода на каждом пролете, с известной токовой нагрузкой и стрелой провеса проводов, с учетом негативного влияния ветра за любой период времени (день, неделя, декада, месяц, квартал, год) [10].

Полученная информация позволит оптимизировать процесс организации ремонтно-восстановительных работ в распределительных сетях 10 кВ, за счет своевременной реализации мероприятий технического обслуживания и ремонта в отношении наиболее изношенных участков сети.

Накопленная информация, характеризующая негативное влияние ветровых нагрузок, на отдельные участки ВЛЭП 10 кВ, а также размер эксплуатационных издержек, затраченных на устранение последствий этого влияния, позволят энергетикам в дальнейшем планировать потенциальный фронт ремонтно-восстановительных работ, для каждого из участков ВЛЭП 10 кВ, на основании поступающего с гидрометцентра прогноза параметров ветровой нагрузки. Данное обстоятельство позволит более эффективно формировать численность ремонтного персонала и оптимальный резерв материально-технических ресурсов, что в целом весьма положительно отразится на эффективности функционирования распределительной электрической сети 10 кВ и надежности электроснабжения потребителей.

Список литературы

1. Усманов Ф.Х. Анализ отключений сельских ВЛ 6–10 кВ / Ф.Х. Усманов, В.Ю. Кабашов, В.А. Максимов // Электрические станции. – 1980. – №8. – С. 56–58.
2. Ударов В.М. Методические указания по количественной оценке механической надежности действующих воздушных линий напряжением 0,38–10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках // Руководящие материалы по проектированию электрических сетей. М.: ОАО «РОСЭП», 2014. С. 91–97.
3. Кабашов В.Ю. Анализ повреждаемости проводов сельских ВЛ 10 (6) кВ при воздействии неблагоприятных климатических факторов // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции (15 мая 2015 г., г. Уфа). В 2 ч. Ч.2. – Уфа: АЭТЕРНА, 2015. – С. 41–42.
4. Гавриченко А.И. Экономическая эффективность мероприятий, повышающих электробезопасность сельских распределительных сетей 10 кВ с изолированной нейтралью Орловской области / А.И. Гавриченко, В.А. Чернышов // Энергообеспечение и безопасность. Сборник материалов II Международной выставки-Интернет-конференции. Орел, 2008. С. 326–331.

5. Чернышов В.А. Исследования дефектов в плоских проводниках с помощью электронно-оптического муара/ В.А. Чернышов, Е.А. Печагин., А.В. Коломейченко //Авиаперспектива. Региональный сборник научных трудов. Воронеж, 2017. С. 83-92.

6. Хальясмаа, А.И. Диагностический комплекс для оценки состояния воздушных линий электропередачи / А.И. Хальясмаа, Д.И. Близнюк, А.М. Романов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – №4 (15). – С. 46-53.

7. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. Учебное пособие для ву-зов. 2-е изд., доп. и перераб., 1976. - 479 с.

8. Лошкарёв М.О. Повышение надежности функционирования воздушных линий электропередачи 10 кВ посредством дистанционного автоматического контроля и регулирования стрелы провисания провода // Физика и современные технологии в АПК: Материалы XII Всероссийской (с международным участием) молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников – Орёл: Издательство «Картуш», 2021. – 319-321 с.

9. Чернышов В.А. Методическое и программное обеспечение экологической безопасности воздушных линий электропередачи разного класса напряжения / В.А. Чернышов, Л.А. Чернышова //Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2013. № 1 (40). С. 198-203.

10. Качанов, А.Н. Теоретические аспекты краткосрочного прогнозирования однофазных замыканий на землю в воздушных распределительных сетях 10 кВ / А.Н. Качанов, В.А. Чернышов, Е.А. Печагин, А.В. Кобелев // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 2 (60). С.28-38

Чернышов Вадим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89534138034, E-mail: blackseam78@mail.ru

Рыков Алексей Андреевич, магистрант 2 курса, направление подготовки 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника" ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89963491001, E-mail: rykov-alex@mail.ru

Лошкарёв Максим Олегович, магистрант 2 курса, направление подготовки 13.04.02 "электроэнергетика и электротехника" ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, тел. 89536132255, E-mail: maxim.loshkarev@mail.ru

UDC 621.517.4

JUSTIFICATION OF THE PERFORMANCE OF APPLICATION OF THE WIRE TENSION MONITORING AT 10 kV TRANSMISSION LINES SECTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF WIND LOADS

Chernyshov V.A., Loshkarev M. O., Rykov A. A.

Russia, Oryol, FSBEI HE "OSU named after I.S.Turgenev"

Abstract: The expediency of using monitoring of the tensile force of wires on sections of overhead power transmission lines with a voltage of 10 kV, taking into account the effect of wind load, has been substantiated. The specifics of the functioning of the proposed event and the main circuitry solutions for its implementation are considered.

Key words: overhead transmission lines 10 kV, wire tension, wind load, monitoring of technical condition, wind rose.

Bibliography

1. Usmanov F.H. Analysis of disconnections of rural overhead lines 6-10 kV / F.H. Usmanov, V.Y. Kabashov, V.A. Maksimov // Electric Stations. - 1980. - №8. -С.56-58.

2. Udarov V.M. Methodological guidelines for the quantitative assessment of mechanical reliability of operating overhead lines of 0.38-10 kV under ice and wind loads // Guidelines for the design of electrical networks. М.: JSC "ROSSEP", 2014. С.91-97.

3. Kabashov V.Yu. Analysis of damageability of conductors of rural overhead lines 10 (6) kV under the impact of adverse climatic factors // Interaction of science and society: problems and prospects: collection of articles of the International Scientific-Practical Conference (May 15, 2015, Ufa). In 2 parts. Ufa: Aeterna, 2015. - С.41-42.

4. Gavrichenko A.I. Economic efficiency of measures that improve electrical safety of rural distribution networks 10 kV with isolated neutral of the Orlov region / A.I. Gavrichenko, V.A. Chernyshov // Power Supply and Security. Collection of materials of II International exhibition-internet-conference.Оrel, 2008.С. 326-331.

5. Chernyshov, V.A. Investigations of the defects in the flat conductors by means of the electron-optical moiré / V.A. Chernyshov, E.A. Pechagin, A.V. Kolomeichenko // Aviaperspektiva. Regional collection of scientific papers. Voronezh, 2017. С. 83-92.

6. Haljasmaa A.I. Diagnostic complex to assess the state of overhead power lines / A.I. Haljasmaa, D.I. Bliznyuk, A.M. Romanov // Bulletin of SUSU. Power Engineering Series. - 2015. - №4 (15). - С. 46-53.

7. Venikov V.A. Theory of similarity and modeling. Textbook for universities. 2nd edition, revision, 1976. - 479 с.

8. Loshkarev M.O. Enhancement of reliability of overhead power lines 10 kV by means of remote automatic control and regulation of the sag handle // Physics and Modern Technologies in Agricultural Complex: Proceedings of XII All-Russian (with international participation) youth conference of young scientists, students and schoolchildren - Oryol: Kartush Publisher, 2021. - 319-321 с.

9. Chernyshov V.A. Methodological and software environmental safety of overhead power lines of different voltage classes / V.A. Chernyshov, L.A. Chernyshova // Bulletin of Orel State Agrarian University. 2013. № 1 (40). С.198-203.

10. Kachanov, A.N. Theoretical aspects of short-term forecasting of single-phase earth faults in overhead distribution networks 10 kV / A.N. Kachanov, V.A. Chernyshov, E.A. Pechagin, A.V. Kobelev // Vesti vysokikh izuchenii Chernozemja. 2020. № 2 (60). С.28-38.

Chernyshov Vadim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving of FSBEI VO "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe highway, 29, tel. 89534138034, E-mail: blackseam78@mail.ru

Rykov Alexey Andreevich, 2nd year undergraduate student, direction of training 04.13.02 "Electric power and electrical engineering" FSBEI VO "OSU named after IS Turgenev", Orel, Naugorskoe shosse, 29, tel. 89963491001, E-mail: rykov-alex@mail.ru

Loshkarev Maxim Olegovich, 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. 89963491001, E-mail: maxim.loshkarev@mail.ru

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Качанов А.Н., Каменский В.В.

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

В статье представлены результаты применения метода зеркальных отображений и программного продукта ELCUT для расчетов основных параметров электромагнитного поля, возникающего в окружающей среде при транспортировке электрической энергии по воздушным линиям электропередач с целью оценки электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: метод зеркальных отображений, программный продукт ELCUT, основные параметры электромагнитного поля, воздушные линии электропередач.

При проектировании и эксплуатации линий электропередач (ЛЭП) разных классов напряжения возникают вопросы, связанные с оценкой их влияния на технические и биологические объекты, находящиеся в непосредственной близости. Уровни напряжённости электрического (Е) и магнитного (Н) полей в зоне прохождения трасс ЛЭП регламентируются нормативно-правовыми документами [1,2].

В практике инженерных расчётов для определения указанных выше параметров электромагнитных полей вдоль ЛЭП широко используется метод зеркальных отображений. В последнее время для расчета полевых задач успешно применяются такие программные продукты, как ANSYS, ELCUT, Femlab, FLUX, JMAG-Designer, QuickField и другие [3,4,5]. Указанные программные продукты позволяют выполнять моделирование разнообразных физических процессов, протекающих в технических системах разного уровня сложности и получать пространственно-временные картины распределения основных параметров, характеризующих исследуемый объект.

Для исследования влияния электромагнитных полей высоковольтных линий электропередач на электромагнитную обстановку (ЭМО) в зоне их эксплуатации были использованы методы зеркальных отображений и лицензионный программный продукт ELCUT, который позволяет проводить анализ различных систем, в том числе и при решении задач электромагнитной совместимости в электрических сетях [6].

Оценкасостояния ЭМО, на первом этапе исследований, была проведена для одноцепной ЛЭП-750 кВ (рис.1) и линии связи (ЛС), проходящей вблизи ЛЭП, с использованием метода зеркальных отображений (рис. 2).

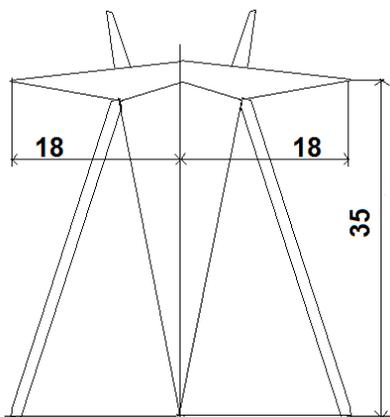


Рисунок 1 – Конструкция промежуточной одноцепной опоры с горизонтальным расположением проводов на напряжение 750 кВ

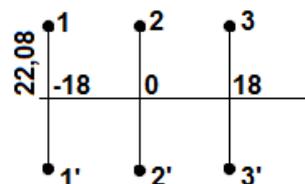


Рисунок 2 – Зеркальное отображение

Данный метод позволяет найти значение потенциала, наводимого электрическим полем ЛЭП-750 кВ как в охранной зоне, так и за её пределами. При определении потенциала нужно учитывать влияние ЛС (U_2), оказывающее встречное воздействие на ЛЭП (U_1). Определить собственные и взаимные потенциальные коэффициенты можно по формулам [7]:

$$\begin{cases} U_1 = \alpha_{11} \cdot \tau_1 + \alpha_{12} \cdot \tau_2 \\ U_2 = \alpha_{21} \cdot \tau_1 + \alpha_{22} \cdot \tau_2 \end{cases} \quad (1)$$

где α_{11}, α_{11} и α_{12}, α_{22} – собственные и взаимные потенциальные коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик ЛЭП и тел, находящихся в зоне ЛЭП; τ_i – заряды тел.

Собственные потенциальные коэффициенты определяются по формуле:

$$\alpha_{nn} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_n}{r_n}, \quad (2)$$

где r_n – радиус провода или эквивалентный радиус для расщепленной фазы, м; h_n – средняя высота подвеса провода над землей; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Взаимные потенциальные коэффициенты определяются по формуле:

$$\alpha_{nm} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{b_{nm}}{a_{nm}}, \quad (3)$$

где a_{nm} – расстояние от фазного провода ЛЭП или провода ЛС m до провода фазы n , b_{nm} – расстояние от провода фазы ВЛ или провода ЛС m до зеркального изображения фазы n .

Используя матричную алгебру, были найдены заряды проводов ЛЭП:

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где α_{ii} и α_{ij} – собственные и взаимные потенциальные коэффициенты проводов фаз ЛЭП; U_1, U_2, U_3 – фазные напряжения проводов.

Значение потенциала (ϕ_m) в любой точке пространства вокруг ЛЭП, с учетом суммарного действия трех фаз на эту точку рассчитываем по формуле [7]:

$$\phi_m = a_{1m} \cdot \dot{t}_1 + a_{2m} \cdot \dot{t}_2 + a_{3m} \cdot \dot{t}_3(5)$$

Результаты расчетов характера распределения ϕ_m в зоне ± 100 м от оси опоры ЛЭП-750 кВ в нормальном и аварийном режимах работы (обрыв двух дальних от ЛС фаз) представлены на рисунках 3 и 4.

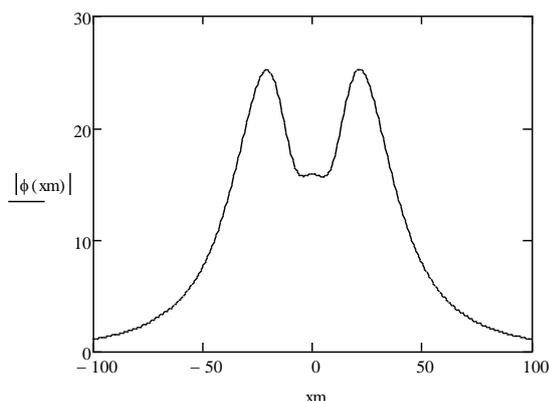


Рисунок 3 – Распределение модуля ϕ_m в охранной зоне ЛЭП в нормальном режиме работы

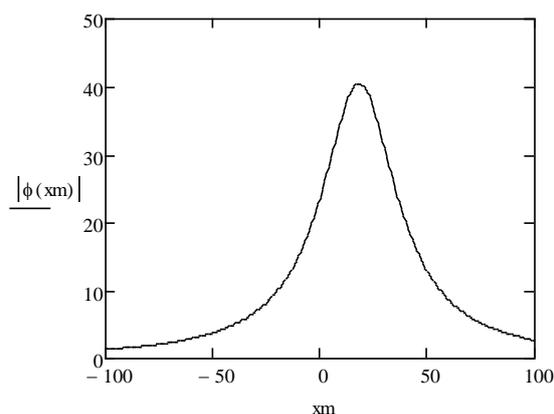


Рисунок 4 – Распределение модуля ϕ_m в охранной зоне ЛЭП в аварийном режиме работы (обрыв двух фаз)

На рисунках 5 и 6 приведены результаты расчетов ЭДС, наведенной электромагнитным полем ЛЭП в ЛС для нормального и аварийного режимов работы ЛЭП (однофазное к.з. на землю).

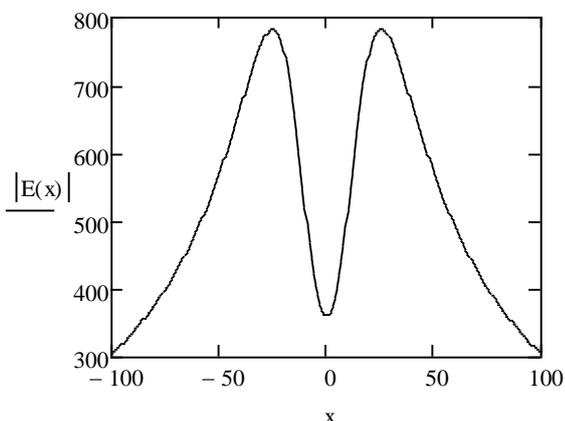


Рисунок 5 – Распределение наведенной ЭДС в охранной зоне ЛЭП в нормальном режиме работы

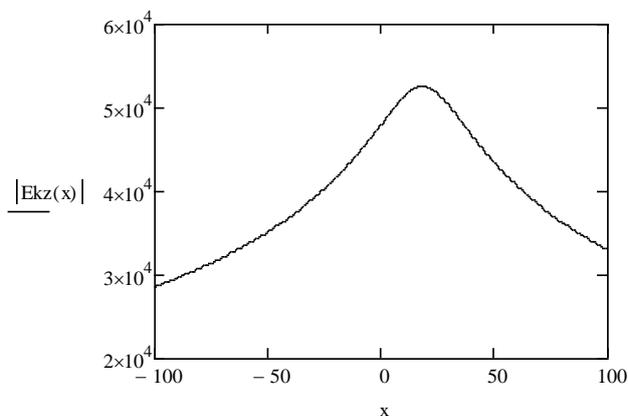


Рисунок 6 – Распределение наведенной ЭДС в охранной зоне ЛЭП при однофазном коротком замыкании

Как видно из рисунков, метод зеркальных отображений позволяет рассчитывать основные параметры электромагнитных полей вдоль действующих высоковольтных линий электропередач любого класса напряжений, как в нормальном, так и аварийном режимах работы с целью оценки состояния ЭМО. Однако данный метод является достаточно трудоемким.

Использование программного продукта ELCUT позволило устранить указанный недостаток и получить результаты, представленные на рисунках 7-10.

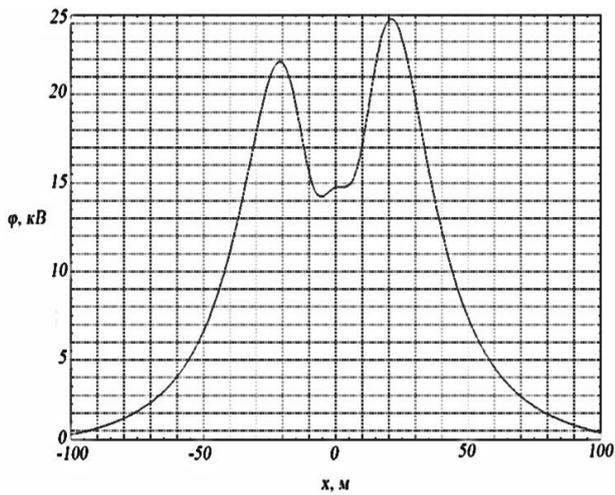


Рисунок 7 – Распределение модуля ϕ_m в охранной зоне ЛЭП в нормальном режиме работы

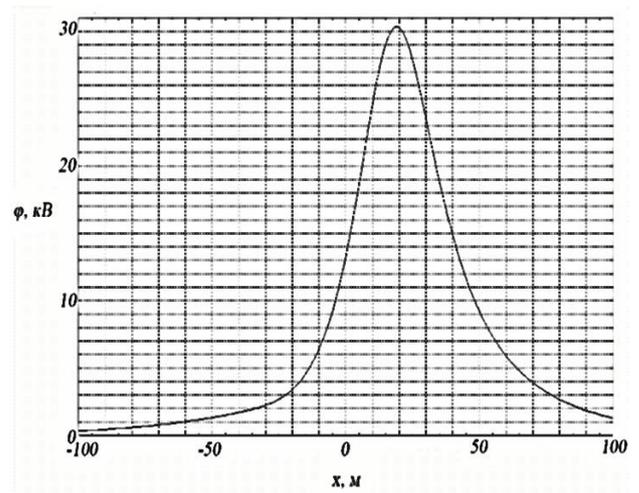


Рисунок 8 – Распределение модуля ϕ_m в охранной зоне ЛЭП в аварийном режиме работы (обрыв двух фаз)

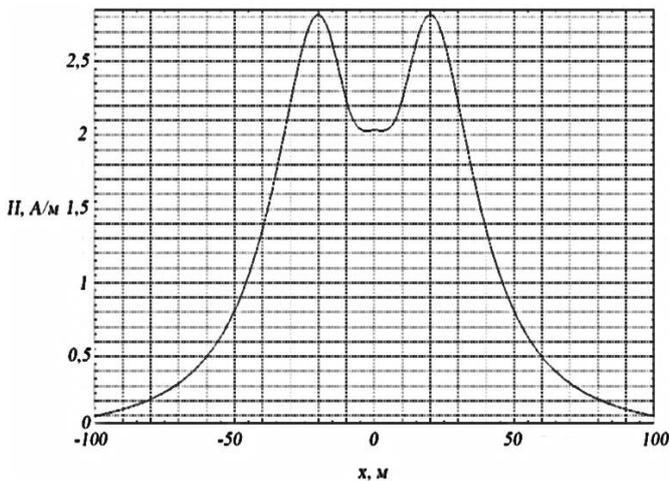


Рисунок 9 – Распределение напряженности магнитного поля в охранной зоне ЛЭП в нормальном режиме работы

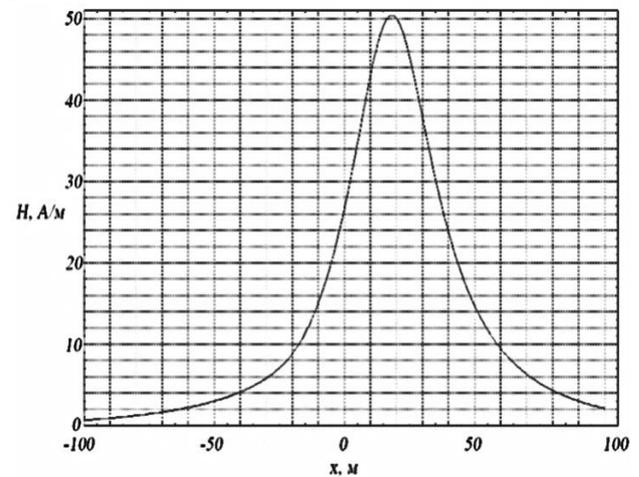


Рисунок 10 – Распределение напряженности магнитного поля в охранной зоне ЛЭП при однофазном коротком замыкании

Анализ приведенных в статье графиков подтвердил возможность использования программной среды ELCUT для оценки ЭМО вдоль линий электропередач любых уровней напряжения. При этом время, затрачиваемое на выполнение расчетов, значительно сокращается. Метод может быть полезен для оценки воздействия высоковольтных линий электропередач, проходящих через города и населенные пункты, как на технические, так и психофизиологические объекты.

Список литературы

1. ГОСТ Р. 51317.6.2-99 (МЭК 61000-6-2-99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е издание М., 2003
3. Качанов, А.Н. Анализ электромагнитных и тепловых полей в рабочем зазоре индуктора для нагрева металлических изделий в поперечном электромагнитном поле [Текст] / А.Н. Качанов, Н.А. Качанов, Т.Г. Королева, А.С. Алехина // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2021. – № 2 (346). – С. 166-172
4. Качанов, А.Н. Обоснование выбора программного продукта для моделирования электромагнитных и тепловых полей в системах индукционно-резистивного нагрева [Текст] / А.Н. Качанов, А.Ю. Пронин // *Всероссийская научно-практическая конференции с международным*

участием имени академика А.Г. Шипунова: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (26 марта 2021., г. Ливны). – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021. – С. 61-65

5. Качанов, А.Н. Моделирование электромагнитных и тепловых полей в системах «ИРН – Нагреваемая текучая среда [Текст] / А.Н. Качанов, А.Ю. Пронин //Форум молодежной науки, Выпуск 2, № 2, 2021. С. 11-17

6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 6.3. Руководство пользователя - Санкт-Петербург: Производственный кооператив TOP, 2017. – 296 с.

Качанов Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», 302026, г. Орёл, Комсомольская ул., 95.

E-mail: kan@ostu.ru, тел. 8 (4862) 41-98-53

Каменский Вадим Владимирович, студент гр. 01-ЭЭМ, кафедра электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», 302026, г. Орёл, Комсомольская ул., 95.

E-mail: kamensky.vadik@yandex.ru, тел. 8 (999) 604-94-55

EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC SITUATION IN THE AREA OF OPERATION OF AIR POWER LINES

Kachanov A.N., Kamensky V.V.
Russia, Oryol, «OGU im. I.S. Turgenev»

The article presents the results of applying the method of mirror images and the ELCUT software product for calculating the main parameters of the electromagnetic field that occurs in the environment during the transportation of electrical energy through overhead power lines in order to assess the electromagnetic environment.

Key words: the method of mirroring, the ELCUT software product, the main parameters of the electromagnetic field, overhead power lines.

Bibliography

1.GOST R. 51317.6.2-99 (IEC 61000-6-2-99). Electromagnetic compatibility of technical means. Immunity to electromagnetic interference of technical equipment used in industrial areas. Requirements and test methods.

2.Rules for the construction of electrical installations. 7th edition M., 2003

3. Качанов, А.Н. Analysis of electromagnetic and thermal fields in the working gap of an inductor for heating metal products in a transverse electromagnetic field [Text] / A.N. Kachanov, N.A. Kachanov, T.G. Koroleva, A.S. Alekhina // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2021. - No.2 (346). - S. 166-172

4. Качанов, А.Н. Justification of the choice of a software product for modeling electromagnetic and thermal fields in induction-resistive heating systems [Text] / A.N. Kachanov, A. Yu. Pronin // All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation named after Academician A.G. Shipunova: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation (March 26, 2021, Livny). - Oryol: OSU named after I.S. Turgenev, 2021.- S. 61-65

5. Качанов, А.Н. Modeling of electromagnetic and thermal fields in the systems "IRN - Heated fluid medium [Text] / A.N. Kachanov, A. Yu. Pronin // Forum of Youth Science, Issue 2, No. 2, 2021. S. 11-17

6. ELCUT. Simulation of two-dimensional fields by the finite element method. Version 6.3. User's Guide - St. Petersburg: Production Cooperative TOP, 2017.- 296 p.

Kachanov Alexander Nikolaevich, Dr. sciences, professor, head. Department of Electrical Equipment and Energy Saving FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev ", 302026, Oryol, Komsomolskaya st., 95.

E-mail: kan@ostu.ru, tel. 8 (4862) 41-98-53

Kamensky Vadim Vladimirovich, student gr. 01-EEm, Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI VO "OSU named after I.S. Turgenev ", 302026, Oryol, Komsomolskaya st., 95.

E-mail: kamensky.vadik@yandex.ru, tel. 8 (999) 604-94-55

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕЗАПУСКА УСТРОЙСТВА

Филина А. В., Казакова Д. А.

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

Статья посвящена изучению целесообразности применения электромагнитного реле, используемого для защиты различных систем, в том числе и систем энергоснабжения, описаны преимущества и недостатки электронных средств на его основе, а также предложены варианты решения некоторых проблем функционирования аппаратов с учетом использования контролирующих устройств с целью повышения энергоэффективности систем электроснабжения.

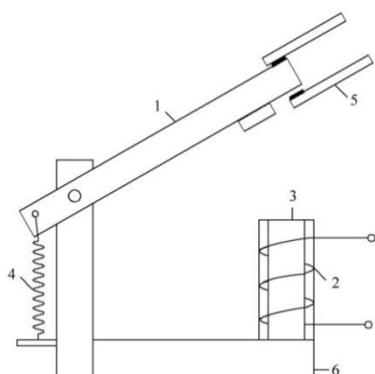
Ключевые слова: электромагнитное реле, катушка индуктивности, электронные устройства, коммутационные способности.

Любая система электроснабжения, представляющая собой совокупность источников, преобразовательных, распределительных, передающих систем энергии, должна иметь в своей конструкции собственную внутреннюю защиту, предотвращающую возникновение каких-либо внештатных ситуаций. Строение таких защитных систем, называемых релейными, довольно сложное, но принцип их работы всегда основывается на физических явлениях, происходящих в электромагнитных реле, что и дало им такое название.

В начальный момент коммутации различные электротехнические устройства, например электродвигатель, электромагнитный пускатель, лампа накаливания и другие характеризуются пусковыми токами, которые оказываются больше по величине в несколько раз, чем их рабочие токи в установившемся режиме [1].

Это происходит из-за того, что для запуска устройства требуется воздействие сильного магнитного поля, позволяющего вывести устройство из статического положения. В период включения на обмотках наблюдается очень маленькое сопротивление, поэтому ток растет практически при постоянном напряжении. Ток начинает стремиться к номинальному значению, соответствующему установившемуся режиму, только тогда, когда в обмотках появляется индуктивное сопротивление, то есть когда двигатель уже находится в работе.

Каждый прибор имеет свои конкретные характеристики, соответствующие техническим нормативам. К таким характеристикам относятся, например, амплитуды напряжений и токов, частота сети, формы и фазы сигналов, критериев мощности и другие параметры. Под каждую характеристику подбирается определенный вид релейной защиты, который постоянно отслеживает различные параметры сети и сравнивает их с установочными данными; срабатывает, переключая положение контактов, если контролируемая величина не соответствует установочной; отключает питание в схеме, таким образом ликвидируя неисправность.



**Рисунок 1 -
Устройство электромагнитного
реле**

Под каждую конкретную схему необходимо подбирать катушки индуктивности с конкретными величинами постоянного и переменного тока [2]. Это делается для того, чтобы для управления катушкой использовать дополнительный источник. Величины токов и напряжений чаще всего указываются на самом реле. Коммутироваться контактами может и постоянный, и переменный ток. На рисунке 1 представлено строение электромагнитного реле.

Электромагнитное реле состоит из подвижного якоря (рис. 1), подпружиненного на пружине 4, электромагнитной катушки 2, намотанной на ферромагнитный стержень 3, подвижных и неподвижных контактов 5. Якорь и катушка закреплены на основании 6.

Принцип действия электромагнитного реле достаточно прост: когда на обмотку подается напряжение, в ней появляется электромагнитное поле, за счет которого якорь притягивается к сердечнику катушки. Это приводит к тому, что контакты смыкаются или размыкаются, то есть переключаются на другой режим.

На рисунке 2, представленном ниже, изображен график изменения магнитного потока в обмотке реле.

Для коммутирования электрических цепей часто применяются электронные ключи, которые управляют кратковременными пусковыми токами в исправной точке. Такие электронные ключи по мощности рассеяния рассчитаны на токи в установившемся режиме, что позволяет им выдерживать серьезные импульсные перегрузки.

В зависимости от конструкции определяются коммутационные способности аппарата. Главным показателем коммутационной способности является максимальное значение тока размыкания цепи. Для управления мощной индуктивной и резистивной нагрузками на мощных электромагнитных коммутационных устройствах добавляется дугогасительная камера, способствующая предотвращению горения, быстрого гашения и охлаждения электрической дуги.

Для каждого реле существует мощность его срабатывания $S_{ср}$, т.е. минимальная мощность на зажимах реле, при которых оно срабатывает. Также каждое реле имеет свою характеристику чувствительности, которая характеризуется наименьшим напряжением срабатывания реле $U_{ср}$ при данных значениях тока $I_{ср}$ и углового коэффициента $\phi_{ср}$. Графики зависимости мощности и напряжения срабатывания от тока показаны на рисунке 3.

Так как для поддержания поля в свободном пространстве по сравнению с магнитным веществом необходимо больше энергии, между изготовленными из магнитного материала телами всегда присутствует сила притяжения. Это происходит всегда, когда эти тела располагаются во внешнем намагничивающем поле.

Когда намагничивающая сила между ферромагнитными пружинными пластинками становится больше силы пружины, зазор между ними закрывается. И наоборот, когда сила пружины превышает намагничивающую - зазор открывается. Такие закрывания и открывания зазора используются, например, для замыкания и размыкания электрических цепей.

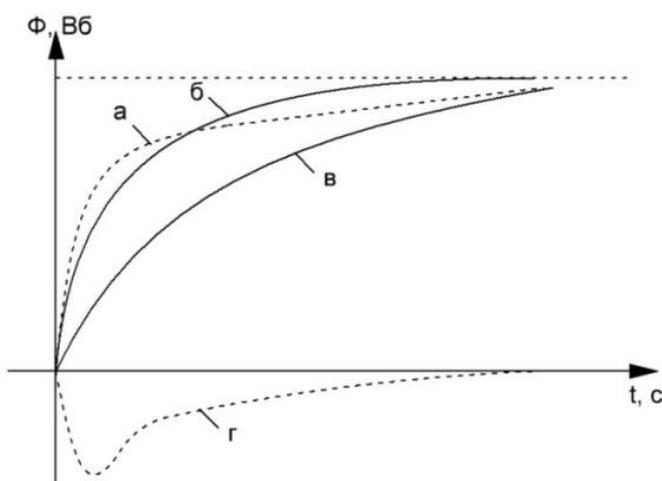


Рисунок 2 - Изменение магнитного потока в обмотке реле:

а – график потока основной обмотки, б – график магнитного потока при отсутствии короткозамкнутой обмотки г, в – результирующий магнитный поток при наличии короткозамкнутой обмотки

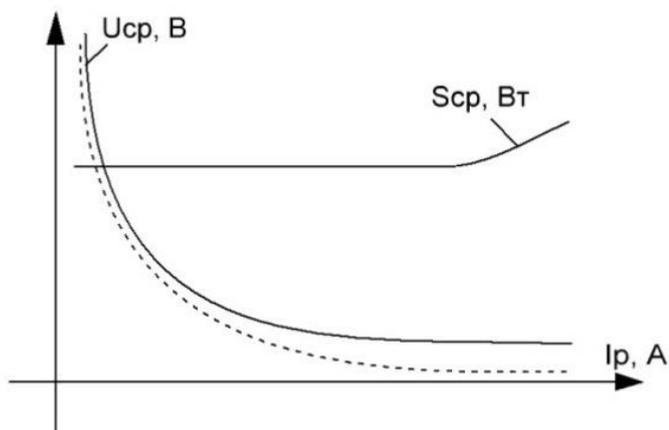


Рисунок 3 - Графики зависимости мощности и напряжения срабатывания от тока

На рисунке 4 представлена кривая намагничивания, характеризующее состояние ферромагнитного поля. При подаче на катушку реле тока, силовые линии магнитного поля начинают пронизывать ее сердечник. Якорь, изготовленный из намагничивающегося материала, притягивается к сердечнику катушки. По графику (рис. 4) видно, что при увеличении тока в катушке магнитная индукция сердечника быстро возрастает (до момента 1), затем, на интервале 1 – 2 интенсивность начинает замедляться и к моменту 2 происходит магнитное насыщение. Иногда на якоре устанавливают контактную медную пластинку и провод. Это делается для того, чтобы, когда якорь находится под напряжением, по медным шинам подавалось напряжение на неподвижный контакт.

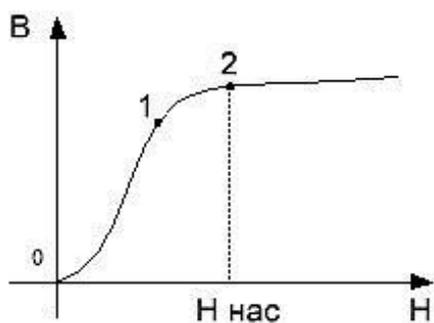


Рисунок 4 - Кривая намагничивания ферромагнетика

При подключении напряжения к катушке, магнитное поле притягивает якорь, который, в свою очередь, размыкает или замыкает контакты. Возвращение якоря в нормальное состояние возвратной пружиной происходит, когда напряжение опять уменьшается.

В подобной системе часто появляются разнообразные неполадки, такие как заклинивания электромагнитных пускателей или замыкания расстояний между витков в обмотке, которые могут приводить к поддержанию большего коммутируемого тока в цепи нагрузки, чем рабочий ток цепи в установившемся режиме. В случае если в конструкции реле не предусмотрены защитные меры, то длительная перегрузка по току,

возникающая из-за неисправностей нагрузки, обычно выводит электромагнитное реле из строя.

Для того чтобы работа электромагнитного реле удовлетворяла требованиям необходимо находить альтернативные решения. Удачную эксплуатацию реле можно будет осуществить, например, обеспечив осуществление оперативного контроля состояния нагрузки. Так же важным моментом для удобного использования устройства в реальных условиях является возможность автоматического перезапуска устройства после срабатывания защиты. Защита может действовать, к примеру, от короткого замыкания или от перегрузки по току, когда происходит снижение энергопотребления во время перехода в режим хранения [3].

Однако большинство подобных устройств основано на измерении задержки по времени. Стоит учитывать, что из-за переходных процессов (емкостных нагрузок) или, например, в случае изменения сопротивления нагрузки, первичные значения тока коммутации изменяются и могут сильно превышать величину тока установившегося режима. В таких случаях задержку необходимо изменить. Сделать это можно, например, увеличивая задержку отключения устройства до стабилизации параметров цепи нагрузки. Во время использования оборудования, задержки могут отличаться, однако, процент ошибок в данном случае все равно достаточно велик, так как задержка по току не является постоянным параметром для всех возможных условий.

Дабы уменьшить количество ошибок, было найдено более рациональное решение. Было решено основываться не на задержке, а добавить специальное контролирующее устройство – «счетчик».

Реле таким специальным устройством имеет в своем составе электронный ключ и датчик тока нагрузки, соединенные с нагрузкой последовательно, а так же блоки управления электронным ключом и защиты от перегрузок по току. Выход блока управления электронным ключом подключен к входу электронного ключа, тогда как блок защиты от перегрузок по току преобразует переменный сигнал, снимаемый с датчика тока нагрузки переменного сигнала, в серию логических импульсов, поступающих на счетный вход блока

управления электронным ключом. В этом случае вход установки электронного ключа является входом управления электромагнитного реле.

Свою популярность стабилизаторы и другие электронные устройства, основанные на работе реле, обрели главным образом, из-за дешевизны, простоты в конструировании, компактности и отсутствия необходимости специального обслуживания.

Действительно, многие решения различных проблем, возникающих при работе, исследовании и конструировании электронных устройств на основе электромагнитного реле, достаточно хороши и могут быть полезны на практике, однако долговечность таких устройств не велика. В процессе эксплуатации и с течением времени реле изнашиваются, поэтому чтобы вовремя заметить неисправности и заклинивания, необходимы устройства, контролирующие и помогающие вовремя заметить и исправить ошибки в работе реле.

Список литературы

1. Соколова, Е.М. Электрическое и электромагнитное оборудование. Общепромышленные механизмы и бытовая техника / Е.М. Соколова.- М.: Академия, 2006.- 224с.
2. Филина, А.В. Способы управления нагрузкой в цепях переменного и постоянного тока устройств / А.В. Филина, И.В. Поздняков // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. статей науч. конф. - Курск: Юго-зап. гос. ун-т, 2019. - 332 с.
3. Щеховцов, В.П., Электрическое и электромеханическое оборудование / В.П. Щеховцов.- М.: Издательство «Профессиональное образование», 2004.- 407с.

Филина Анна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, тел. 8(953)810-03-05.

Казакова Диана Андреевна, студентка кафедры «Конструирование и технология электронных средств» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, тел. 8(980)361-72-79.

UDC 621.3.04

USING AN ELECTROMAGNETIC RELAY TO AUTOMATICALLY RESTART THE DEVICE

Filina A.V., Kazakova D.A.

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

The article is devoted to the study of the feasibility of using an electromagnetic relay used to protect various systems, including power supply systems, describes the advantages and disadvantages of electronic means based on it, and also offers solutions to some problems of the functioning of devices, taking into account the use of monitoring devices to improve the energy efficiency of power supply systems.

Keywords: electromagnetic relay, inductor, electronic devices, switching abilities

Bibliography

1. Sokolova, E. M. Electrical and electromagnetic equipment. General industrial mechanisms and household appliances/E. M. Sokolova.- M.: Academy, 2006. - 224s.
2. Filina, A.V. Electrical materials as a means of improving the efficiency of electrical equipment / A.V. Filina, A. A. Nosovets // Modern tool systems, information technologies and innovations: - Kursk: JSC "University book", 2019. - P. 205-208.
3. Shekhovtsov, V. P., Electrical and Electromechanical equipment/V. P. Shekhovtsov. - M.: publishing house "Professional education", 2004.- 407s.

Filina Anna Vladimirovna, candidate of technical science, senior lecturer at the Chair «Electrical equipment and energy saving», FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», city of Orel; tel. 8(953)810-03-05.

Kazakova Diana Andreevna, student of the Department of "Design and Technology of Electronic Means" of the I.S. Turgenev OSU, Orel, tel. 8(980)361-72-79.

СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

Руководитель:

Кувалдин Александр Борисович, академик АЭН РФ, Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., проф. каф. «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии», НИУ «МЭИ», г. Москва

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТЛЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Птицын Д.В., Птицына Е.В.

Россия, г. Омск ОмГТУ

Кувалдин А.Б.

Россия, г. Москва МЭИ (НИУ)

Рассмотрены оптические характеристики обрабатываемых поверхностей (изделий) при разных режимах работы излучательных электротехнологических установок (ИЭТУ). Исследованы показатели энергетической эффективности излучательных установок со светлыми излучателями при питании током сложной формы (ТСФ): коэффициент мощности в сети установки и индивидуальный коэффициент мощности излучателя. Доказана необходимость использования двух каналов регулирования по спектру частот и амплитуд питающего напряжения (тока) установок. Целью работы является исследование электрических и энергетических параметров излучательных электротехнологических установок, влияние параметров излучателей на оптические характеристики обрабатываемых поверхностей (полиэтилена и белой офисной бумаги) для разработки рекомендаций по выбору энергоэффективных режимов.

Ключевые слова: инфракрасная зеркальная лампа, обрабатываемые поверхности (изделия), ток сложной формы, энергоэффективный режим, излучательная электротехнологическая установка

Актуальность темы. Излучательные электротехнологические установки (ИЭТУ) – это совокупность источника питания (ИП), излучателей и самого излучения, воздействующего на обрабатываемые поверхности (изделия), а также системы автоматического управления (САУ). ИЭТУ применяются в промышленности, сельском хозяйстве, пищевой промышленности и др., предназначены для термообработки изделий, сушки лакокрасочных изделий, древесины, картона, бумаги, фанеры, пряжи, дезинсекции семян, обогрева молодняка и др. Важны оптические характеристики и таких материалов, как полиэтилена, поливинилхлорида, ацетатной пленки, пенопласта и т.д. Их мощности составляют от десятков до сотен кВт. Повышение энергетической эффективности ИЭТУ с излучателями разных типов является актуальным, и подразумевает необходимость экспериментальных исследований параметров ИЭТУ, процессов в излучателях разных типов и исследованием влияния излучения на характеристики обрабатываемых изделий, процессами в ИП, работой САУ. Параметрами энергоэффективности ИЭТУ являются КПД и коэффициент мощности в сети, коэффициент мощности излучателя. Важными параметрами обрабатываемых изделий являются оптические спектры поглощения, отражения, пропускания [1, 2].

Объектом и предметом исследования в работе являются установки со светлым инфракрасным зеркальным излучателем, электрические и энергетические параметры ИЭТУ, процессы в излучателях, влияние процессов излучения на оптические характеристики обрабатываемых поверхностей (изделий).

Теоретические предпосылки применения ТСФ. В [3, 4] установлено влияние электромагнитной составляющей, наряду с температурной, на излучение газового разряда, на эффективность источников ультрафиолетового излучения и др.

В источниках питания ИЭТУ применяются индуктивные элементы – дроссели насыщения. В настоящее время, в качестве магниторегулируемых устройств, предлагают использовать дроссели насыщения из магнитомягких материалов: аморфных и нанокристаллических сплавов, обладающих малыми потерями на перемагничивание, вихревые токи, по сравнению с пермаллоями, ферритами, электротехнической сталью [5, 6, 7, 8]. Применение аморфных металлических материалов – можно рассматривать как перспективное направление повышения энергетической эффективности элементов источников питания (трансформаторов, реакторов, дросселей насыщения) и для ИЭТУ [9]. В [10] предлагается использовать ДН для регулирования частоты (спектра частот) напряжения (тока) на излучателях, вместо плавного регулирования напряжения в пределах ступени РПН трансформатора. Это также обуславливает снижение их массогабаритных показателей.

Для оценки энергетической эффективности ИЭТУ в работе использованы такие показатели как коэффициент мощности установившейся сети и индивидуальные значения коэффициента мощности излучателя. Так, в [10] даны результаты исследований показателей энергоэффективности ИЭТУ со светлыми излучателями и оптические характеристики прозрачных поверхностей: матовых стекол разных типов.

В настоящей работе исследованы режимы работы ИЭТУ, параметры излучателя – зеркальной лампы при питании ТСФ и током частотой 50 Гц и оптические характеристики обрабатываемых поверхностей: спектры поглощения, отражения, пропускания полиэтилена и белой офисной бумаги.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов физического моделирования, теории подобия [10].

Цель работы – экспериментальные исследования электрических и энергетических параметров излучательной электротехнологической установки со светлым зеркальным излучателем при питании током сложной формы, и влияния режимов работы излучателей на оптические характеристики обрабатываемых изделий (спектры поглощения, отражения, пропускания полиэтилена и белой бумаги) для разработки рекомендаций по выбору энергоэффективных режимов.

Для этого решали следующие задачи:

– разработка методики исследования на физических моделях ИЭТУ со светлым излучателем оптических спектров поглощения, отражения, пропускания полиэтилена и белой офисной бумаги;

– разработка рекомендации по повышению энергоэффективности ИЭТУ.

Опыты проводили в сравнении двух режимов: в обычном электрическом режиме с питанием током частотой 50 Гц, в новом электрическом режиме при питании ТСФ без постоянной составляющей. В обычном электрическом режиме питание ИЭТУ осуществлялось от однофазного трансформатора 220/110В с переключением ступеней напряжения без возбуждения А-Х₁, А-Х₃. Во втором – через однофазный трансформатор и дроссель насыщения. Для регулирования формы питающего напряжения (тока) использовали дроссель насыщения (ДН) [10].

Объекты исследования. Эксперименты проведены на физических моделях ИЭТУ со светлым излучателем:

белым зеркальным инфракрасным излучателем типа ИКЗ 220-250 R127 E27 (колба R127, цоколь E27, мощность 250 Вт, диаметр колбы 130 мм и высота колбы 195 мм) [10].

Характеристики обрабатываемых изделий (поверхностей):

1. Полиэтиленовая пленка – ТУ222211-005-96100508-17. Адрес производителя: «ООО Пластик Трейд», 350002, Россия, Краснодар, ул. Леваневского, 185;

2. Бумага офисная «С» 100 мкм – ГОСТ Р 57641 – 2017. Адрес производителя: АО «Монди СЛПК» Россия, 167026, г. Сыктывкар, проспект Бумажников, д. 2.

Приборы: оптоволоконный спектрометр типа AvaSpec-ULS 2048-USB2; для измерения электрических параметров - анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060[10].

Экспериментально исследовали влияние режимов работы установок с оптическими излучателями на характеристики оптических спектров пропускания, отражения, поглощения полиэтилена (см. рис. 1 – рис. 3), а для белой бумаги – даны на рис. 4 – рис.5. Составляющие мощности, потребляемой из сети, значение коэффициента мощности в сети установки с белым излучателем даны в табл. 1. В работе исследовали фотометрические и радиометрические, колориметрические параметры спектров полиэтилена, белой бумаги и излучателя. Измеряли фотометрические энергетические параметры: поток излучения, Φ , освещенность, E . Радиометрический параметр - число фотонов.

Так, интенсивность в спектре излучения излучателя при длине волны 700 нм в обычном режиме была 51000 отн. ед., в спектре пропускания полиэтилена – 38000 отн. ед., в спектре отражения полиэтилена – 8700 отн. ед. На долю поглощения полиэтилена при 700 нм – 4300 отн. ед. При регулировании спектра частот и амплитуды питающего напряжения (тока) оптические характеристики полиэтилена принимали те же значения. Для ИЭТУ с белым излучателем значение коэффициента мощности в сети увеличилось в новом режиме с 0,707 до 0,979. При этом выход фотонов с поверхности диффузора для спектров отражения полиэтилена в сравниваемых режимах был $2.49 \cdot 10^{-4}$ и $2.609 \cdot 10^{-4} \mu\text{Mol}$.

В двух сравниваемых режимах индивидуальное значение коэффициента мощности инфракрасного зеркального излучателя было равно 0,990.

Таблица 1 – Электрические и энергетические параметры излучательной электротехнологической установки с белым зеркальным инфракрасным излучателем

| Наименование электрического режима | Мощность из сети | | | Коэффициент мощности | Напряжение в узле питания, В |
|--|------------------|--------------------|----------------|----------------------|------------------------------|
| | Активная P, кВт | Реактивная Q, квар | Полная, S, кВА | | |
| Обычный режим: переменный ток 50 Гц | 0,097 | 0,098 | 0,138 | 0,707 | 115,0 |
| Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей | 0,0940 | 0,020 | 0,096 | 0,979 | 115,0 |

Аналогичные результаты получены для белой офисной бумаги. Анализ оптических спектров излучателя и белой бумаги показал, что интенсивность излучения лампы в обычном электрическом режиме при длине волны 700 нм была 51000 отн. ед., интенсивность в спектре пропускания для белой бумаги при 700 нм – 9500 отн. ед., интенсивность в спектре отражения при 700 нм – 23000 отн. ед., а на долю поглощения белой бумаги пришлось - 18500 отн. ед. В новом режиме интенсивность в спектрах пропускания, отражения и поглощения белой бумаги принимала такие же значения. Напряжение на излучателе во всех опытах - 115 В.

Электрические и энергетические параметры ИЭТУ следующие: Для ИЭТУ с белым излучателем значение коэффициента мощности в сети увеличилось также в новом режиме с 0,707 до 0,979. Для источника излучения в новом режиме выход фотонов - $1.035 \cdot 10^{-3} \mu\text{Mol}$. Освещенность и световой поток источника – 874 лк и 10983 лм. В оптических спектрах пропускания для белой бумаги освещенность и световой поток составили, соответственно, 103 лк и 1305 лм, а в спектрах отражения - 325 лк и 4099 лм. При этом выход фотонов с поверхности диффузора для спектров пропускания и отражения бумаги в новом режиме были равны $2.861 \cdot 10^{-4}$ и $5.275 \cdot 10^{-4} \mu\text{Mol}$. В обычном режиме параметры излучателя такие же.

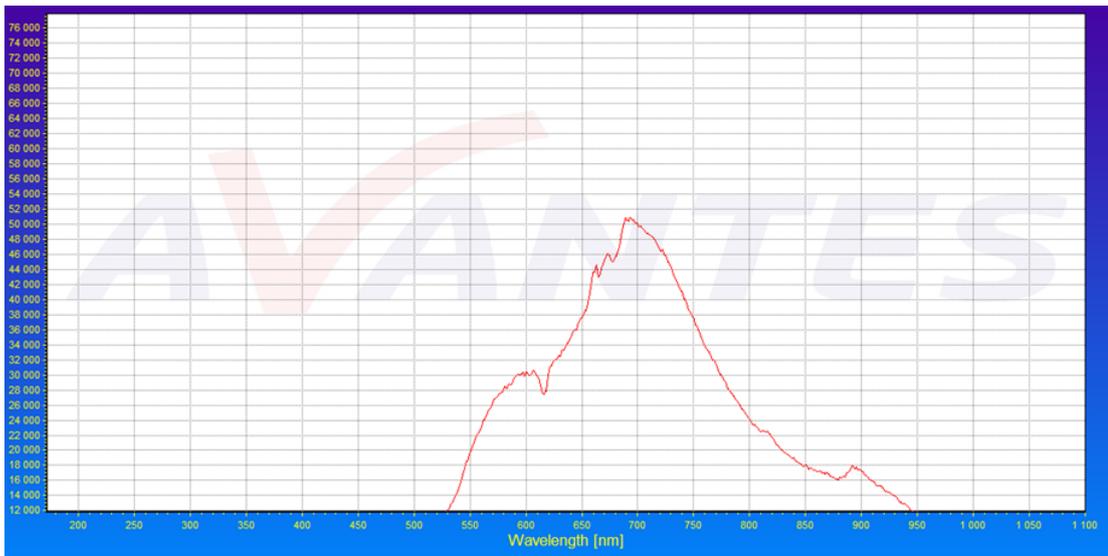


Рисунок 1- Спектр излучения белого излучателя в обычном режиме

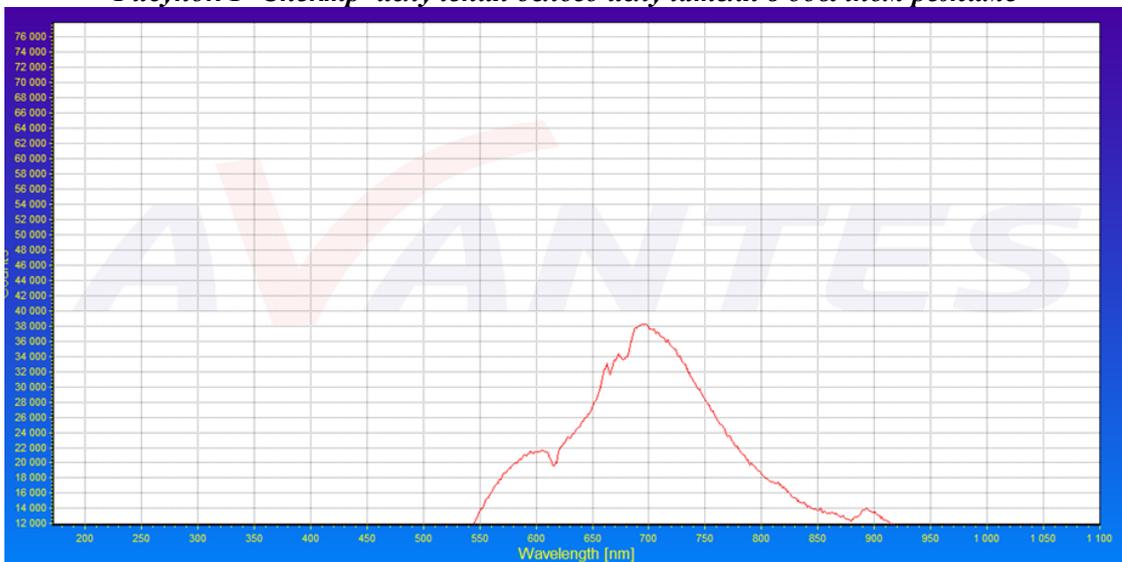


Рисунок 2- Спектр пропускания полиэтилена в обычном электрическом режиме

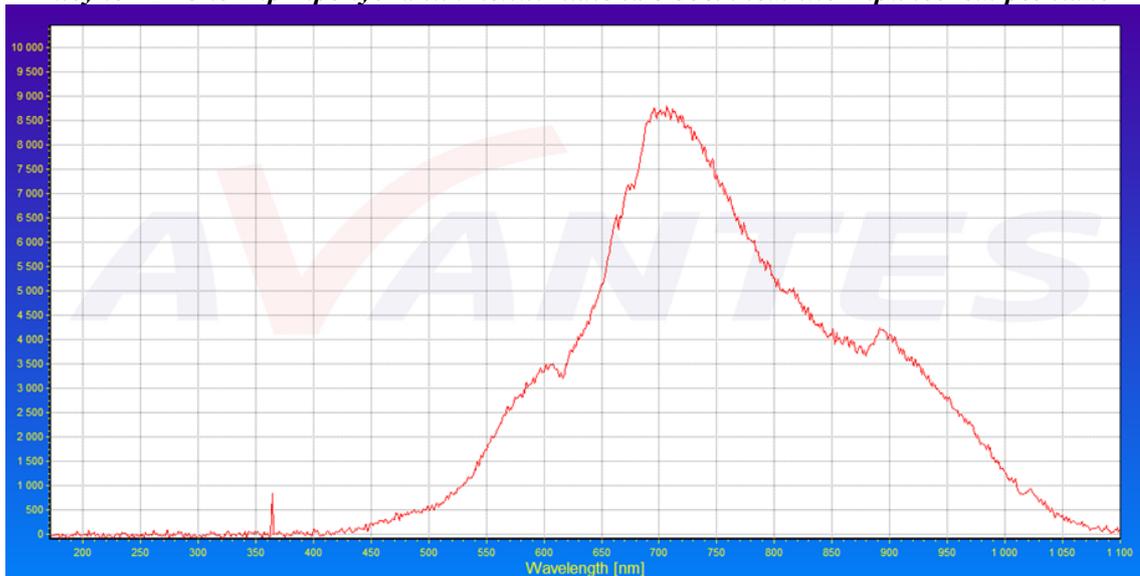
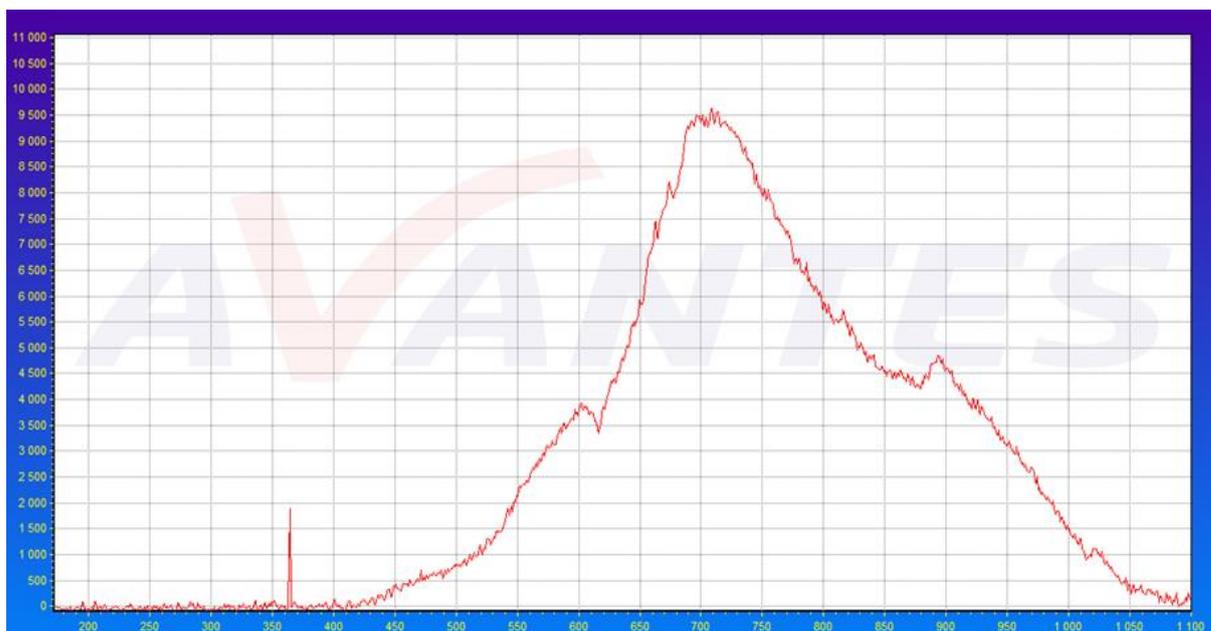
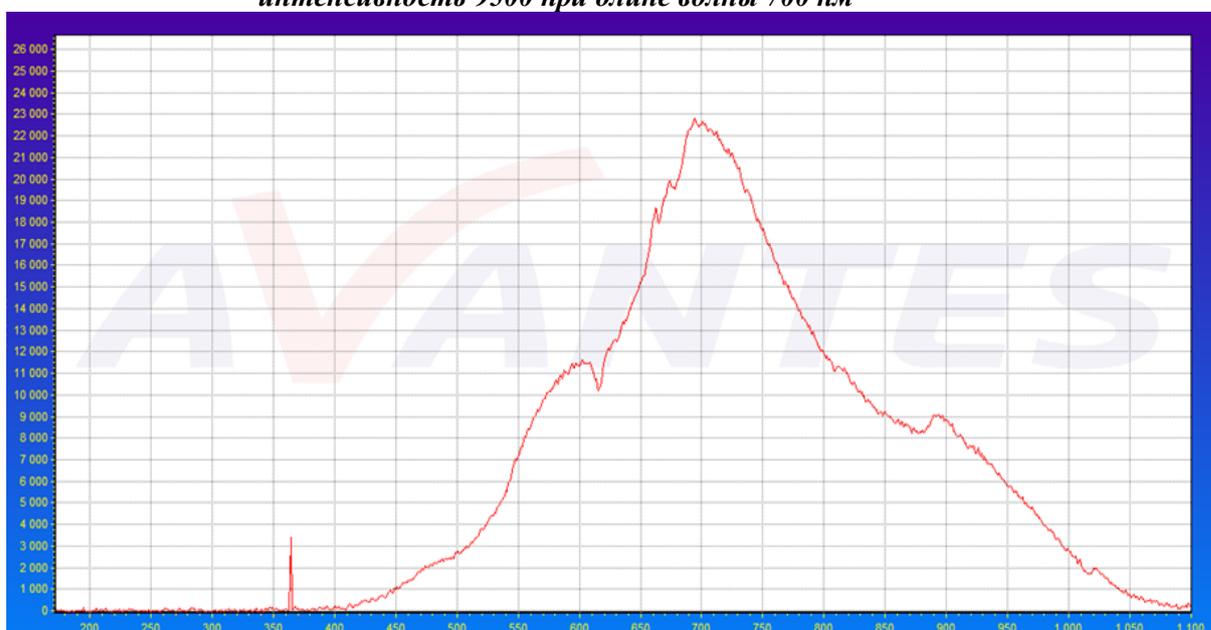


Рисунок 3 - Спектр отражения полиэтилена в обычном электрическом режиме



**Рисунок 4 - Спектр пропускания белой бумаги в обычном электрическом режиме:
интенсивность 9500 при длине волны 700 нм**



**Рисунок 5 - Спектр отражения белой бумаги в обычном электрическом режиме:
интенсивность 23000 при длине волны 700 нм**

Выводы

1. Экспериментально установлено, при использовании тока сложной формы возможны следующие положительные эффекты: работа излучательных электротехнологических установок с оптическими излучателями на более низкой ступени ПБВ (РПН) силового трансформатора с более высоким значением коэффициента мощности в сети данной установки за счет уменьшения индуктивности обмоток трансформатора.
2. Установлено, что и индивидуальные энергетические и электрические показатели работы оптических излучателей разных типов не ухудшаются в режиме питания ТСФ.
3. Оптические характеристики полиэтилена и белой бумаги (оптические спектры отражения, поглощения, пропускания) не изменялись при регулировании формы и амплитуды напряжения, но они различны для разных изделий. Это совпадает с выводами в [10].

Список литературы

1. Волф У., Цисис, Г. Справочник по инфракрасной технике. В 4-х томах. – М.: Мир, 1995-1999. – С. 15-17.
2. Гинзбург А. С. Ляховицкий Б. М. Генераторы инфракрасного излучения для пищевой промышленности. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. – 71 с.
3. Финкельбург, В. Электрические дуги и термическая плазма [Текст] /В. Филькенбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
4. S. A. Svitnev, O.A. Popov Plasma parametrs spatial distribution of low pressure ferrite-free inductive discharge //Light and Engineering 2011.1.P. 79-82
5. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В.А. Аморфные металлические материалы. // Силовая электроника, №2, 2009. – С. 86-89.
6. Austrin L., Krahn J.H., Engdahl G.A., Modeling Aroach of a Magnetic Amplifier. //Jornal of Magnetism and Magnetics Materials, Proc. of the International Conference of Magnetism (ICM 2003), May 2004, pp. E1709 – E 1710.
7. Шевцов Д.А., Турченко И.С. Однообмоточные дроссели насыщения в авиационных источниках вторичного электропитания // Вестник Московского авиационного института, №3. Т. 20, 2013. – С. 145-153.
8. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В.А. Аморфные и нанокристаллические сплавы для измерительных преобразователей. // Компоненты и технологии. № 1. 2008.
9. www.gammamet.ru – Сайт научно-производственного предприятия «ГАММАМЕТ» (Дата обращения 25.09.2021г.)
10. Птицын, Д.В. / Д.В. Птицын, Е.В. Птицына, А.Б. Кувалдин / Режимы работы белых и красных зеркальных инфракрасных излучателей при питании током сложной формы. Промышленная энергетика. – 2021. №4. – С. 39-46.

Птицын Дмитрий Вячеславович -ассистент кафедры ТиОЭОмГТУ, тел. 65-36-35. Адрес для переписки: ptitsyndv@mail.ru

Птицына Елена Витальевна – д-р техн. наук, профессор кафедры ТИОЭ ОмГТУ.

Кувалдин Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор, академик НИУ (МЭИ). Адрес для переписки: a.kuvaldin2013@yandex.ru

THE EFFECT OF LIGHT EMITTERS OPERATING MODES ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE TREATED SURFACES

Ptitsyn, D. V., Ptitsyna, E.V.

Omsk state technical University, Mira Avenue, 11 building 6, Omsk, 644000, Russia

Kuvaldin A. B.

National research University «Moscow energy Institute», Moscow, Krasnokazarmennaya Street, 14, 111250, Russia

The optical characteristics of the treated surfaces (products) under different operating modes of radiative electrotechnological installations (IETU) are considered. The energy efficiency indicators of radiating installations with light emitters when powered by a complex-shaped current (TSF) are studied: the power factor in the installation network and the individual power factor of the emitter. The necessity of using two control channels for the frequency spectrum and the amplitude of the supply voltage (current) of the installations is proved. The aim of the work is to study the electrical and energy parameters of radiating electrotechnological installations, the influence of emitter parameters on the optical characteristics of the treated surfaces (polyethylene and white office paper) for the development of recommendations on the choice of energy-efficient modes.

Keywords: infrared mirror lamp, processed surfaces (products), complex-shaped current, energy-efficient mode, radiative electrotechnological installation

Bibliography

1. Wolf U., Cisis, G. Handbook of infrared technology. In 4 volumes. - М.: Mir, 1995-1999. - pp. 15-17.
2. Ginzburg A. S. Lyakhovitsky B. M. Infrared radiation generators for the food industry. - М.: Tsniiteilegpishmash, 1971. - 71 p.

3. V., Finkelberg. Electric arcs and thermal plasma. Moscow, 1961.
4. S. A. Svitnev, O.A. Popov Plasma parametrs spatial distribution of low pressure ferrite-free inductive discharge //Light and Engineering 2011.1.P. 79-82
5. Starodubtsev Yu. N., Belozarov V.A. Amorphous metallic materials. // Power Electronics, No. 2, 2009. - Pp. 86-89.
6. Austrin L., Krah J.H., Engdahl G.A., Modeling Aroach of a Magnetic Amplifier. //Jornal of Magnetism and Magnetics Materials, Proc. of the Jnternational Conference of Magnetism (ICM 2003), May 2004, pp. E1709 – E 1710.
7. Shevtsov D.A., Turchenko I.S. Single-winding saturation chokes in aviation sources of secondary power supply // Bulletin of the Moscow Aviation Institute, No. 3. Vol. 20, 2013.- pp. 145-153.
8. Starodubtsev Yu. N., Belozarov V.A. Amorphous and nanocrystalline alloys for measuring transducers. // Components and Technologies. No.1. 2008.
9. www.gammamet.ru - Website of the scientific and production enterprise "ГАММАМЕТ" (Accessed 25.09.2021)
10. Ptitsyn, D. / D. Ptitsyn, A. Kuvaldin, E. Ptitsyna / Modes of operation of white and red mirror infrared emitters when powered by a current of complex shape. Industrial energy. – 2021. №4. – С.39-46.

УДК 621.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА

Мещеряков В.Н., Муравьев А.А., Пикалов В.В., Бойков А.И., Евсеев А.М.
Россия, г. Липецк, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)

Рассмотрены особенности конструкции электродуговых плазмотронов установки, предназначенных для нагрева поверхности металлоизделий, а также ее элементов, обеспечивающих работу установки. Приведена экспериментальная установка, рассмотрены особенности работы ее электродуговой части.

Ключевые слова: плазмотрон, плазмообразующий газ, электрическая дуга, блок управления, электропривод.

Введение

Электродуговые плазменные установки (плазмотроны), вырабатывающие низкотемпературную плазму с температурой до 2500 °С [1-5], могут найти применение в различных технологических процессах, требующих нагрева поверхности металлоизделий. Плазмотрон формирует столб плазмы, направляемый на поверхность металлоизделий. Для напыления различных материалов на поверхность изделия в зону, нагретую плазмой, могут подаваться под давлением порошковые материалы.

Наиболее простую конструкцию имеют электродуговые плазмотроны, в которых электрическая дуга горит в полости рабочей камеры, через которую проходит под давлением поток плазмообразующего газа, и созданный столб плазмы подается на обрабатываемый материал [1-5]. Рабочая камера может занимать вертикальное положение или располагаться горизонтально, возможен также поворот оси рабочей камеры. Плазмотроны с вертикальным расположением рабочей камеры с выходным каналом для плазмы направленным вниз используются в установках для сжигания твердых промышленных отходов, бытовых отходов и мусора с выработкой синтез-газа [1, 4, 5]. В таких установках плазмотрон размещен внутри закрытой печи, и ось его рабочей камеры с выходным отверстием для плазмы может располагаться под углом ко дну печи. Сжигаемые отходы загружаются на дно печи и попадают в зону действия потока плазмы. Для реализации поворота оси рабочей камеры и перемещения столба плазмы плазмотрон оснащается позиционной мехатронной системой.

Конструкция электродугового плазмотрона и работа опытной установки

На кафедре электропривода ЛГТУ разработаны различные конструкции плазмотронов, предназначенные для установок сжигания твердых отходов [6,7], а также для нагрева поверхности металлоизделий [8,9]. Рабочую камеру электродугового плазмотрона, предназначенного для нагрева поверхности металлоизделий, целесообразно располагать

горизонтально, так как в этом случае уменьшается рассеивание потока плазмы, выходящей через сопло и проходящей участок по воздуху от выхода рабочей камеры до поверхности нагреваемой детали.

На рисунке 1 приведена базовая конструкция электродугового плазмотрона с полый цилиндрической рабочей камерой [8]. Электродуговой плазмотрон содержит горизонтально расположенную трубчатую цилиндрическую рабочую камеру 1, выполненную из непроводящего электрический ток тугоплавкого материала. В стенке камеры выполнены два соосно расположенные отверстия, в которых установлены расходные графитовые электроды 2 и 3. К электродам от источника питания 4, номинальная мощность которого составляет 10 кВт, подводится регулируемое выпрямленное напряжение 170 – 220 В. В полость рабочей камеры через входной канал подается под давлением плазмообразующий газ с помощью нагнетающей установки 5 вентиляторного типа. Начальное зажигание дуги между электродами 2 и 3, разведенными на расстояние до 50 мм, осуществляется с помощью высоковольтного осциллятора 12, вырабатывающего напряжение до 50 кВ. Для удержания и растягивания дуги, горячей между электродами 2 и 3, предусмотрена система, реализующая магнитное дутье, состоящая из цилиндрического трубчатого магнитопровода 7 и полюсов 8 и 9. На полюсах размещена обмотка 10, получающая от источника ее питания 11 регулируемое напряжение постоянного тока.

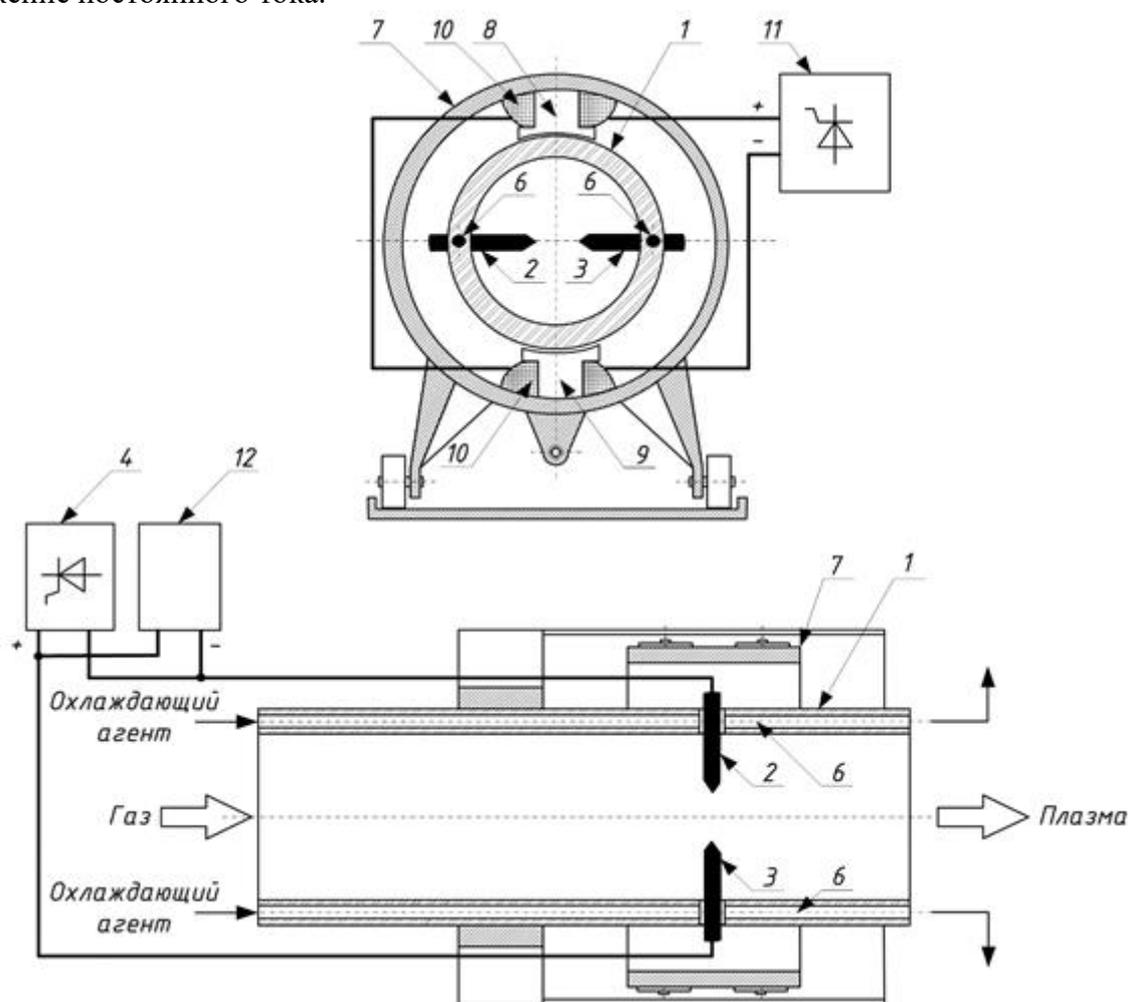


Рисунок 1 – Конструкция электродугового плазмотрона

В результате горения дуги электроды 2 и 3 постоянно подгорают, и расстояние между ними в процессе работы увеличивается. Поэтому для обеспечения постоянного межэлектродного расстояния в [6] была предложена система плавного движения электродов, осуществляемого в процессе работы установки. Эта система представляет собой мехатронный блок с позиционным электроприводом.

На основании конструкции электродугового плазматрона, приведенной на рис.1, была создана экспериментальная электродуговая плазменная установка, общий вид которой показан на рисунке 2. В качестве плазмообразующего газа в данной установке использовался воздух, взятый из помещения, в котором установлен плазматрон, подаваемый под давлением с помощью вентилятора. Мощность электропривода вентилятора - 400 Вт, что составляет около 4% от мощности силовой электродуговой установки.

Наиболее энергоемкой частью установки является система питания электродов, обеспечивающая силу тока в дуге на уровне 60 – 80 А. уравнение баланса напряжений в цепи с электрической дугой постоянного тока имеет общий вид [10]

$$R_{\Sigma}I + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt} = E - \alpha - \beta(l + \Delta l), \quad (1)$$

где I - ток в дуге; E – выпрямленная ЭДС источника питания; R_{Σ} - эквивалентное активное сопротивление дуги; L_{Σ} - полная эквивалентная индуктивность цепи; Δl - изменение длины дуги; l - длина дуги; β - дуговой градиент потенциала; α - падение напряжения вблизи электродов.

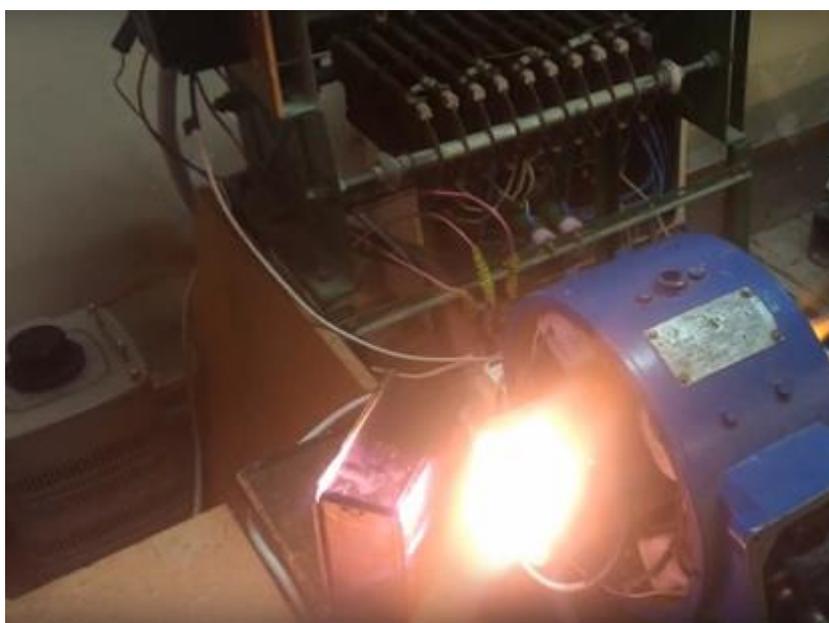


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной электродуговой плазменной установки

При изменении объема вырабатываемой плазмы осуществляется регулирование тока дуги, сопровождающееся изменением потребляемой из сети мощности, а также оптимальным регулированием потока плазмообразующего компонента, в качестве которого использован воздух. Мощность электродуговой плазменной установки, составляла около 10 кВт, источник питания был выполнен в виде трехфазного регулируемого выпрямителя. В режиме холостого хода выходное выпрямленное напряжение составляло 220 в. Для улучшения электромагнитной совместимости электродуговой части плазматрона с питающей сетью разработан активный фильтр электроэнергии, компенсирующий нелинейный характер нагрузки и снижающий уровень высших гармоник, поступающих в сеть.

Для растягивания дуги и стабилизации ее положения на поверхности рабочей камеры закреплена магнитная система с полюсами, ось которых перпендикулярна оси, на которой находятся электроды. Увеличивая ток в обмотках на полюсах электромагнита, можно растягивать дугу и стабилизировать ее положение. Магнитная часть установки имеет малую мощность, составляющую менее 1% от мощности силовой электродуговой установки.

Статья написана при поддержке гранта ЛГТУ №9 "Создание электродугового плазматрона с системами автоматизации".

Список литературы

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я. Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). М.: Наука. 1973. - 232 с.
2. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э, Фалеев В.А. Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и технология». 2008. №6. С. 131-135.
3. А.с. СССР № 599732. Электродуговой нагреватель газа постоянного тока / Жуков М.Ф., Лыткин А.Я., Худяков Г.Н., Аньшаков А.С. Оpubл. 07.09.1982. Бюл. № 33.
4. Патент РФ № 2465748. Электродуговой плазмотрон / Мчедалов С.Г. Оpubл 27.10.2012. Бюл. № 30.
5. Моссэ А.Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин // Беларуская навука, 2015. _ 411 с.
6. Патент на полезную модель № 188618. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Чупров В.Б., Конев В.А. Оpubл. 18.04.2019. Бюл. №11.
7. Патент на изобретение RU 2713736 С1. Электродуговой плазмотрон для сжигания твердых отходов. Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Заявка № 2019118826 от 17.06.2019. Оpubл. 07.02.2020.
8. Патент на изобретение RU2715054 С1. Электродуговой плазмотрон Мещеряков В.Н., Конев В.А., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Конев М.В., 25.02.2020.
9. Патент на изобретение № 2713746. Электродуговой плазмотрон / Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Пикалов В.В., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Оpubл. 18.04.2019. Бюл. №11.
10. Доманов В.И. Влияние случайных факторов на работу системы регулирования тока дуговой плавильной установки / В.И. Доманов, А.В. Доманов, К.Е. Карпунин и др. // Приводная техника. - 2010. №6, С. 16-19.

Мещеряков Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Электропривода ЛГТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru

Муравьев Артем Артурович, к.т.н., доцент кафедры Электропривода ЛГТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30. E-mail: a.murawjow@yandex.ru

Пикалов Владимир Владимирович, ассистент кафедры Электропривода ЛГТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30. E-mail: wreditels@mail.ru

Бойков Андрей Игоревич, к.т.н., доцент кафедры Электропривода ЛГТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30. E-mail: aboikov2013@gmail.com

Евсеев Алексей Михайлович, старший преподаватель кафедры Электропривода ЛГТУ, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д.30. E-mail: alexevs94@gmail.com

UDC 621.3

EXPERIMENTAL ELECTRIC ARC PLASMA INSTALLATION

*Meshcheryakov V.N., Muravyev A.A., Pikalov V.V., Boikov A.I., Evseev A.M.
Russia, Lipetsk, Lipetsk State Technical University (LSTU)*

This article discusses the design features of an electric arc plasma installation intended for surface heating of the metalwork products and its components that ensure the operation of the installation. An experimental setup is presented, the features of the operation of its electric arc part are considered.

Key words: plasmatron, plasma-forming gas, electric arc, control unit, electric drive

Bibliography

1. Zhukov M.F., Smolyakov V.YA. Uryukov B.A. Elektrodugovyenagrevatel'igaza (plazmotrony). M.: Nauka. 1973. - 232 s.
2. An'shakov A.S., Urbah E.K., Urbah A.E, Faleev V.A. Pererabotkatekhnogennyhethodov v elektrodugovojplazme / Mezhdunarodnyjnauchnyjzhurnal «Al'ternativnayaenergetikaitekhnologiya». 2008. №6. S. 131-135.
3. A.s. SSSR № 599732. Elektrodugovojnagrevatel' gazapostoyannogotoka / Zhukov M.F., Lytkin A.YA., Hudyakov G.N., An'shakov A.S. Opubl. 07.09.1982. Byul. № 33.
4. Patent RF № 2465748. Elektrodugovojplazmotron / Mchedalov S.G. Opubl 27.10.2012.Byul.№ 30.

5. Mosse A.L. Plazmennyyetehnologiiustrojstvadyapererabotkiotodov / A.L. Mosse, V.V. Savchin // Belaruskayanavuka, 2015. - 411 s.
6. Patent napoleznuyu model' № 188618. Elektrodugovojplazmotron / Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Pikalov V.V., Chuprov V.B., Konev V.A. Opubl. 18.04.2019. Byul. №11.
7. Patent naizobretenie RU 2713736 C1. Elektrodugovojplazmotron dlyaszghiganiyatverdyyothodov. Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Pikalov V.V., Danilova O.V., Lastochkin D.V. Zayavka № 2019118826 ot 17.06.2019. Opubl.07.02.2020.
8. Patent naizobretenie RU 2715054 C1. Elektrodugovojplazmotron Meshcheryakov V.N., Konev V.A., Evseev A.M., Pikalov V.V., Konev M.V., 25.02.2020.
9. Patent naizobretenie № 2713746. Elektrodugovojplazmotron / Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Pikalov V.V., Danilova O.V., Lastochkin D.V. Opubl. 18.04.2019. Byul. №11.
10. Domanov V.I. Vliyaniyesluchajnyhfaktorovnarabotusistemyregulirovaniyatokadugovojplavil'nojustanovki / V.I. Domanov, A.V. Domanov, K.E. Karpuhini dr. // Privodnaya tekhnika. - 2010. №6, S. 16-19.

Meshcheryakov Viktor Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of Electrodrive department LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru.

Muravyev Artem Arturovich, Ph.D., associate professor Department of Electrodrive LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: a.murawjow@yandex.ru.

Pikalov Vladimir Vladimirovich, assistant Department of Electrodrive LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: wreditels@mail.ru.

Boikov Andrei Igorevich, Ph.D., associate professor Department of Electrodrive LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: aboikov2013@gmail.com.

Evseev Aleksei Mihailovich, senior lecturer Department of Electrodrive LSTU, 398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30. E-mail: alexevs94@gmail.com.

УДК 621.311.001.57

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ТИРИСТОРНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Бабенко В. В.

Россия, г. Воронеж

Воронежский государственный технический университет

Крысанов В. Н.

Россия, г. Воронеж

ООО ПКФ «Современные Технологии», канд. техн., директор

В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий путем компенсации реактивной мощности, на основе регулируемых конденсаторных установок. Показана целесообразность применения гибридного способа безтоковой коммутации батарей статических конденсаторов, с помощью параллельно включенных полупроводниковых и электромеханических ключей. Для апробации рассматриваемых алгоритма управления и схем технических решений, была разработана физическая модель гибридной тиристорной установки. Рассмотрены возможные режимы работы при вариации типовых видов нагрузки, изменения параметров системы электроснабжения. Подтверждена работоспособность принципиальных решений по реализации силовой части и микроконтроллерной системы управления разработанной гибридной тиристорной установки.

Ключевые слова: физическая модель, коммутации батарей статических конденсаторов, компенсация реактивной мощности, микроконтроллерная система управления.

В современной промышленной энергетике трудно переоценить актуальность вопросов энергосбережения путем компенсации реактивной мощности (КРМ) [1,2]. В настоящее время существуют различные аппаратные решения данных вопросов. Если рассматривать сегмент низковольтных сетей промышленных предприятий (а именно в них наблюдаются наибольшие потери электрической мощности), то основными средствами КРМ в них являются управляемые и неуправляемые батареи статических конденсаторов (БСК) и синхронные компенсаторы на основе синхронных электродвигателей (в гораздо меньшей

степени). Как правило, достаточный уровень КРМ может быть реализован именно управляемыми БСК. Поэтому одним из основных параметров последних, является стоимость и наработка на отказ коммутационной аппаратуры подключения БСК к сети в режиме реального времени. С учетом этих критериев целесообразно сравнивать два варианта:

- коммутация БСК с помощью электромагнитных контакторов (небольшая стоимость, но весьма ограниченный ресурс работы коммутационной аппаратуры);
- коммутация БСК с помощью тиристорных модулей (значительная стоимость и не ограниченный ресурс работы тиристорных коммутаторов).

Оптимальное соотношение критериев «цена-качество» может быть достигнуто при реализации гибридного способа коммутации БСК, при котором используются и электромагнитных контакторов и полупроводниковые приборы [3]. Работа гибридной установки реализуется в соответствии с разработанной принципиальной электрической схемой (рисунок 1).

На рисунке 1 представлена физическая модель гибридной установки КРМ, основу которой составляет макетная плата с расположенными на ней элементами. Топологически устройство разделено на несколько функциональных частей: управляющая часть, которая содержит микроконтроллер А1 и его обвязку, два выключателя, разъем для подключения интерфейсного кабеля; коммутационная часть, содержащая три блока силовой коммутации, которые состоят из силовых симисторов VD1-VD3 (BTA24-600BW фирмы ST Microelectronics) и реле K1-K3 (SCHRACKRT314005 фирмы TycoElectronics, либо трехфазный магнитный пускатель), а также драйверов симисторных ключей; часть сопряжения, состоящая из двух силовых клеммных колодок, одна из которых подключается к сети, а ко второй подключается БСК XC1-XC; часть индикации, которая состоит из светодиодов, для контроля включения питания, подключения и отключения БСК. Разделение на топологические зоны «силовую» и «информационную» обусловлено повышением помехозащищенности и предотвращением наводок «силовой» части на «информационную». Питание системы управления модели осуществляется от источника постоянного тока со значением напряжения +5 В. На рисунке 2 приведена схема электрическая принципиальная физической модели гибридной установки КРМ.

Система управления физической модели разработана на модуля Iski (микроконтроллер ATmega328), обозначенный на схеме А1 [4]. ATmega 328 широко распространенный недорогой и доступный микроконтроллер имеет необходимые алгоритмы, обеспечивая управление (сигналы реле). Также имеются интерфейсы пере-

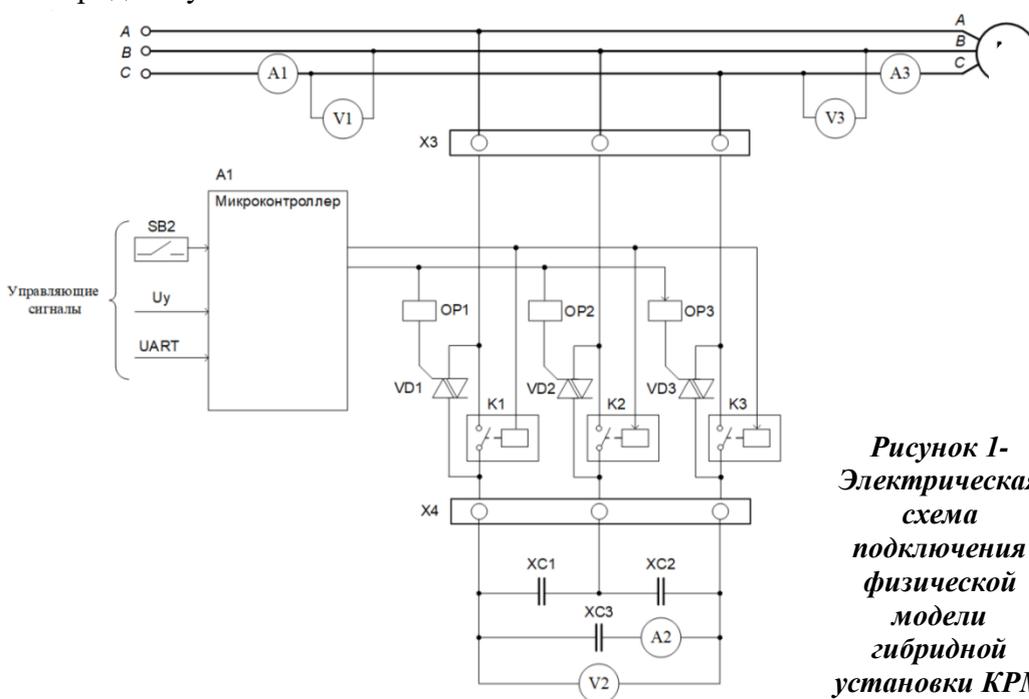


Рисунок 1-
Электрическая
схема
подключения
физической
модели
гибридной
установки КРМ

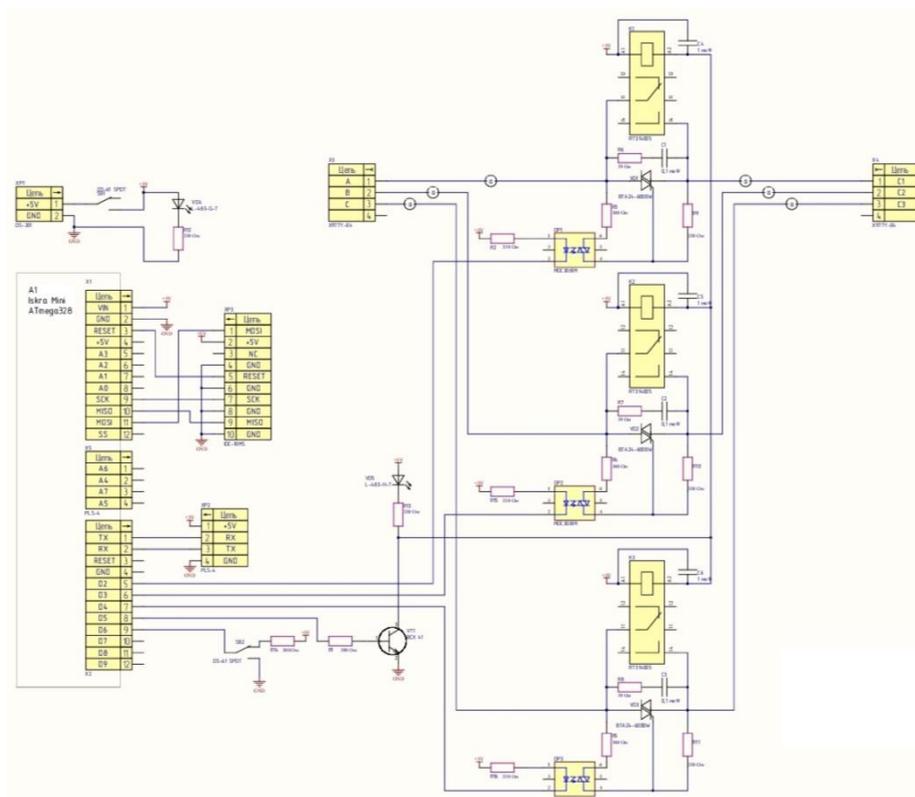


Рисунок 2- Принципиальная электрическая схема физической модели гибридной установки КРМ

- Портов ввода-вывода общего назначения: 20.
- Портов с поддержкой ШИМ: 6.
- Портов, подключённых к АЦП: 8.

Данные характеристики позволяют успешно интегрировать разработанную систему управления гибридной конденсаторной установки в любую АСУ системы электроснабжения предприятия.

Разработанная физическая модель рассчитана на работу с сетью переменного тока с номинальным фазным напряжением 220 В и фазный ток (протекающий через электромеханические контакты) 25 А [5]. Таким образом, система управления позволяет обеспечить коммутацию трехфазных БСК мощностью более 16 кВАр.

Однако, параметры симистора выбраны с запасом и составляют: рабочее напряжение - 600 В, максимальное среднее значение тока в открытом состоянии - 50 А, а значение кратковременного импульсного тока – 250 А. При пропускании синусоидального тока в течение десяти циклов по 25 мс каждый, максимальное значение тока снижается до 130 А. Таким образом, предложенный принцип коммутации позволяет увеличить мощность трехфазных БСК до 50 кВАр, повышая параметры только электромагнитного контактора. Данная модель симистора не нуждается в снабберной цепочке, что упрощает конструкцию [6].

Для управления силовыми симисторами используются микросхемы МСC3081М производства фирмы FairchildSemiconductor (OP1-OP3), По логическому входному сигналу (усиливается с помощью транзистора BCX-41), микросхема на выходе формирует импульс на открытие симистора. Встроенный детектор перехода через ноль обеспечивает выработку выходного импульса в момент перехода напряжения на управляемом ключе через нулевое значение.

С помощью соединителя X3, физическая модель подключается к питающей сети, а к соединителю X4 подключаются выводы конденсаторной батареи. Применение соединителей позволяет легко варьировать тип подключаемой нагрузки по мощности, количеству фаз и типу (асинхронные двигатели, осветительная нагрузка, статические регуляторы напряжения, фильтры и т.д.).

В модели предусмотрены три режима управления: ручной (дискретное подключение БСК);

автоматизированный (использование внешнего управляющего логического сигнала с уровнями 0 В и 5 В); автоматический (использование универсального асинхронного приёмопередатчика интерфейса UART). С помощью этого интерфейса управляющий контроллер может принимать данные с других устройств, например, от SCADA-системы высшего уровня, работать совместно с лабораторным комплексом физических моделей современных силовых устройств [7].

Для получения результатов физического моделирования, для оцифровки и записи сигналов в измерительных точках (рисунок 1), использовался вольтметр самопишущий S-Recorder-E (ADClab), подключенный к компьютеру по интерфейсу USB. Это позволило записывать получаемые данные на жесткий диск, просматривать массивы данных, снятые в ходе эксперимента, в виде таблиц и готовых графиков (рисунок 3 – примеры осциллограмм тока и напряжений при подключении конденсаторной батареи сети магнитным пускателем и рисунок 4 – симисторами).

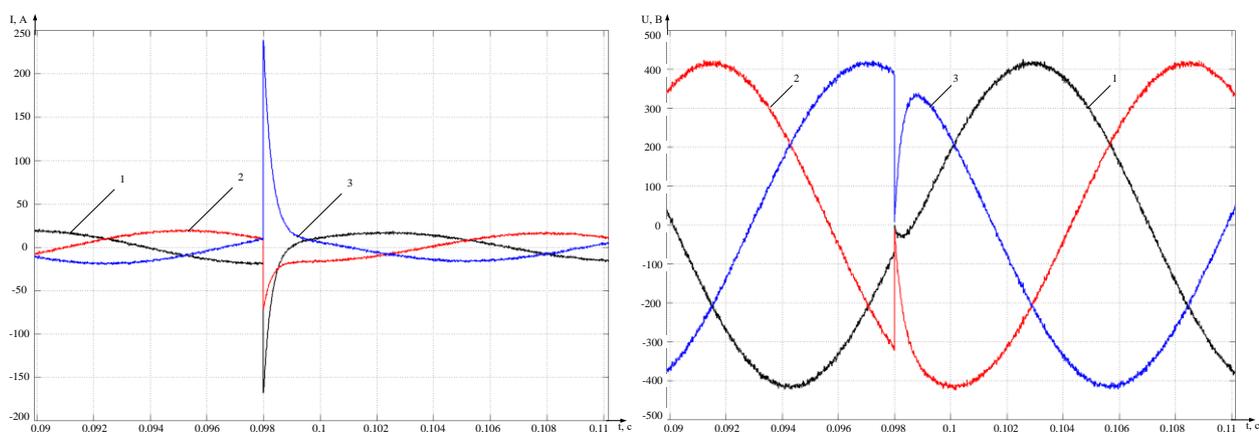


Рисунок 3- Осциллограммы параметров включения конденсаторной батареи коммутируемой магнитным пускателем

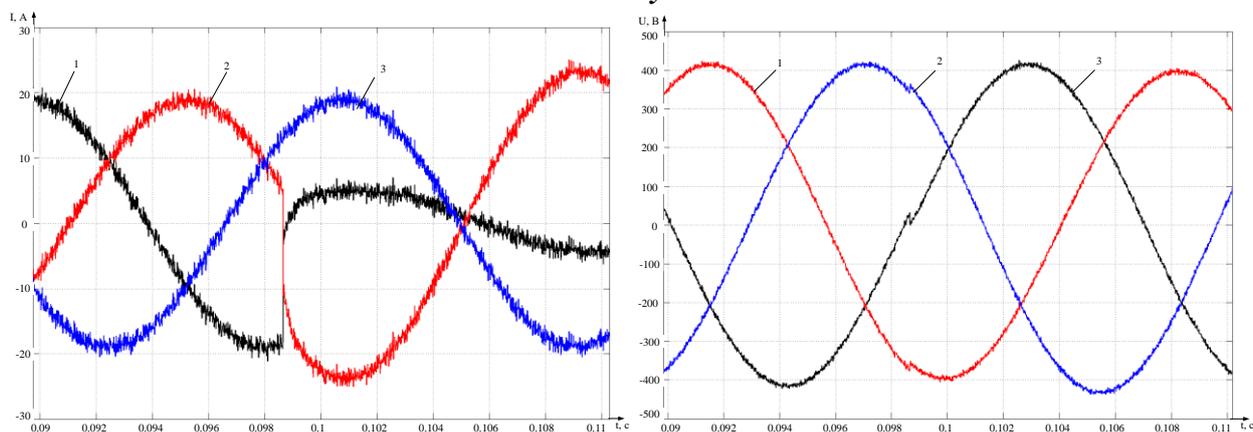


Рисунок 4- Осциллограммы параметров включения конденсаторной батареи, коммутируемой симисторами

На основании проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана аппаратная и программная части физической модели установки компенсации реактивной мощности на основе гибридного способа подключения конденсаторной батареи.

2. Определены возможности физической модели реализовать эффективный алгоритм коммутации БСК, по критерию «цена-качество».

3. Показаны возможности работы физической модели с различными типами промышленных нагрузок и режимами управления.

4. Разработанная физическая модель и ее программное обеспечение, позволяет реализовать комплексные исследования работоспособности гибридных установок КРМ и эффективности мероприятий по компенсации реактивной мощности на промышленных производствах.

Список литературы

1. Воротницкий, В.Э. Повышение эффективности управления распределительными сетями [Текст] / В.Э. Воротницкий // Энергосбережение. – 2014. – №3. – С. 61-66.
2. Крысанов, В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 244 с.
3. Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения / В.Н.Крысанов // Энергобезопасность и энергосбережение – 2017. – № 3. – С. 15-20.
4. Iskra Mini // Амперка. URL: <http://amperka.ru/product/iskra-mini.Power PCB Relay RT1 // TE Connectivity>. URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F1018%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RT1_1018.pdf%7F9-1393239-1.
5. BTA24, BTB24, BTA25 BTA26, BTB26, T25. 25 A standard and Snubberless triacs // ST Microelectronics. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta24.pdf>
6. 6-PIN DIP ZERO-CROSS OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT (800 VOLT PEAK) // Fairchild Semiconductor. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MOC3083M-D.pdf>
7. V.L. Burkovskii. A physical model of power electronic devices based on static voltage transducers / V.L. Burkovskii, A.D. Danilov, A.M. Litvinenko, V.N. Krysanov, A.L. Rutskov // Russian electrical engineering. Allerton Press, Inc. – 2018. - V. 89(6). - P. 381–384.

Бабенко Владимир Владимирович – специалист по учебно-методической работе, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект,14), vova.babenko.94@mail.ru, тел. 8-915-540-88-73.

Крысанов Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, директор ООО ПКФ «Современные Технологии», (394068, Россия, г. Воронеж, ул. Хользунова, д.10-б к. 86), e-mail: sovteh2000@mail.ru, тел. 8-920-228-56-06.

UDC 621.311.001.57

HYBRID THYRISTOR CAPACITOR UNIT PHYSICAL MODEL

Babenko Vladimir Vladimirovich
Voronezh State Technical University
Russia, g. Voronezh

Krysanov Valery Nikolaevich
LLC PKF "Modern Technologies," Candidate Technician, Director
Russia, g. Voronezh

The article considers topical issues of improving the energy efficiency of power supply systems of industrial enterprises by compensating for reactive power, based on regulated capacitor plants. Usefulness of hybrid method of current-free switching of batteries of static capacitors with the help of parallel connected semiconductor and electromechanical switches is shown. To test the control algorithm and schematic solutions under consideration, a physical model of a hybrid thyristor installation was developed. Possible modes of operation at variation of standard types of load, changes of parameters of power supply system are considered. Serviceability of principle solutions for implementation of power part and microcontroller control system of developed hybrid thyristor unit.

Keywords: physical model, static capacitor batteries switching, reactive power compensation, microcontroller control system.

Bibliography

1. Vorotnitsky, V.E. Improving the efficiency of distribution network management [Text] / V.E. Vorotnitsky // Energy saving. - 2014. - No. 3. - pp. 61-66.
2. Krysanov, V.N. Hardware and software control of modes of load nodes of regional power supply networks using static devices. - Voronezh: VSTU, 2017. - 244 p.

3. Krysanov V.N. Efficiency of using thyristor condenser installations in industrial power supply systems / V.N.Krysanov // Energy security and energy saving - 2017. - No. 3. - pp. 15-20.
4. Iskra Mini // Амперка. URL: <http://amperka.ru/product/iskra-mini.Power PCB Relay RT1 // TE Connectivity>. URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F1018%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RT1_1018.pdf%7F9-1393239-1.
5. BTA24, BTB24, BTA25 BTA26, BTB26, T25. 25 A standard and Snubberless triacs // ST Microelectronics. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta24.pdf>.
6. 6-PIN DIP ZERO-CROSS OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT (800 VOLT PEAK) // Fairchild Semiconductor. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MOC3083M-D.pdf>
7. V.L. Burkovskii. A physical model of power electronic devices based on static voltage transducers / V.L. Burkovskii, A.D. Danilov, A.M. Litvinenko, V.N. Krysanov, A.L. Rutskov // Russian electrical engineering. Allerton Press, Inc. – 2018. - V. 89(6). - P. 381–384.

Babenko Vladimir Vladimirovich - specialist in educational and methodological work, Voronezh State Technical University (394026, Russia, Voronezh, Moskovsky Prospekt, 14), vova.babenko.94@mail.ru, tel. 8-915-540-88-73.

Krysanov Valery Nikolaevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of LLC PKF "Modern Technologies", (394068, Russia, Voronezh, Holzunova str., 10-b K. 86), e-mail: sovteh2000@mail.ru, tel. 8-920-228-56-06.

УДК 674.047.3-047.58

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАБОЧЕГО КОНДЕНСАТОРА ПРИ ВЧ СУШКЕ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР

Коренков Д.А., Еремеев В.Д.

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

Аннотация: Сушка заготовок деревянных опор, применяемых на линиях электропередач до 110 кВ, в настоящее время осуществляется атмосферным или конвективным способами, требующими много времени и энергии. В то же время, существуют перспективные технологии сушки, позволяющие сократить длительность и повысить качество процесса при сопоставимых удельных энергозатратах. К таким технологиям можно отнести вакуумно-высокочастотную сушку. Её широкое внедрение затрудняется рядом нерешенных научно-технических задач, в том числе необходимостью обеспечения равномерности электромагнитного поля в поперечном сечении загрузки. Данная работа имеет своей целью сформулировать задачу поиска оптимальной конструкции рабочего конденсатора и формы электродов для последующего решения данной проблемы.

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

Воздушные линии электропередач с деревянными пропитанными опорами (ДПО) являются вторыми по протяженности после линий с железобетонными опорами. Столь большая распространенность объясняется следующими достоинствами: низкой стоимостью, достаточной механической прочностью и экологичностью сырья, простотой утилизации и другими полезными свойствами. Но при этом ДПО имеют минимальный нормативный срок эксплуатации по сравнению со всеми остальными видами опор, применяемыми на текущий момент. Его увеличение позволит улучшить эксплуатационные свойства таких линий электропередач, что в целом окажет положительный энерго- и ресурсосберегающий эффект.

Поиск возможных путей решения данной задачи требует проведения анализа многоступенчатого технологического цикла производства ДПО. На первом этапе осуществляется заготовка сырья, качество которого во многом определяется местом произрастания. Лучшим сырьем для заготовок опор считается северная сосна, отличающаяся стройностью, высокой прочностью, плотным расположением годовых колец, а также оптимальной величиной заболони. Далее производится входной контроль качества, при котором образцы с различными дефектами (искривлениями, трещинами, гнилью,

механическими повреждениями, сухобокостью, сучками) отбраковываются. Заготовки, прошедшие проверку, поступают на последующие окорку и оцилиндровку. На этом этапе с них снимается кора и верхний слой луба, а также придается правильная геометрическая форма, обеспечивающая устойчивость во время эксплуатации. После промежуточного контроля качества и деления на категории следуют не менее ответственные этапы сушки и пропитки.

В результате сушки из межклеточного пространства древесного вещества удаляется свободная влага, при этом освобождается пространство для введения модифицирующей жидкости на этапе пропитки. Качество процесса сушки определяется множеством параметров: конечным влагосодержанием, равномерностью влагосодержания по сечению и длине заготовки опоры, количеством образовавшихся дефектов и другими. От равномерности сушки зависит то, насколько однородно будет пропитан материал модифицирующей жидкостью. К основным видам дефектов, возникающих при сушке оцилиндрованных заготовок, следует отнести растрескивания. От количества и размера трещин зависят, с одной стороны, глубина проникновения модифицирующей жидкости, но, с другой стороны, степень подверженности внутренних слоев древесины влиянию негативных атмосферных факторов в процессе эксплуатации опор. Пропитка высушенных заготовок модифицирующими составами непосредственно способствует приданию древесному веществу защитных свойств, что существенно увеличивает срок службы.

На основе рассмотренного технологического цикла следует заключить, что дальнейшее улучшение эксплуатационных характеристик ДПО возможно за счет совершенствования технологий пропитки и пропиточных составов; применения современных технологий модификации древесины и сушки. Остановимся более подробно на вопросах совершенствования технологий сушки.

Обычно сушка заготовок опор выполняется атмосферным, либо камерным способами. Атмосферная сушка не требует затрат энергии, позволяет получить естественное растрескивание, но характеризуется сезонностью и длительностью процесса. Камерная сушка, наоборот, способствует снижению длительности за счет подведения тепловой энергии, но при этом увеличивается риск возникновения недопустимых растрескиваний. Рассмотренным способам сушки также свойственен общий недостаток, состоящий в том, что в обоих случаях теплота подводится из внешней среды, и в первую очередь нагревается поверхность заготовок. Поскольку древесина обладает низким коэффициентом теплопроводности, то центральная зона начинает нагреваться с временной задержкой, зависящей от толщины и свойств материала. При этом градиент температуры всегда ориентирован против потока влаги, что отрицательно влияет на скорость сушки. С учетом отмеченного, технологии сушки, основанные на подводе тепловой энергии извне, являются менее перспективными по сравнению с теми, в которых используется диэлектрический нагрев. Среди таких технологий особое внимание следует уделить высокочастотной сушке в вакууме.

Вакуумно-высокочастотная сушка применяется для различных капиллярно-пористых коллоидных материалов, и может быть рекомендована для древесины в случае плотных пород или больших сечений. Последний фактор обуславливает предрасположенность этой технологии для сушки заготовок опор, диаметр которых варьируется в диапазоне от 160 до 260 мм по нижней части.

Процесс сушки осуществляется в герметичной камере, в которой расположены электроды. После размещения высушиваемых заготовок между электродами образуется рабочий конденсатор, к которому подводится напряжение высокой частоты. В камере при этом создается пониженное давление около 10 кПа. В результате релаксационно-поляризационных явлений в материале образуются внутренние источники теплоты, под действием которых запускаются механизмы, приводящие в итоге к движению парогазовой смеси по капиллярам к поверхности материала. Благодаря низкому давлению в камере парообразование наступает при более низкой температуре, что обуславливает

дополнительные преимущества данной технологии. Однако из-за ряда нерешенных научно-технических задач, ее применение в промышленных масштабах не отлажено. В работах [1, 2] показано, что причиной этому является отсутствие компактных технических решений, направленных на уменьшение влияния стоячих электромагнитных волн вдоль рабочего конденсатора, а также режимных параметров процесса сушки заготовок толщиной более 100 мм. Стоячие волны приводят к неравномерности распределения внутренних источников теплоты по длине рабочего конденсатора, но равномерность также должна обеспечиваться и в его поперечном сечении, что также требует научно-технического исследования данной проблемы.

Целью такого исследования должен стать ответ на вопрос, каким образом с технико-экономической точки зрения должны укладываться заготовки опор в рабочем конденсаторе. В первом приближении предлагаются следующие варианты. Каждая заготовка может быть высушена по отдельности в рабочем конденсаторе, образованном двумя электродами, имеющими форму вогнутой пластины, повторяющей очертания поверхности заготовки. В этом случае ориентация вектора напряженности электрического поля будет совпадать с радиальным направлением годовых колец, при котором диэлектрические свойства древесины относительно стабильны. При этом достижима высокая равномерность распределения параметров электромагнитного поля в поперечном сечении загрузки, но существенно снижается производительность процесса в целом, так как становится затруднительной одновременная сушка партии заготовок. С другой стороны, заготовки можно уложить в штабель между вертикальными электродами, так как это обычно делается при сушке пиломатериалов прямоугольного сечения. Тогда производительность процесса многократно возрастает, но высокой равномерности электромагнитного поля ожидать не приходится из-за наличия в рабочем конденсаторе воздушных промежутков, а также из-за переменной ориентации вектора напряженности электрического поля относительно годовых слоев древесины (радиальное и тангенциальное направления).

Таким образом, возникает задача поиска оптимальной конфигурации рабочего конденсатора и формы электродов, обеспечивающих достаточную равномерность распределения параметров электромагнитного поля в загрузке при незначительном снижении производительности процесса сушки с учетом затрат времени на укладку заготовок опор. Решение данной задачи возможно методами математического моделирования электромагнитных полей, описание которых основано на системе уравнений Максвелла. С учетом допущений о синусоидальности напряжения ВЧ генератора и о квазистационарности электромагнитного поля в загрузке [3] математическая постановка задачи формулируется следующим образом:

$$\operatorname{div}(\dot{y} \cdot \bar{E}) = 0, \quad (1)$$

$$\bar{E} = -\operatorname{grad} \phi, \quad (2)$$

$$\bar{E}_1^r = \bar{E}_2^r, \quad (3)$$

$$\dot{y}_1 \cdot \bar{E}_1^n = \dot{y}_2 \cdot \bar{E}_2^n, \quad (4)$$

$$\dot{\phi}_{h.p.} = \dot{U}, \quad (5)$$

$$\dot{\phi}_{l.p.} = \dot{\phi}_{gnd} = 0, \quad (6)$$

где (1) – теорема Гаусса для напряженности электрического поля; (2) – условие потенциальности переменного электрического поля, следующее из допущения о квазистационарности; (3) и (4) – граничные условия для сред с разными диэлектрическими свойствами; (5) и (6) – граничные условия Дирихле на поверхностях электродов и заземленных элементах конструкции рабочего конденсатора; \bar{E} – комплекс вектора напряженности электрического поля, В/м; \dot{y} – комплексная проводимость среды, См; ϕ –

скалярный электрический потенциал, В; τ и n – обозначения тангенциальной и нормальной составляющих вектора \vec{E} в точках границы раздела сред; $\dot{\phi}_{h.p.}$, $\dot{\phi}_{l.p.}$ и $\dot{\phi}_{gnd}$ – комплексные значения потенциалов высокопотенциального, низкопотенциального электродов и заземленных элементов конструкции рабочего конденсатора, В; \dot{U} – комплекс напряжения ВЧ генератора, В.

Комплексная проводимость среды может быть вычислена как:

$$\dot{y} = \sigma + i2\pi f \varepsilon, \quad (7)$$

где σ – электропроводность материала, См; f – частота ВЧ генератора, Гц; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (8)$$

где δ – угол диэлектрических потерь материала.

Уравнения (1) – (8) полностью описывают электромагнитное поле в поперечном сечении рабочего конденсатора, изменяющееся по гармоническому закону. С учетом сложности геометрической модели задачи аналитическое ее решение не возможно, поэтому для проведения намеченных исследований рационально выбрать численные методы и использовать пакеты прикладных программ для проведения соответствующих вычислений (Maxwell, Ansys multiphysics, Elcuti другие).

Список литературы

1. 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.
2. Качанов А.Н. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере / А.Н.Качанов, Д.А.Коренков, А.А.Ревков, В.В.Максимов, О.В.Воркунов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, 2020. - Т. 22. - № 6. - С. 130-142.
3. Качанов А.Н. Исследование распределения электромагнитного поля при высокочастотной сушке древесины / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 1(47). – С. 16-26.

Коренков Дмитрий Андреевич, к.т.н., 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.

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

UDC674.047.3-047.58

SETTING OF TASK FOR SEARCH OF OPTIMAL CONFIGURATION OF WORKING CAPACITOR DURING HF DRYING OF WOODEN SUPPORTS

Korenkov D.A., Ereemeev V.D.

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

Drying of woodentangent tower blanks used on power lines up to 110 kV is currently carried out by atmospheric or convective methods requiring a lot of time and energy. At the same time, there are promising drying technologies that reduce the duration and improve the quality of the process at comparable specific energy costs. Such technologies include high frequency vacuum drying. Its wide implementation is hampered by a number of unresolved scientific and technical problems, including the need to ensure the uniformity of the electromagnetic field in the cross section of the load. This work aims to formulate the task of finding the optimal design of the working capacitor and the shape of the electrodes for the subsequent solution of this problem.

Keywords: drying of wooden tangent tower blanks; drying in electromagnetic field; vacuum drying; electrotechnical installations for drying; energy and resource-saving technologies.

Bibliography

1. Korenkov D.A. Problems of vacuum-high-frequency drying of wooden supports and ways to overcome them // International Scientific and Practical Conference "Electrical Networks: Reliability, Safety, Energy Conservation and Economic Aspects" mater. conf. (Kazan 7 April 2021 g.). - Kazan: Kazan gos. energ. un-t, 2021. - pp. 13-19.
2. Kachanov A.N. Modeling of processes of high-frequency drying of wooden tangent towers in vacuum chamber / A.N. Kachanov, D.A. Korenkov, A.A. Revkov, V.V. Maksimov, O.V. Vorkunov // Energy problems, 2020. - Т. 22. - № 6.- pp. 130-142.
3. Kachanov A.N. Electromagnetic Field Distribution Study for High Frequency Wood Drying / A.N. Kachanov, D.A. Korenkov // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij SChernozem'ya. – 2017. – № 1(47). – pp. 16-26.

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.

Eremeev Vladislav Dmitrievich, undergraduate, Oryol state university of I.S. Turgenev, 302026, g. Oryol, ul. Komsomolskaya, d. 95.

СЕКЦИЯ 4. ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Руководитель:

Никольский Олег Константинович, Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор каф. «Электрификация производства и быта» ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. Ползунова И.И.», г. Барнаул.

УДК 621.365:691

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Халина Т. М., Ведманкин А. В.

Россия, г. Барнаул, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

Важным резервом повышения эффективности, производства продукции сельского хозяйства является разработка и внедрение прогрессивных систем электрообогрева молодняка животных, водопроводов и поилок, подогрев и сушка зернового материала, обеззараживание кормов. Используемые электрообогреватели должны обеспечивать необходимые эксплуатационные характеристики при рациональном использовании энергетических и материальных ресурсов. Этим требованием отвечают предлагаемые многоэлектродные композиционные электрообогреватели на основе бутылкаучука, обеспечивающие стабильные электрофизические характеристики.

Ключевые слова: многоэлектродный композиционный электрообогреватель, низкотемпературные обогреватели, удельная электропроводность, бутылкаучуковая матрица, информационно-энтропийный интервал.

Основопологающими факторами развития сельскохозяйственного производства в настоящее время являются разработка и внедрение инновационных энергосберегающих технологий и технических средств, в соответствии с Федеральной научно-технической

программой развития сельского хозяйства на 2017-2025 г., и Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025г. [1, 2].

Для осуществления энергосбережения АПК экономически целесообразно внедрять эффективные технические средства электрообогрева, которые будут значительно увеличивать количественные и качественные показатели сельскохозяйственного производства, что в дальнейшем приведет к снижению потребления электрической энергии, и уменьшению себестоимости продукции в целом.

Использование высокотехнологического поверхностно распределительного электрообогрева с использованием многоэлектродных наноструктурных композиционных электрообогревателей (НМКЭ) позволяет снизить энергетические и материальные затраты на производство сельскохозяйственной продукции и увеличить количественные и качественные показатели [3]. Сдерживающим факторам внедрения вышеуказанной НМКЭ является недостаточная стабильность их электрофизических характеристик, поэтому разработка методов и алгоритмов оценки однородности композиционного материала (КМ) по условиям электрической проводимости для обеспечения надежного функционирования НМКЭ представляет важную задачу.

Для электропроводящего композиционного материала важным условием является организация равномерного распределения технического углерода в бутилкаучуке, выстраивающих регулярную структуру агломератов, которую принято называть однородностью материала.

Авторами данной статьи предлагается метод, в основе которого лежит понятие энтропии и теория вероятности, так как частицы углерода в композиционном материале распределены случайным образом, в связи, с чем необходимо математически вычислить интервал наиболее часто встречающихся частиц, отвечающих за электропроводность.

При ограниченном числе результатов, некоторое число «m» конкретных значений случайной величины, может быть охарактеризовано действительным законом распределения. На основании этого ограниченного числа результатов может быть определен интервал наиболее часто встречающиеся значений:

$$\Delta = \frac{1}{2} e^{H(\Delta)} = \frac{d \cdot n}{2 \cdot n_1^n \cdot n_2^n \cdot n_3^n \cdot \dots \cdot n_i^n \cdot n_m^n} \quad (1)$$

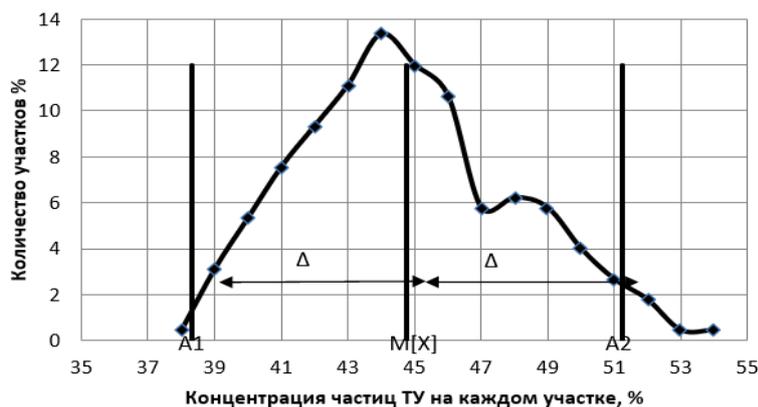


Рисунок 1– Гистограмма распределение концентраций ТУ в различных микрообъемах вулканизата с ТУ N220, 75 м.ч. на 100 м.ч. увеличение 5000

где: $H(\Delta)$ – энтропия случайной величины [6].

Для построения стабильной электропроводности, необходимо чтобы частицы углерода в композиционном материале были распределены практически одинаково по всей его площади, по микрофотографиям программными методами обработки изображения, рассчитан средний уровень частиц углерода для всего участка, на основании

полученного массива данных построена гистограмма распределения концентраций углерода марки N220в соответствии с количеством участков.

Для сравнения рассмотрим распределение вулканизата (рисунок 1) с техническим углеродом марки N220 сконцентрацией 75 м.ч. на 100 м.ч., Микрофотография на основе, которой построено распределение, получено электронным просвечивающем микроскопом при увеличении 5000 крат.

Из рисунка 1 видно, что распределение ассиметричное, двумодальное, с двумя выраженными максимумами, которые расположены в районе 44% и 48%, при 13% и 6% соответственно количеству участков. Математическое ожидание располагается на отметке в 44,77%. Двойной информационно-энтропийный интервал концентрации частиц ТУ на каждом участке находится в границах 38% и 51%, то есть разброс составляет 13%. В рассчитанный интервал входит 97,33% всех участков, что составляет 219 участков, что говорит об однородности технического углерода в композиционном материале.

На рисунке 2-3 приведены аналогичные кривые распределения с различными марками и концентрациями технического углерода, а также при различной кратности увеличения.



Рисунок 2– Гистограмма распределение концентраций ТУ в различных микрообъемах вулканизата с ТУ N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. увеличение 5000



Рисунок 3– Гистограмма распределение концентраций ТУ в различных микрообъемах вулканизата с ТУ N220, 75 м.ч. на 100 м.ч. увеличение 10000

Из рисунков 2 - 3 видно, что характер распределений различный, присутствует ассиметричность во все случаях, математическое ожидание распределения изменяется в зависимости от кратности увеличения микрофотографий, это объясняется тем, что большее количество очень мелких частиц попадает в поле зрения, то есть, чем больше увеличение, тем выше значения концентрации определяемых частиц ТУ в композиционном материале.

В таблице 1 приведены данные проведенных исследований, проведенные по вышеуказанной методике для определения однородности композиционных материалов с различной концентрацией ТУ и различной кратностью увеличения. На основе таблицы 1 построена диаграмма значений величины информационно-энтропийного интервала в соответствии для каждого образца.

Таблица 1 - Данные кривых распределения

| № | Наименование образца | Δ | A1 | A2 | Количество участков.% | M[X] |
|---|-------------------------------------|----------|-------|-------|-----------------------|-------|
| 1 | N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 5000 | 4,48 | 32,73 | 41,69 | 95,11 | 37,21 |
| 2 | N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 10000 | 7,37 | 44,34 | 59,08 | 93,77 | 51,71 |
| 3 | N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 20000 | 7,47 | 48,62 | 63,56 | 96 | 56,09 |
| 4 | N220, 75 м.ч. на 100 м.ч. Ув.5000 | 6,45 | 38,32 | 51,22 | 97,33 | 44,77 |
| 5 | N220, 75 м.ч. на 100 м.ч. Ув.10000 | 6,57 | 52,9 | 66,04 | 95,11 | 59,47 |
| 6 | N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 5000 | 12,78 | 38,17 | 63,73 | 96,44 | 50,95 |
| 7 | N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 10000 | 14,11 | 39,75 | 67,97 | 96 | 53,86 |
| 8 | N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 20000 | 14,21 | 45,79 | 74,21 | 96,5 | 60 |

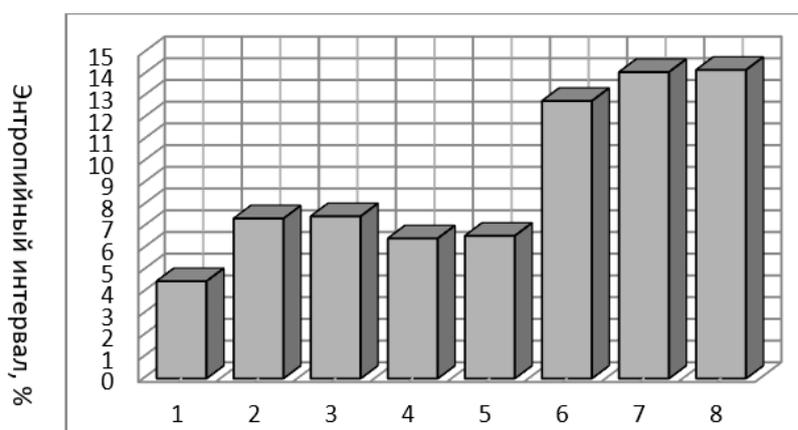


Рисунок 3 – Диаграмма величины информационно-энтропийного интервала для различных образцов (1 – N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 5000, 2 – N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 10000, 3 – N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 20000; 4 – N220, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 20000; 5 – N220, 75 м.ч. на 100 м.ч. Ув.10000; 6 – N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 5000; 7 – N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 10000; 8 – N330, 58 м.ч. на 100 м.ч. Ув. 20000)

Из рисунка 3 видно, что разброс с учетом концентрации технического углерода на близлежащих участках информационно-энтропийного интервала относительно математического ожидания для образцов под номером № 1, 2, 3, 4, 5 не превышает 15%, причем в этот интервал входит более 90% примерно однородных по концентрации ТУ участков, при этом концентрация технического углерода для каждого участка может варьироваться в различных пределах.

Для образцов под номером № 6, 7, 8 однородность технического углерода в композиционном материале составляет более 90%, однако для данных образцов, энтропийной интервал превышают допустимый разброс от математического ожидания более чем 15%. Все образцы, не отвечающие заданным требованиям принадлежат композиционному материалу с маркой технического углерода N330, с 58 м.ч. на 100 м.ч.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что этот материал не отвечает требованиям регулярности распределения частиц ТУ, а следовательно, и стабильности удельного сопротивления по всему объему. Нагрев на различных участках этих образцов будет неодинаковым, что не отвечает зоотехническим требованиям к наполному обогреву молодняка животных, и приведет к быстрому выходу из строя нагревательного изделия, в результате неоднородности технического углерода, а именно из отсутствия упорядоченной структуры из частиц углерода. Следовательно, необходимо внести изменения в технологию изготовления НМКЭ, с целью обеспечения заданных свойств.

Выводы

На основе полученных информационно-энтропийных значений интервала для разных образцов рассчитаны степени однородности по условиям электропроводимости для каждого образца НКМЭ, по разработанной методике.

В результате проведенных исследований микрофотографий и выполненных расчетов установлено, что количество участков, вошедших в информационно-энтропийный интервал распределения композиционного материала на основе БК с различной маркой и концентрацией технического углерода, различно, что позволит судить о стабильности электрофизических характеристиках исследуемых образцов.

Список литературы

1. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы (Постановления правительства Российской Федерации от 25 августа 2017г. №996) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/EIQtiyxIORGXoTK7A9i497tyyLAmnIrs.pdf> (Дата обращения 01.11.2021).
2. Концепция развития аграрной науки и научного обеспечения агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года (Утверждена приказом Минсельхоза России от 25.06.2007г. №342) [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/902099525> (Дата обращения 01.11.2021)
3. Корнев А. Е., Овсянников Н. Я. Электропроводящие резины со стабильными электрическими характеристиками – Санкт-Петербург: Химиздат, 2001 – 211 с.
4. Халина Т. М., Халин М. В, Дорош А. Б, Ведманкин А. В. Системы обогрева на основе наноструктурных композиционных электрообогревателей // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 21-29.
5. Халина Т. М., Ведманкин А. В. Информационно-энтропийный метод определения однородности композиционного материала применяемого в агропромышленном секторе. // Международный журнал №5 – Москва: Спектр, 2017. – С.120-123.
6. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

Халина Татьяна Михайловна, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация. Тел. 89132272676. E-mail: zaryad22@mail.ru.

Ведманкин Александр Васильевич, старший преподаватель кафедры электротехники и автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация. Тел. 89236504834. E-mail: wedmankin.a.w@mail.ru.

UDC 621.365:691

METHOD TO IMPROVE THE STABILITY OF THE ELECTRICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE ELECTRIC HEATING SYSTEMS FOR AGRICULTURAL PURPOSES

Halina T.M., Vedmankin A. B.

Russia, Barnaul, I.I. Polzunov Altai State Technical University

An important reserve for increasing the agricultural production efficiency is the development and implementation of advanced systems of electric heating of young animals, water pipes and drinkers, heating and drying grain material, disinfection. The electric heaters used should provide the necessary operational characteristics under rational use of energy and material resources. These requirements are met by the proposed multi-electrode composite electric heaters based on butyl rubber, providing stable electro-physical characteristics.

Key words: multi-electrode composite electric heater, low-temperature heaters, specific electrical conductivity, butyl rubber matrix, information-entropy interval.

Bibliography

1. Federal Scientific and Technical Program for the Development of Agriculture for 2017 - 2025 (Resolutions of the Government of the Russian Federation of August 25, 2017 № 996) [Electronic resource]. - Mode of access: <http://static.government.ru/media/files/EIQtiyxIORGXoTK7A9i497tyyLAmnIrs.pdf> (Date of reference 01.11.2021).
2. The concept of development of agrarian science and scientific support of agroindustrial complex of Russian Federation for the period up to 2025 (Approved by the order of Ministry of agriculture of Russia from 25.06.2007 № 342) [Electronic resource]. - Access mode <https://docs.cntd.ru/document/902099525> (Access date 01.11.2021).
3. Kornev A. E., Ovsyannikov N. Y. Electrically Conductive Rubber with Stable Electrical Characteristics - Sankt-Peterburg: Khimizdat, 2001 - 211 p.
4. Khalin T.M., Khalin M. V, Dorosh A. B., Vedmankin A. V. Heating systems based on nanostructured composite electric heaters // Electrotehnika. – 2018. – № 12. – pp. 21-29.
5. Khalina T.M., Vedmankin A. V. Information-entropic method for determining the homogeneity of composite material used in the agroindustrial sector. // International Journal № 5 - Moscow: Spectrum, 2017. – Pp.120-123.
6. Kremer N. Sh. Probability theory and mathematical statistics: textbook. - Moscow: UNITI-DANA, 2004. – 573 ps.

Khalina Tatiana Mikhailovna, PhD (technical sciences), professor of electrical engineering and automated electric drive department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov", Barnaul, Russian Federation. I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation. Tel. 89132272676. E-mail: zaryad22@mail.ru
Vedmankin Alexander Vasilyevich, senior lecturer of Electrical Engineering and Automated Electric Drive Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov", Barnaul, Russian Federation. I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation. Tel. 89236504834. E-mail: vedmankin.a.w@mail.

УДК 621.3.04.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Филина А. В., Носовец А. А.

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

Статья посвящена исследованию эффективности мероприятий по охлаждению солнечных панелей, с помощью которых улучшаются основные выходные показатели (η , P_{MAX} , U_{xx} , I_{kz} , FF), показатели конструктивной надежности, качества электроснабжения, а так же увеличивается срок эксплуатации солнечного модуля. Предложен наиболее технически и экономически эффективный способ минимизации энергетических потерь из-за нагрева, с помощью оптимального выбора способа охлаждения солнечной панели.

Ключевые слова: надежность, солнечный модуль, фотоэлектрическое преобразование, нагрев, система охлаждения.

С каждым годом количество электроэнергии производимой солнечными панелями и электростанциями увеличивается, это способствует снижению нагрузки на традиционные способы генерации, основанные на ископаемых источниках топлива, что позволяет пролонгировать их запасы. Однако на данный момент остается множество нерешенных техно-экономических проблем. Одним из основных, влияющих на стабильность работы солнечных элементов факторов, является температура.

Увеличение температуры составных элементов модуля, вследствие интенсивного солнечного излучения, отрицательно влияет на их эффективность фотоэлектрического преобразования, в результате чего снижается выходная нагрузочная мощность.

Экспериментальные исследования показывают, что при эксплуатации солнечных панелей в летнее время, при безоблачной погоде и интенсивном солнечном излучении, они в подавляющем большинстве подвергаются перегреву в течение суток.

Данное температурное воздействие влияет не только на эффективность выработки электроэнергии, но и приводит к ускорению деградации самого модуля, что в следствие ведет к снижению эксплуатационных характеристик и сокращению срока службы.

Срок службы солнечных панелей в среднем составляет 25-30 лет со дня ввода в эксплуатацию. По заявлению производителей, действительное ухудшение работы батарей возможно через 25 лет, но по экспериментальным исследованиям и тестам, солнечные модули, установленные в 1980-ом году, за 41 год снизили свою выходную нагрузочную мощность лишь на 10%.

Кристаллические кремниевые модули подразделяются на два типа: монокристаллические с КПД при высокой интенсивности солнечного излучения составляет 23%, а поликристаллические обладают КПД равным 18%. Значения коэффициента полезного действия зависят от способа изготовления кремниевых элементов (пластины или блоки) и от способа их расположения.

Развитие технологии возможно при сокращении стоимости и улучшении качества, надежности материалов, а также при повышении процесса генерации электрической энергии [1].

Существует еще один тип солнечных панелей, с применением элементов из аморфного кремния с микрокристаллическим кремнием α -Si/ μ c-Si. При изготовлении таких модулей расходуется намного меньше количества полупроводникового материала, при относительно одинаковом поглощении солнечного излучения, как у моно- и поликристаллических солнечных батарей, вследствие чего сокращается стоимость продукции.

Элементы из аморфного кремния изготавливаются на основе тонких пленок, состоящих из слоев толщиной от 1 до 4 мкм, нанесенных на недорогой вспомогательный слой (металл, стекло, полимерная пленка).

Пленки, по сравнению с жесткими плоскими панелями, из-за своей тонкости и эластичности, могут изгибаться под различными углами, тем самым если поверхность, которую они огибают, расположена под оптимальными углами к солнцу, то пленки максимально поглощают излучение из красного и инфракрасного спектров, тем самым увеличивая КПД элемента в среднем до 15-20 % [2].

Еще очень важное преимущество аморфных модулей, в том, что они способны работать при высокой температуре, там, где монокристаллические и поликристаллические батареи выходят из режимов, что приводит к снижению КПД или они вообще перестают функционировать.

КПД солнечных батарей зависит от множества факторов: структура самих солнечных элементов, климатические условия, ориентация угла наклона, температура, наличие микроповреждений на самих фото –преобразующих элементах и т.д.

Температура, является одним из важных факторов формирующих значение КПД солнечных модулей. С увеличением температуры фотоэлемента происходит:

1. Уменьшение потенциальной преобразовательной способности, поскольку уменьшается ширина запрещенной зоны полупроводника.

2. Возрастает количество основных носителей (которые имеют большую энергию), происходит перераспределение носителей по уровням. При уменьшении запрещенной зоны, полученная солнечная энергия не может полностью преобразоваться в электрическую, часть ее выделяется в виде тепла. При этом КПД солнечного модуля падает, ток насыщения увеличивается из-за малой энергии, ток короткого замыкания снижается, как и напряжения холостого хода, что приводит к значительному уменьшению доступного максимума мощности, уменьшается площадь под ВАХ (рис. 1).

3. Уменьшение коэффициента заполнения FF, вследствие вышеперечисленных пунктов.

$$FF = \frac{U_{MAX} \cdot I_{MAX}}{U_{XX} \cdot I_{KЗ}} = \frac{P_{MAX}}{U_{XX} \cdot I_{KЗ}}, \quad (1)$$

где P_{MAX} – мощность солнечного элемента, Вт; U_{XX} – напряжение холостого хода (максимальное напряжение при нулевом токе), В; $I_{KЗ}$ – ток короткого замыкания, А.

Расчет мощности солнечного элемента происходит по следующей формуле:

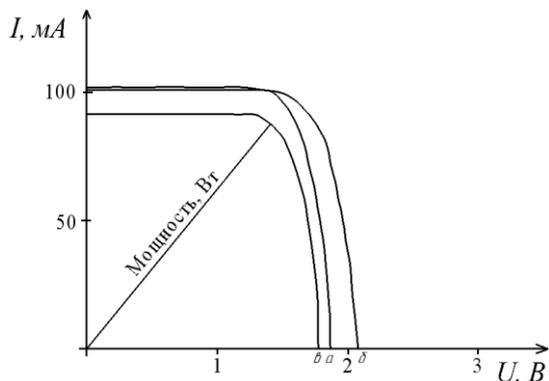


Рисунок 1 - Вольт-амперная характеристика солнечного модуля а) с охлаждающей поверхностью, б) с охлаждающим вентилятором, в) с естественной вентиляцией

$$P = P_{ст.т.} \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где P – мощность солнечного элемента, Вт; $P_{ст.т.}$ – мощность солнечного элемента при 25 °С, Вт; β – температурный коэффициент, %/°С; Δt – изменение температуры, °С.

Заводы производители публикуют значения температурных коэффициентов, которые варьируются в пределах от 0.3-0.5 %/°С. Это означает, что производительность панели падает на 0.3-0.5 % при увеличении температуры на 1°С. Следовательно, при увеличении температуры на 40°С (при $\beta = 0.3$ %), выходная мощность солнечного элемента падет приблизительно на 12%.

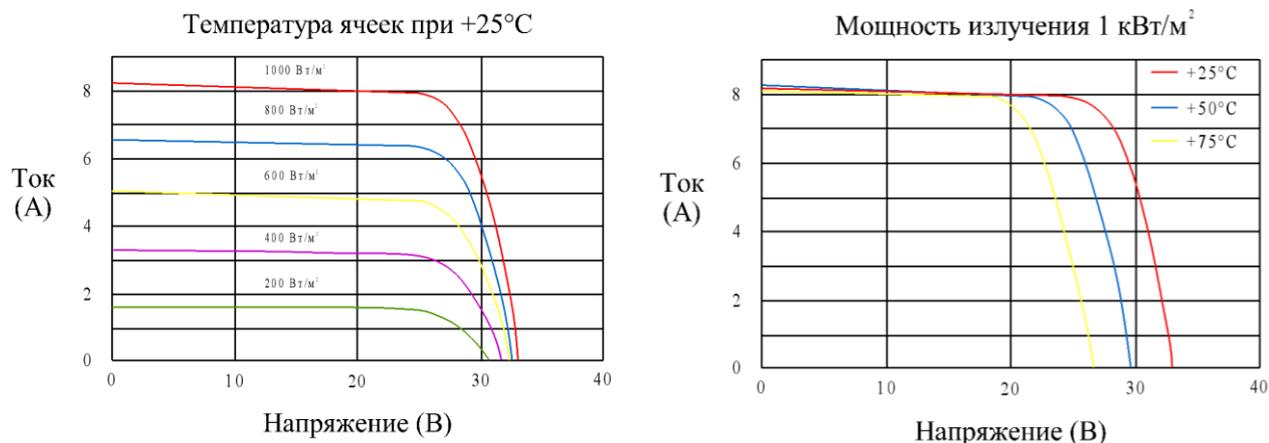


Рисунок 2 – Зависимость выходных параметров от температуры и падающего светового потока

Как известно, передача теплоты от одного более нагретого объекта к другому менее нагретому с разным тепловым сопротивлением, происходит с помощью теплопроводности. При этом тепловые сопротивления материалов зависят от толщины самого материала и удельного теплового сопротивления [3].

При расчетах теплопроводности, учитывается площадь проводящей тепло поверхности, толщина излучающего тепло материала, коэффициент теплопроводности – λ , Вт/(м×°С). Коэффициент конвекционного теплообмена обычно получают эмпирическим путем для конкретных сочетаний материалов, в связи со сложностью его прямого расчета.

Существует несколько основных способов отвода тепла от солнечных батарей:

1. Жидкостное охлаждение. Оно содержит: охлаждение с принудительной циркуляцией жидкости, распыление воды (на поверхность солнечной панели, туманообразующие форсунки, работающие под высоким давлением, охлаждающая не только солнечные панели, но и окружающую их среду) и охлаждение погружением в жидкость;

2. Воздушное охлаждение. Естественное и принудительное;
3. Охлаждение на основе цикла сорбции – испарения атмосферной воды;
4. Радиационное охлаждение;
5. Охлаждение с помощью прослойки между солнечной панелью и излучающей поверхностью.

Экспериментальными исследованиями доказано, что охлаждение солнечных панелей водой, самый надежный и эффективный способ. Но для данных установок реализующих данный метод, требуется немалое количество воды, резервуары для хранения, насосы и трубы. Что делает такой способ достаточно экономически затратным и сложным в техническом исполнении. Данная система охлаждения будет экономически маловыгодной в засушливых регионах.

Воздушное охлаждение с принудительной циркуляцией, считается достаточно распространенной системой отвода тепла от нагреваемого элемента. Однако является малоэффективным способом охлаждения, ведь чем больше площадь нагреваемого объекта, тем интенсивнее воздушный поток необходим, тем больше будет мощность оборудования, следовательно, и потребляемая электроэнергия. При работе охлаждающие установки будут вырабатывать в окружающую среду дополнительную теплоту, тем самым нагревая воздух возле солнечных панелей, при существующей зависимости теплопроводности воздуха от температуры табл. 1. Это делает такой способ еще менее эффективным и достаточно сложным в техническом исполнении.

Охлаждение на основе цикла сорбции – испарения атмосферной воды, достаточно новый и малоизученный способ охлаждения солнечных панелей, который заключается в следующем:

Гелиевая основа представляющая собой смесь углеродных нанотрубок (рис. 2) в полимерах, с поглощающей воду солью хлорида кальция (CaCl_2). Конденсирует пары в капли, которые удерживаются внутри вещества. Во время наступление дня, температура повышается, и гель выделяют влагу в форме паров, которые, в свою очередь, улавливаются прозрачной пластиковой основой, конденсируются обратно в жидкость и стекают в короб для хранения. В ночное время происходит поглощение влаги из воздуха в гелиевую основу, а днем происходит обратный этому процесс. Гель при этом располагается на тыльной стороне солнечной панели [4].

Таблица 1 – Теплопроводность воздуха в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ |
|---------------------|---|
| -10 | 0,0236 |
| 0 | 0,0244 |
| 10 | 0,0251 |
| 20 | 0,0259 |
| 30 | 0,0267 |
| 40 | 0,0276 |
| 50 | 0,0283 |
| 60 | 0,029 |
| 70 | 0,0296 |
| 80 | 0,0305 |
| 90 | 0,0313 |

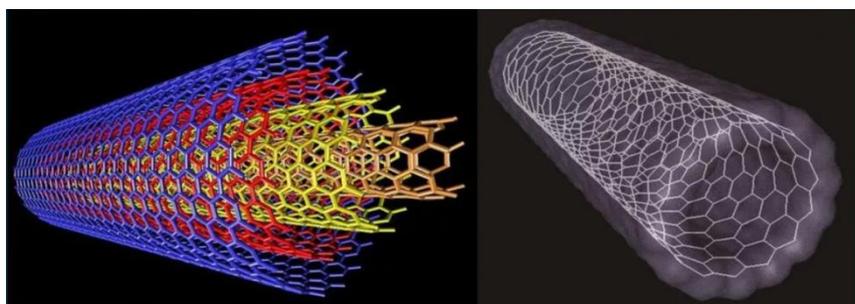


Рисунок 3 – Многослойная УТН (слева), однослойная УТН (справа)

По экспериментальным данным, температура охлаждаемой панели, в течение дня понизилась на 10°C . Что дало прирост выходной мощности на 12-16%. Однако в данном методе обнаружена зависимость необходимой массы геля от влажности воздуха в регионе. К примеру, в засушливо-пустынных регионах с ночной влажностью воздуха 25-35% для 1 м^2 солнечной панели, требуется 1 килограмм геля, при том в районах с ночной влажностью воздуха в 80%, всего 0,25 килограмма на 1 м^2 .

Поскольку данный метод является малоизученным и мало-протестированным, имея крепкую основу для дальнейшего изучения, на данный момент он является не целесообразным в использование для массового потребителя.

Радиационное охлаждение на данный момент не может полноценно выступать в образе полноценного радиатора ночного охлаждения из-за очень низкой излучающей способности, имея диапазон длин волн «атмосферного окна». Для решения существующей проблемы разрабатываются новые типы СИИ (селективные инфракрасные излучатели), включающие в себя фотонные структуры и метаматериалы. Это позволило новым радиаторам продемонстрировать высокий показатель излучающей способности, обеспечивающий эффективное дневное охлаждение. Однако такие системы находятся в стадии лабораторных тестирований и доработок, что пока делает невозможным выхода их на рынок для массового потребителя [5].

Охлаждение с помощью рассеивающих панелей, является менее эффективным способом, чем жидкостный, принудительно-воздушный, радиационный или жена основе цикла сорбции, но являющийся изученным, не требующим специальных силовых агрегатов для реализации. Следовательно, для эксплуатации такого вида охлаждения требуется меньше экономически-технических затрат.

Точно назвать какой-либо один способ охлаждения солнечных панелей энергетически и экономически эффективным нельзя, поскольку существует зависимость от следующих критериев: географическое расположение объекта охлаждения; начальный капитал, выделяемый для системы охлаждения; требуемые параметры генерации электроэнергии; площадь территории, на которой будет установлена СЭС; техническое и технологическое задание и т.д.

Возможно, существует необходимость создания математической модели (вследствие программного продукта) с заданием вышеперечисленных критериев для определения наиболее эффективных систем охлаждения для каждого конкретного потребителя, с разбиением приоритетности критериев.

Список литературы

1. Филина, А.В. Электротехнические материалы как средство повышения эффективности работы электрооборудования / А.В. Филина, А.А. Носовец // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 205 – 208.
2. Розанов Ю. К., Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.
3. Филина, А.В. О влиянии свойств электротехнических материалов на эффективность работы электротехнических устройств / А.В. Филина, И.С. Морозов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. статей науч.-технич. конф. - Курск: Юго-зап. гос. ун-т, 2019. - 332 с.
4. Natarajan, S. K., Mallick, T. K., Katz, M. & Weingaertner, S. Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. *Int. J. Therm. Sci.* 50, 2514-2521 (2011).
5. Bin Zhao and al. Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. *Applied Thermal Engineering.* 2019. Vol. 155. P. 660–666.

Филина Анна Владимировна, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», 302026, г. Орёл, Комсомольская ул., 95. Эл.адрес: anvlf@mail.ru, тел. 8(953) 810-03-05.

Носовец Артем Александрович, студент гр. 81-ЭЭ, кафедра электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», 302026, г. Орёл, Комсомольская ул., 95. Эл.адрес: nosovetsaa@mail.ru, тел. 8 (910) 207-12-93

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF MEASURES FOR COOLING SOLAR PANELS AS WAYS TO INCREASE THE GENERATION OF ELECTRIC ENERGY

Filina A.V., Nosovets A. A.

Russia, Orel, "OSU named after I.S. Turgenev"

The article is devoted to the study of the effectiveness of measures for cooling solar panels, with the help of which the main output indicators (η , P_{MAX} , U_{hx} , I_{kz} , FF), indicators of structural reliability, quality of power supply are improved, as well as the service life of the solar module is increased. The most technically and economically efficient way to minimize energy losses due to heating is proposed, using the optimal choice of the solar panel cooling method.

Keywords: reliability, solar module, photovoltaic conversion, heating, cooling system.

Bibliography

1. Filina, A.V. Electrotechnical materials as a means of improving the efficiency of electrical equipment / A.V. Filina, A.A. Nosovets // Modern tool systems, information technologies and innovations: - Kursk: CJSC "University Book", 2019. - pp. 205 - 208.
2. Rozanov Yu. K., Electrical and electronic devices: Textbook for universities / edited by Yu. K. Rozanov. - 2nd ed., ispr. and add. - M.: Informelectro, 2001. - 420 p.
3. Filina, A.V. On the influence of the properties of electrical materials on the efficiency of electrical devices / A.V. Filina, I.S. Morozov // Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: collection of scientific. articles of scientific and technical conf. - Kursk: Yugo-zap. gos. un-t, 2019. - 332 p.
4. Natarajan, S. K., Mallick, T. K., Katz, M. & Weingaertner, S. Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. Int. J. Therm. Sci. 2011. Vol. 50. P. 2514-2521.
5. Bin Zhao and al. Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 155. P. 660–666.

Filina Anna Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, I.S. Turgenev OSU, 302026, Orel, Komsomolskaya str., 95. Email address: anvf@mail.ru, tel.8(953) 810-03-05.

Nosovets Artem Aleksandrovich, student gr. 81-EE, Department of Electrical Equipment and Energy Saving of the I.S. Turgenev OSU, 302026, Orel, Komsomolskaya str., 95. Emailaddress: nosovetsaa@mail.ru, tel. 8 (910) 207-12-93

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ IGBT МОДУЛЕЙ В СХЕМАХ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Филина А. В., Андреев Е.С.

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

В статье рассмотрены варианты установки тиристорov и IGBT транзисторов в силовую цепь, а также произведены тепловые расчёты для определения наилучших показателей с целью выявления наиболее энергоэффективной системы электроснабжения при использовании вышезаявленных деталей в силовых ключах с учётом плюсов и минусов каждого предлагаемого элемента.

Ключевые слова: тиристор, IGBT транзистор, силовые электронные ключи, температура рабочей среды, потери.

Одним из главных элементов, отвечающих за управление потоками электрической энергии в аппаратуре, можно назвать коммутирующий электрический статический и бесконтактный электронный ключ.

Силовые электронные ключи изготавливают из полупроводниковых материалов. Им свойственно немаловажное преимущество, заключающееся в бездуговой коммутации,

которая достигается благодаря контролю за проводимостью: высокая (ключ включен) и низкая (выключен) [1].

Сочетание электронных силовых элементов, а также силовых полупроводников и формирователя импульсов (драйвера) представляет собой электронный ключ.

На рисунке 1 изображена силовая электронная система с интерфейсом, в которой присутствуют такие элементы как внешняя электронная цепь, обладающая высоким потенциалом, и управляющее устройство, служащее для обработки информации и являющееся резервным источником питания. Требуемое распределение потенциалов достигается благодаря присутствию оптопар или индуктивной связи.

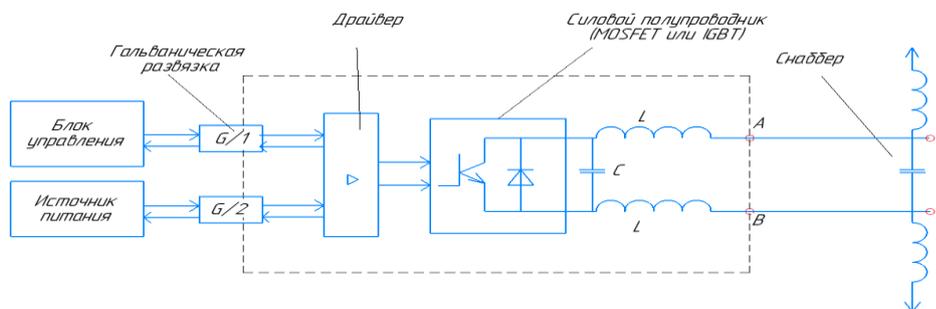


Рисунок 1 – Схематическое представление силовой электронной системы

В отличие от коммутационных контактных аппаратов, относящиеся к полупроводниковой категории силовые ключи имеют ряд важных достоинств, рассмотренных ниже:

1. Отсутствует подвижная механическая система.
2. Быстро включаются и отключаются.
3. Коммутация цепей осуществляется бездуговым методом. Отсюда следует, что отсутствует электрический износ.
4. Обеспечивают огромное быстродействие.
5. Позволяют плавно управлять током и регулировать его параметры.
6. Надёжность функционирования во взрывоопасных и агрессивных средах.
7. Позволяют управлять силовым ключом посредством сигналов низкой мощности.
8. Позволяют управлять слабыми сигналами в коммутируемых цепях.
9. Бесшумность функционирования.

Помимо ряда неоспоримых достоинств, у силовых ключей существуют и отрицательные стороны:

1. Способность изменять характеристики электронного ключа, в частности, такие показатели как температура рабочей и окружающей среды, приложенное напряжение и т.п.

Если необходимо сократить потери на ключе при использовании MOSFET транзистора, следует остановить выбор на транзисторе указанной разновидности, характеризующемся пониженным уровнем сопротивления канала. Тем не менее, при этом необходимо учитывать, что чем выше температура полупроводника, тем выше станет и его сопротивление, одновременно повысятся потери на нагрев [2], что естественным образом вытекает из нижеследующей формулы:

$$P = I_{\text{сток}}^2 \cdot r_{\text{с-и(вкл)}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{сток}}$ – ток стока, $r_{\text{с-и(вкл)}}$ – сопротивление сток-исток в открытом состоянии.

Относительно IGBT транзисторов можно сказать, что чем выше температурные показатели полупроводника, тем ниже напряжение насыщения p-n перехода, откуда логически вытекает сокращение потерь на нагрев [5]:

$$P = I_{\text{к-э}}^2 \cdot U_{\text{к-э}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{к-э}}$ – ток коллектор-эмиттер, $U_{\text{к-э}}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер.

2. Большой разброс в электрических характеристиках ключей одинаковой разновидности.

Статические показатели описываются передаточной характеристикой (рис. 4) – зависимость выходной величины тока либо напряжения от входной величины тока, либо напряжения.

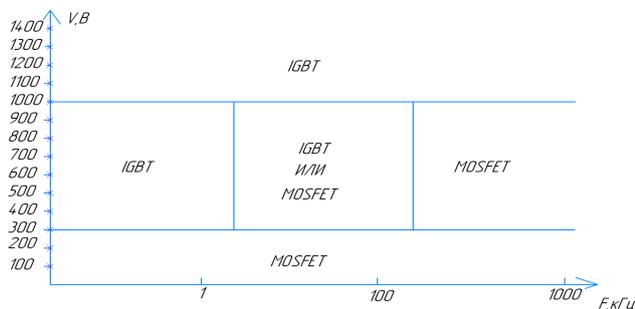


Рисунок 2 – Диаграмма для выбора разновидности транзистора под силовой ключ

Благодаря вышеуказанной характеристике можно узнать 2 основных статических показателя:

1) $K_u = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}}$ – коэффициент усиления ключа;

2) помехоустойчивость – представляет собой напряжение помехи, потенциально могущее оказать влияние на состояние ключа. При этом максимальное напряжение помехи, при котором не возникает ложного переключения ключа, вычисляется по нижеследующей формуле:

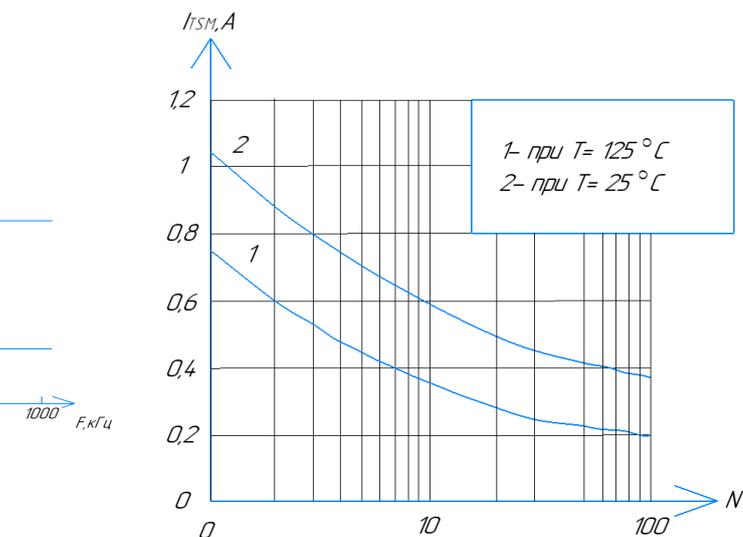


Рисунок 3 – График, показывающий зависимость тока удержания от температуры рабочей среды

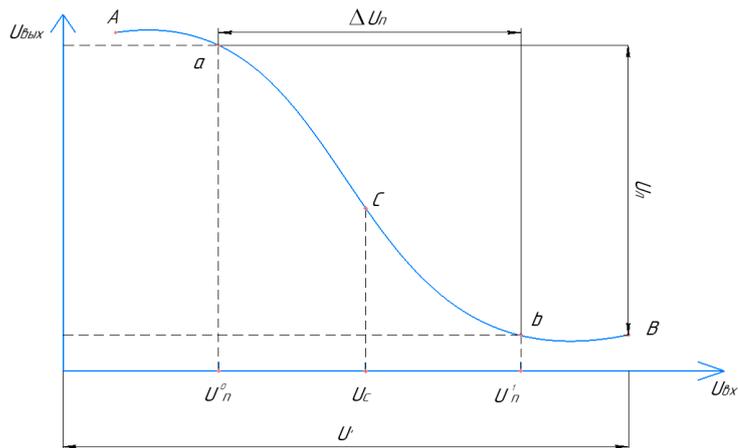


Рисунок 4 – Передаточная характеристика силового ключа

$$U_{\text{п}}^+ = U_{\text{п}}^0 - U_{\text{вх}}^0 \quad (3)$$

Динамические показатели силового ключа обуславливаются скоростью, с которой протекают переходные процессы.

При этом скорость включения ключа зависит и предопределяется совокупной величиной времени задержек фронта и продолжительностью фронта импульса. Значение скорости включения определяется по формуле:

$$T_{\text{min}} = \tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{н}} \quad (4)$$

3. Относительно небольшая глубина коммутаций, то есть соотношение величин сопротивления ключа в выключенном и подключенном состояниях.

Когда ключ замыкается, сопротивление становится минимальным, а величина тока напротив, максимальна. При этом выходное напряжение становится нулевым. Когда ключ размыкается, его сопротивление возрастает до предела, вот почему протекание тока по нему де-факто становится невозможным.

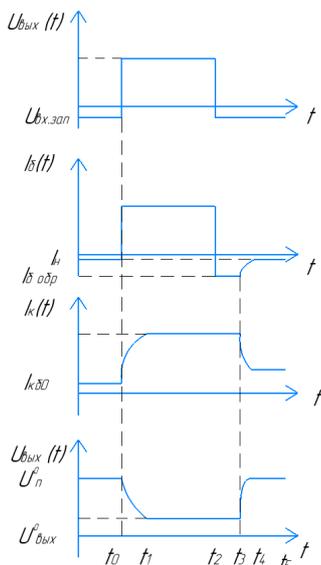


Рисунок 5 – Графики переходных процессов в случае динамических показателей

$$\frac{R_{\text{разомкнут}}}{R_{\text{замкнут}}} = \frac{\infty}{0} \approx 0. \quad (5)$$

4. Отсутствует визуально заметный разрыв цепи в отключенном положении, при этом присутствует остаточный ток и одновременно отсутствует гальваническая развязка в коммутируемой цепи.

5. Ключи характеризуются односторонностью токопроводимости и могут функционировать даже при однополярном напряжении. Это правило не распространяется на некоторые разновидности интегральных гибридных аппаратов, совмещающих в себе качества сразу нескольких полупроводниковых устройств.

6. В случае высокой проводимости минимальное значение прямого падения напряжения на ключе колеблется в диапазоне 0,7-1,5В (максимально до 3В), что объясняется контактной разностью потенциалов, возникающей в месте соприкосновения разных полупроводниковых слоёв. Именно по этой причине возникают значительные потери мощности, превращающиеся в тепло и создающие потребность в эксплуатации охлаждающих установок.

7. Малоустойчивы к электрической перегрузке.

8. Возникает необходимость защищать ключ от перегрузок по напряжению и току.

Эта проблема решается благодаря специальному техническому расчёту.

9. Существует вероятность ошибочных переключений из-за спонтанного возникновения коротких импульсов, способных повлиять на цепь управления ключом в таких ситуациях как удар молнии в непосредственной близости, образование дуговых разрядов в контактных устройствах, выполнение электросварочных работ и пр.

Попробуем сравнить силовые ключи на транзисторе IGBT (сокращение от англ. «Insulated-gate bipolar transistor») и тиристоре, чтобы выявить наиболее энергоэффективный вариант для будущих систем электроснабжения.

На текущий момент известно, что IGBT транзисторы активно вытесняют из мощных схем управления тиристоры [3].

Предлагаем посмотреть на технические параметры выбранных транзисторов и тиристора.

В ходе проверки тиристора ТБИ143-630-15 на испытательном стенде были выявлены следующие параметры: рабочее напряжение 1200 В, средний ток в открытом состоянии 630А, тепловое сопротивление р-п переход-корпус 0,0320°С/Вт, динамическое сопротивление в открытом состоянии 0,501мОм, с максимальной температурой 150 °С.

На данный момент тиристоры зачастую применяются с частотой 50Гц. Это вызвано тем, что при повышении частоты увеличиваются потери и тиристор начинает перегреваться. Перегрев связан с их большим временем выключения, так как оно длится в течение нескольких десятков микросекунд. Зависимость времени выключения тиристора от частоты можно увидеть на рисунке 6, б. Из вышесказанного можно сделать вывод о низком КПД тиристора.

Рассчитаем максимально допустимый ток в открытом состоянии для тиристора с односторонней проводимостью:

$$I_{TAVm} = \frac{\sqrt{U_{T(TO)}^2 + 9,8r_T \frac{T_{jm} - [T_c]}{R_{thjc}} - U_{T(TO)}}}{4,9r_T}. \quad (6)$$

Расчёт максимально допустимого тока в открытом состоянии для тиристора с рабочей температурой 55°C:

$$I_{TAVm55} = \frac{\sqrt{1,394^2 + 9,8 \cdot 0,000501 \cdot \frac{125-55}{0,0320}} - 1,394}{4,9 \cdot 0,000501} = 882 \text{ A.} \quad (7)$$

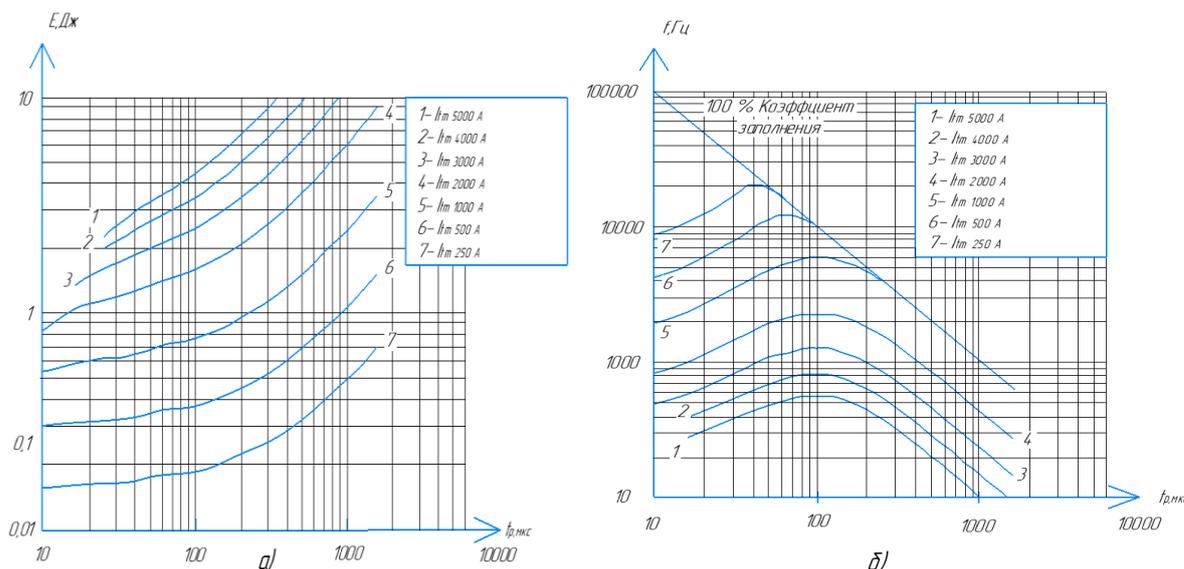


Рисунок 6 – Графики, показывающие потери тиристора: а) зависимость энергии потерь за один синусоидальный импульс тока от длительности импульса; б) зависимость рабочей частоты тиристора ТБИ143-630-15 от длительности импульсов тока синусоидальной формы

Расчёт максимально допустимого тока в открытом состоянии для тиристора с рабочей температурой 85°C:

$$I_{TAVm85} = \frac{\sqrt{1,394^2 + 9,8 \cdot 0,000501 \cdot \frac{125-85}{0,0320}} - 1,394}{4,9 \cdot 0,000501} = 590 \text{ A.} \quad (8)$$

Рассчитаем среднюю мощность потерь тиристора при заданных максимально допустимых токах:

$$P_T = U_{T(TO)} \cdot I_{TAV} + k_{\phi}^2 \cdot r_T \cdot I_{TAV}^2 \quad (9)$$

Расчёт средней мощности потерь тиристора с рабочей температурой 55°C:

$$P_{T55} = 1,394^2 \cdot 882 + 2,22^2 \cdot 0,000501 \cdot 882^2 = 3634,7284 \text{ Вт.}$$

Расчёт средней мощности потерь тиристора с рабочей температурой 85°C:

$$P_{T85} = 1,394^2 \cdot 590 + 2,22^2 \cdot 0,000501 \cdot 590^2 = 2006,0128 \text{ Вт.}$$

Испытания для IGBT MIDA-HB12FA-600N на другом стенде показали следующие параметры: рабочее напряжение 1200 В, номинальный ток коллектора 600 А, напряжение насыщения 0,87 В, динамическое сопротивление 3,76 мОм, максимальная температура работы 175°C, тепловое сопротивление переход-корпус 0,058 К/Вт. Основной положительной стороной IGBT-транзистора следует признать большие показатели тока и напряжения.

Рассчитаем уровень максимально допустимого тока в открытом состоянии для IGBT-транзистора при температурных показателях 85°C и 50°C:

$$I_{\text{сред}} = \sqrt{\left(\frac{U_{ce0}}{2 \cdot r_{ce0}}\right)^2 + \frac{T_j - T_c}{R_{thJ-c} \cdot r_{ce0}} - \frac{U_{ce0}}{2 \cdot r_{ce0}}}, \quad (10)$$

$$I_{\text{сред}85} = \sqrt{\left(\frac{0,87}{2 \cdot 0,00376}\right)^2 - \frac{175 - 85}{0,058 \cdot 0,00376} - \frac{0,87}{2 \cdot 0,00376}} = 537 \text{ А.}$$

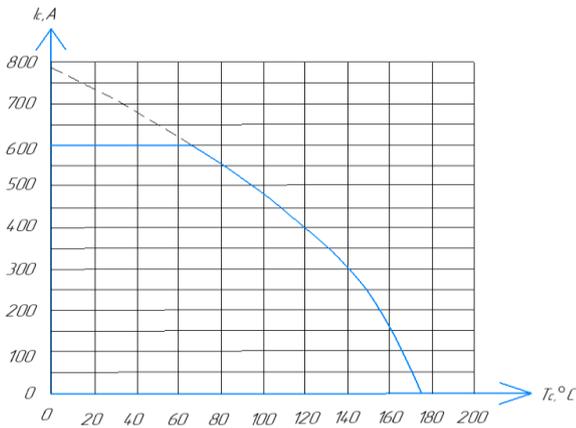


Рисунок 7 – Зависимость тока коллектора от температурного показателя

Рассчитаем статические потери при рабочей температуре 80°C – $P_{\text{стат}80}$:

$$P_{\text{стат}80} = U_{\text{к-э(насыщ)}} \cdot I_{\text{сред}} \quad (11)$$

$$P_{\text{стат}80} = 2,90 \cdot 537 = 1557,3 \text{ Вт}$$

На представленном выше рис. 7 можно увидеть, что средний ток за импульс при температуре 55°C равен 600 А из-за ограничений конструкции.

Рассчитаем статические потери при рабочей температуре 55°C :

$$P_{\text{стат}55} = U_{\text{к-э(насыщ)}} \cdot I_{\text{сред}}, \quad (12)$$

$$P_{\text{стат}55} = 2 \cdot 600 = 1740 \text{ Вт.} \quad (12)$$

Рассчитаем динамические потери для одного импульса:

$$P_{\text{дин}} = \frac{(E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{rec}}) \cdot 15 \cdot \sqrt{3}}{U_{\text{ce}}}, \quad (13)$$

$$P_{\text{дин}} = \frac{(0,038 + 0,083 + 0,049) \cdot 15 \cdot \sqrt{3}}{600} = 0,074 \text{ Вт.}$$

Исходя из проведенных расчетов, можно прийти к заключению, что использование IGBT модулей в схемах силовых ключей является более экономичным решением в сравнении с тиристорами, тем самым, доказывая свою высокую энергоэффективность в системе электроснабжения. Это обусловлено тем, что IGBT модули имеют более низкие статические и динамические потери, а кроме того, способны функционировать на более высокой частоте без сильного увеличения потерь, по отношению к тиристорам. Также нужно учесть, что, невзирая на сравнительную дороговизну IGBT, их более выгодно использовать в схемах силовых ключей, т.к. они уменьшают потери, могут выдерживать больший диапазон режимов и имеют конструктивную особенность, позволяющую исключить из схемы ключа снабберную цепь.

Список литературы

1. Розанов Ю. К., Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / под ред. Ю.К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.
 2. Филина, А.В. О влиянии свойств электротехнических материалов на эффективность работы электротехнических устройств / А.В. Филина, И.С. Морозов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. статей науч.-технич. конф. - Курск: Юго-зап. гос. ун-т, 2019. - 332 с.
 3. Филина, А.В. Способы управления нагрузкой в цепях переменного и постоянного тока устройств / А.В. Филина, И.В. Поздняков // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. статей науч. конф. - Курск: Юго-зап. гос. ун-т, 2019. - 332 с.
- Филина Анна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, тел. 8(953)810-03-05.

Андреев Егор Сергеевич, студент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, тел. 8(980)361-72-79.

UDC 621.311.4

USING IGBT MODULES IN POWER KEY CIRCUITS

Filina A.V., Andreev E.S.

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

The article discusses options for installing thyristors and IGBT transistors in a power circuit, and thermal calculations are performed to determine the best indicators in order to identify the most energy-efficient power supply system when using the above-stated parts in power switches, taking into account the pros and cons of each proposed element.

Keywords: thyristor, IGBT transistor, power electronic switches, working medium temperature, losses.

Bibliography

1. Rozanov Yu. K., Electrical and electronic devices: Textbook for universities / edited by Yu. K. Rozanov. - 2nd ed., ispr. and add. - M.: Informelectro, 2001. - 420 p.

2. Filina, A.V. On the influence of the properties of electrical materials on the efficiency of electrical devices / A.V. Filina, I.S. Morozov // Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: collection of scientific. articles of scientific and technical conf. - Kursk: Yugo-zap. gos. un-t, 2019. - 332 p.

3. Filina, A.V. Methods of load control in AC and DC circuits of devices / A.V. Filina, I.V. Pozdnyakov // Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: collection of scientific papers. articles of the scientific conference - Kursk: Yugo-zap. gos. un-t, 2019. – 332

Filina Anna Vladimirovna, candidate of technical science, senior lecturer at the Chair «Electrical equipment and energy saving», FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», city of Orel; tel. 8(953) 810-03-05.

Andreev Egor Sergeevich, student at the Chair «Electrical equipment and energy saving», FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», city of Orel; tel. 8(910) 207-12-93.

СЕКЦИЯ 5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Руководитель:

Поляков Роман Николаевич, д.т.н., доцент, зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл.

УДК 621.822

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А.

Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева

В статье представлена информация по образованию пленочных антифрикционных покрытий на поверхностях трения. Приведены результаты анализа применяемых антифрикционных пленочных покрытий. Одной из главных проблем нанесения тонких пленочных покрытий является отсутствие технологических

режимов, рекомендованных производителем. Описан состав пленочного антифрикционного покрытия. Представлены результаты экспериментальных исследований нанесения тонких пленочных покрытий. Выбран пневматический распылитель для нанесения тонких пленочных покрытий. Проведены серии экспериментов по выявлению технологических режимов нанесения тонких пленочных покрытий. Выполнен качественный и количественный анализ результатов нанесения тонких пленочных покрытий. Предложена функциональная схема нанесения антифрикционного пленочного покрытия. На основе выполненных выводов даны рекомендации по технологическим режимам нанесения тонких пленочных антифрикционных покрытий на модифицированную поверхность трения.

Ключевые слова: подшипник скольжения, энергоэффективность, пленочное покрытие, прочность, адгезия, антифрикционное покрытие.

Последнее время в узлах и механизмах часто используются модифицированные поверхности трения, которые представляют собой детали с различными видами покрытий. При этом такие детали очень часто представляют собой многослойные изделия, состоящие из стального основания с последующим нанесением на него покрытия [1]. Свойства покрытия зависят от материала и способа его нанесения. Необходимо учесть, что свойства наносимого покрытия должны полностью соответствовать условиям эксплуатации данной детали [2]. Применяемые при техническом обслуживании и ремонте машин покрытия, по своему назначению, принято подразделять на следующие основные группы: износостойкие, лакокрасочные, антифрикционные, коррозионно-стойкие, жаростойкие. В большинстве случаев при нанесении покрытий происходит изменение габаритных и присоединительных размеров. Размеры деталей увеличиваются на толщину наносимого слоя покрытия. Во многих случаях, это недопустимо [3], так как приводит к изменению технических параметров узлов и деталей.

Данную проблему позволяет решить применение новых материалов, в частности пленочных покрытий (толщина пленочного слоя составляет от 5 мкм до 30 мкм) которые позволяют значительно повысить работоспособность деталей машин.

Основная проблема заключается в том что, необходимо выбрать покрытие, которое будет выполнять свои функции, легко наноситься на поверхность изделия, не требуя сложных приспособлений и оборудования и при этом иметь высокую адгезионную прочность сцепления с основным металлом [4, 5]. Обычно производитель не описывает технологический процесс нанесения покрытия. В прилагаемых к покрытиям документах не указаны основные режимы, которые влияют на трибологические свойства сформированного пленочного покрытий [6, 7].

Пленочные антифрикционные покрытия после формирования на поверхностях трения являются твёрдыми на ощупь, по виду они похожи на лакокрасочные покрытия. Пленочные антифрикционные покрытия содержат твёрдые смазочные материалы в качестве пигментов, смолы в качестве связывающего вещества, а также жидкость-растворитель. В качестве пигментов преимущественно применяют дисульфид молибдена, графит и ПТФЭ. Состав пленочного антифрикционного покрытия представлен в виде схемы на рисунке 1.

Основополагающим фактором для обеспечения смазывающей способности покрытия в процессе эксплуатации, помимо выбора отдельного компонента, является также объемная концентрация пигментов в составе покрытия. Пленочные антифрикционные покрытия наносятся преимущественно методом распыления, на предварительно обезжиренные поверхности, также возможно нанесение галтованием, погружением в центрифугу, электростатическим и автоматическим методом распыления, нанесение печатным способом, вальцеванием с последующей сушкой при комнатной температуре или в печи.

Универсальным инструментом для нанесения пленочных антифрикционных покрытий является пневматический распылитель. Данный вид нанесения покрытий является наиболее простым и доступным. Работа данного инструмента заключается в том, что антифрикционный материал, подающийся в распылитель и выходящий из его сопла, разбивается на мелкие частицы потоком сжатого воздуха, «выстреливающего» с большой скоростью из отверстий воздушной головки. В результате образуется так называемый «факел», состоящий из частичек материала, движущихся по направлению к

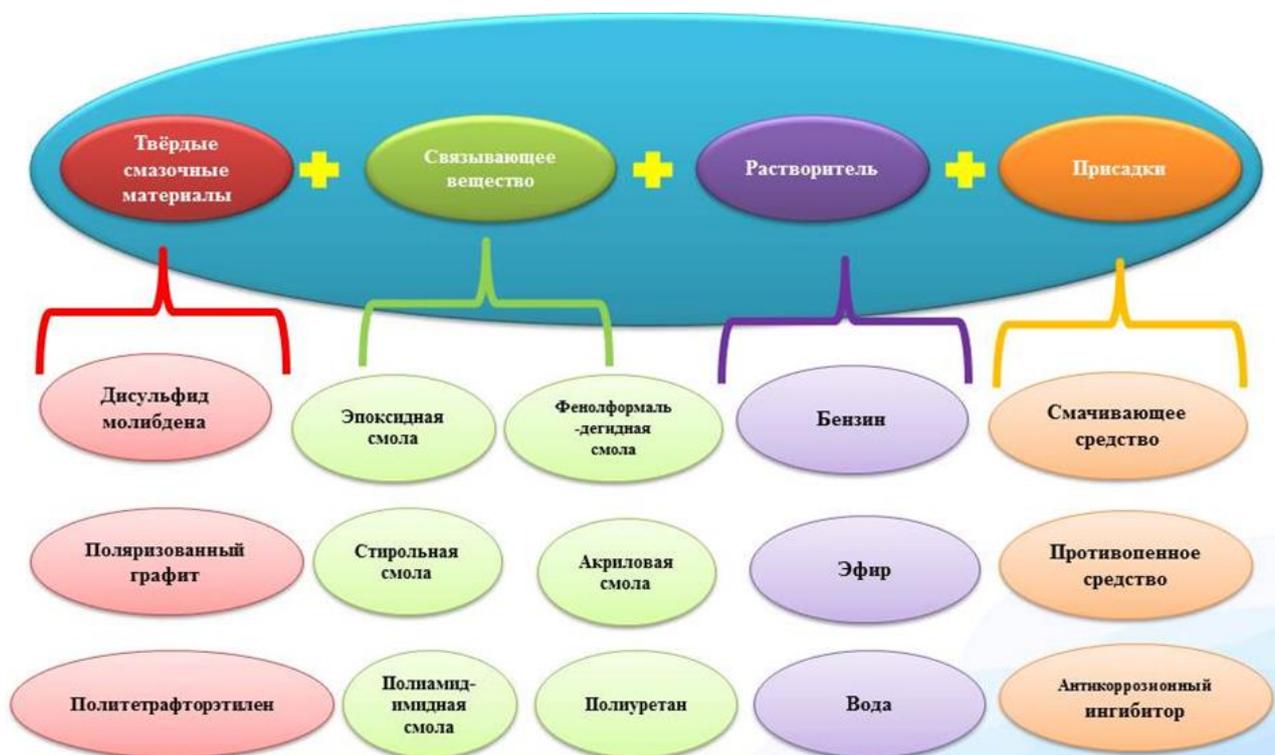


Рисунок 1 - Состав пленочного антифрикционного покрытия

обрабатываемой детали или поверхности. Долетев до поверхности, частички оседают на ней, формируя покрытие. На качество нанесения данного покрытия в большей степени будет влиять процесс формирования «факела», который в свою очередь будет зависеть от расстояния пневмораспылителя до детали и скорости выходного потока воздуха.

Был проведен натурный эксперимент по исследованию влияния дистанции и скорости на качество нанесённого покрытия (рисунок 2).

Задачей эксперимента являлось получить оптимальные значения скорости воздуха и дистанции нанесения покрытия для получения качественного покрытия при его максимальном переносе. Для проведения эксперимента был подготовлен краскопульт Константа А. Наносимое пленочное анти-фрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (12%) с органическим связующим, отверждаемое при нормальной температуре. Измерение скорости воздушного потока производилось ареометром. Для установки ареометра и пневматического распылителя использовался штатив. Замеры расстояния проводились с помощью металлической линейки ГОСТ 427-75.

Оптимальные параметры нанесения пленочного антифрикционного покрытия определяли по отпечатку факела. При правильном подборе всех параметров, отпечаток факела должен представлять собой четкий, сильно вытянутый овал равномерно нанесенного пленочного покрытия (возможно, с небольшой размытостью краев).



Рисунок 2 - Измерение скорости воздушного потока

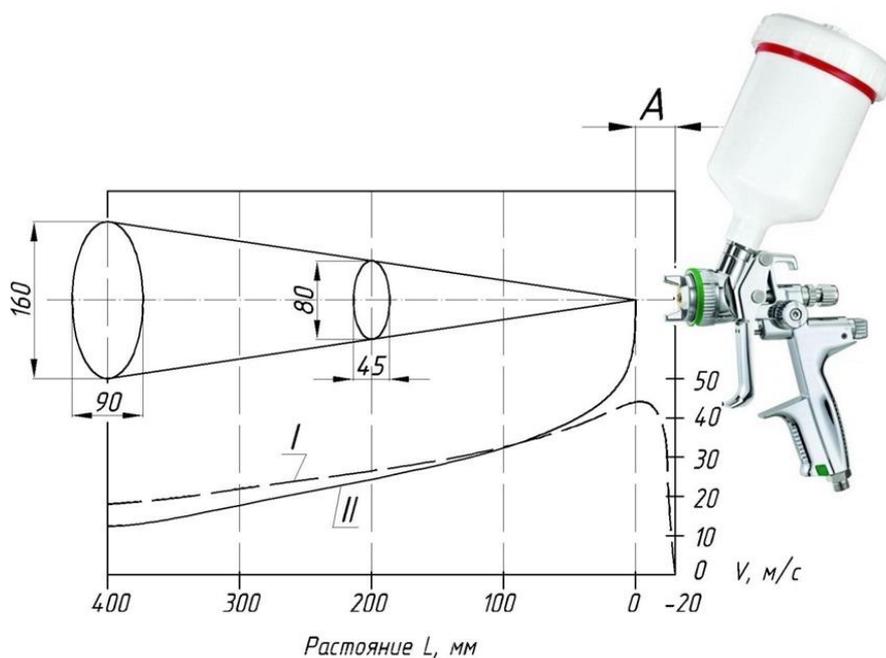


Рисунок 3 – диаграмма нанесения антифрикционного пленочного покрытия:

I – скорость воздуха; II – скорость частиц антифрикционного покрытия; A – зона формирования «факела» и достижения максимальной скорости распыляемого покрытия

Его боковые стороны ровные, без каких-либо выступов и впадин, а нанесенный материал равномерно распределен по всей площади пятна.

В ходе проведенных экспериментов был получена функциональная схема нанесения антифрикционного пленочного покрытия, представленная в виде диаграммы на рисунке 3.

Представленный выше материал позволяет, что на нение прочности сцепления инирующее влияние зывает изменение ичественных значений величины дистанции нанесения покрытия. Вторым по значимости фактором, влияющим на прочность сцепления, является шероховатость поверхности.

Угол нанесения покрытия оказывает наименьшее влияние на прочность сцепления. Оптимальное расстояние для формирования пленочных антифрикционных покрытий составляет 180 – 200 мм, при этом скорость воздуха при этом составляет 24 - 28 м/с. Отпечаток факела составил 80мм x 45мм.

Выше представленные материалы получены при работе над проектом в рамках Постановления Правительства РФ №218 «Создание цифровой системы мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния технического оборудования с применением технологии искусственного интеллекта на базе отечественных аппаратных и программных средств», договор совместно с ЗАО «Электропривод и Силовая электроника» №4869-2081.

Список литературы

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская – Киев: Наукова думка, 1987
2. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для ВУЗов. В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Мет-я, 1987.
3. Ярошевич В.К., Белорецкий М.А. Антифрикционные покрытия из металлических порошков. – Минск: Наука и техника, 1981. – 175 с.
4. Курбатова И.А. Технология, структура и свойства антифрикционных материалов на основе системы железо-медь, содержащих графит. Диссертация к.т.н. – М., 1986.
5. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
6. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings / Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289.
7. Gorin A. V., Rodichev A. Y., Tokmakova M. A. 2019. Adhesive strength research of film antifriction coatings. Materials Today: Proceedings, Volume 19, Part 5, 2019, Pages 2329-23328.

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 машин ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: rodfox@yandex.ru
Токмакова Мария Андреевна, аспирант ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: gorin57@mail.ru

UDC 621.822

RESEARCH OF APPLICATION MODES OF FILM ANTIFRICTION COATINGS PROVIDING ENERGY EFFICIENCY OF SLIDING BEARINGS

*Novikov A.N., Rodichev A.Y. Tokmakova M.A.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev*

The article presents a study of the adhesive strength of the adhesion of film antifriction coatings applied to multilayer plain bearings of rotor units. The process of forming a film antifriction coating is presented. An experiment to determine the adhesion strength of an antifriction film coating is considered. In the course of the experiment, a number of samples of various roughness were used, on which an antifriction film coating was applied. A qualitative assessment of the adhesion strength of the coating with the main antifriction layer was carried out. Conclusions are formulated about the adhesion strength of the film antifriction coating depending on the surface roughness and the initial processing of the main antifriction layer.

Keywords: sleeve bearing, energy efficiency, film coating, strength, adhesion, anti-friction coating.

Bibliography

1. Thermal gas coatings from powder materials. Reference / Yu.S. Borisov, Yu.A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaya - Kiev: Naukova Dumka, 1987.
2. Powder metallurgy and sprayed coatings: Textbook for universities. V.N. Antsiferov, G.V. Bobrov, L.K. Druzhinin et al. - M.: Met-ya, 1987.
3. Yaroshevich V.K., Beloretskiy M.A. Anti-friction coatings made of metal powders. - Minsk: Science and Technology, 1981. - 175 p.
4. Kurbatova I.A. Technology, structure and properties of antifriction materials based on the iron-copper system, containing graphite. Ph.D. thesis - M., 1986.
5. Kutkov A.A. Wear-resistant and antifriction coatings. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 152 p.
6. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings / Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289.
7. Gorin A. V., Rodichev A. Y., Tokmakova M. A. 2019. Adhesive strength research of film antifriction coatings. Materials Today: Proceedings, Volume 19, Part 5, 2019, Pages 2329-23328.

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 62-13

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РОТОРА НА ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ, СМАЗЫВАЕМЫХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Фетисов А.С.

Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева

В статье представлены этапы проведения исследования влияния приложенного магнитного поля и частоты вращения ротора на интегральные и динамические характеристики роторной системы на подшипниках скольжения, смазываемых магнитореологической жидкостью, в области первой критической

частоты. Приведены основные расчетные соотношения. Приведены гипотезы, проверяемые в ходе данного вычислительного эксперимента

Ключевые слова: роторная система, критическая частота, положение подвижного равновесия, динамические коэффициенты

Вопросы применения магнитоэологических жидкостей в качестве смазочного материала радиальных и упорных подшипников скольжения являются актуальными с точки зрения улучшения рабочих характеристик роторных машин. Исследования показывают, что приложенное внешнее магнитное поле позволяет создать соизмеримые с гидродинамическими объемные силы в смазочном материале [1-2]. Данные силы в рамках гидродинамического течения смазочного материала в области зазора опоры скольжения увеличивают ее грузоподъемность [3-5]. Также увеличивается и внутреннее трение жидкости за счет торможения магнитных частиц в объеме жидкости [6]. В сумме, данные эффекты позволяют говорить о возможной применимости магнитоэологических жидкостей в качестве смазочного материала опор скольжения.

Задача динамики ротора на магнитоэологических опорах скольжения в большей части случаев базируется на результатах решения стационарной гидродинамической задачи. В рамках стационарной задачи определяются реакции смазочного слоя, определяются точки подвижного равновесия, соответствующие определенному режиму смазывания опоры. Полученные реакции смазочного слоя входят в состав уравнения динамики. Вторым путем связи стационарной и динамической задачи является линеаризация реакции смазочного слоя в окрестностях рассматриваемой точки подвижного равновесия. В этой подзадаче рассчитываются характеристики жесткости и демпфирования, которые определяют динамическое поведение опоры. Исследования в области динамики роторов на опорах скольжения, смазываемых магнитоэологическим смазочным материалом, говорят о значительном изменении характеристик жесткости и демпфирования, а также динамического поведения ротора [1, 7, 8]. Также существуют работы, посвященные исследованию собственных частот на опорах данного типа. Результаты этих работ показывают потенциальную возможность управления собственными частотами ротора за счет изменения динамических коэффициентов опор скольжения [9, 10]. Однако в рамках подобных исследований принимается упрощение, что динамические коэффициенты либо не изменяются на всем протяжении исследуемых частот вращения ротора [1], а зависят только от приложенного внешнего магнитного поля, либо данные коэффициенты характерны для определенной частотной области [11]. В случаях, когда исследуется частотная область, в которую входит резонансная зона колебаний роторной системы, требуется более точное определение динамических коэффициентов.

В рамках комплексного теоретико-экспериментального исследования была доказана возможность управления интегральными и динамическими характеристиками опоры скольжения, смазываемой магнитоэологическими жидкостями [12-13]. Данная работа посвящена планированию исследований динамики ротора в окрестностях первой критической частоты. Для рассматриваемого ротора (рисунок 1) первая резонансная частота находится в диапазоне между 3000 об/мин и 4000 об/мин (рисунок 2). Данная область будет

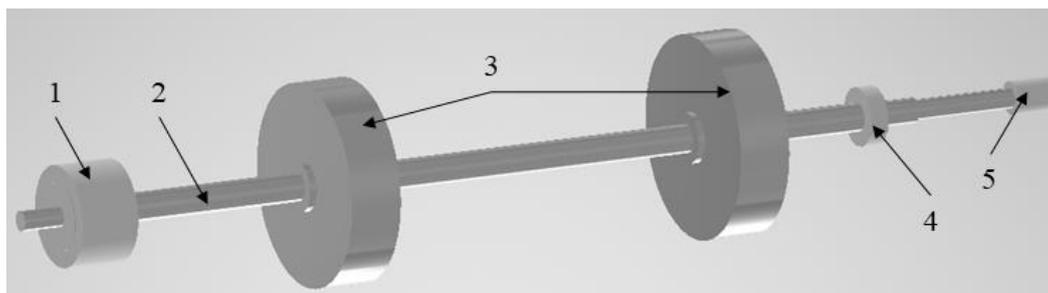


Рисунок 1 – Схема ротора: 1 – левый ПС, 2 – вал, 3 – диски, 4 – правый ПС, 5 – муфта

Амплитуда
колебаний, мкм

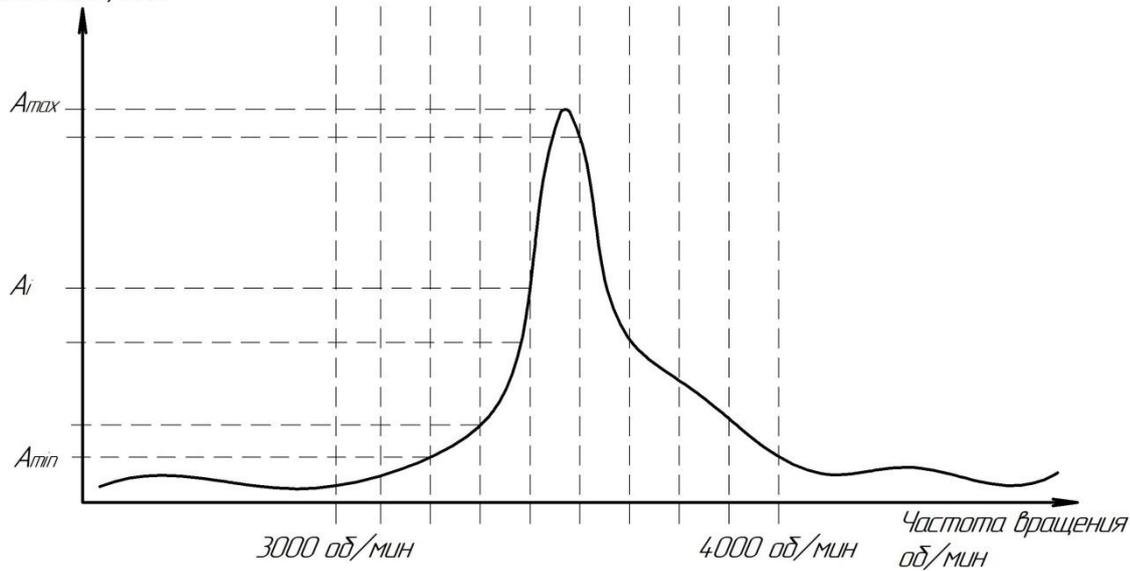


Рисунок 2 – Исследуемая частотная область

равных фактором станет поле, на 5 гом 0.2Т. оличество ительном вит 50

й
стоять из трех этапов. На первом этапе

путем сканирования расчетной области будут

определены положения равновесия, которые можно охарактеризовать наличием вертикальной проекции реакции, равной весу ротора, приходящемуся на данную опору, и нулевой горизонтальной проекции реакции смазочного слоя. Реакции смазочного слоя вычисляются следующим образом:

$$R_x = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \cos\left(\frac{x}{r}\right) dx dz, \quad (1)$$

$$R_y = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \sin\left(\frac{x}{r}\right) dx dz.$$

Вторым этапом исследований станет линеаризация реакции смазочного слоя в окрестностях положения подвижного равновесия и определение динамических коэффициентов. Стандартным методом разложения реакции подшипника в окрестностях точки равновесия в ряд Тейлора получаем:

$$R_x = R_{x0} + K_{xx} \Delta X + K_{xy} \Delta Y + B_{xx} \Delta \dot{X} + B_{xy} \Delta \dot{Y}, \quad (2)$$

$$R_y = R_{y0} + K_{yx} \Delta X + K_{yy} \Delta Y + B_{yx} \Delta \dot{X} + B_{yy} \Delta \dot{Y}.$$

Коэффициенты в данных выражениях являются частными производными и определяются следующим образом:

$$K_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$B_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial \dot{x}_j}.$$

На основе полученных динамических коэффициентов будут определены траектории движения ротора и собственные частоты колебаний ротора по алгоритму, описанному в работе [12]. В итоге планируется скорректировать данные по собственным частотам колебаний ротора, а именно тезис об изменении собственной частоты ротора, которое возникает из-за увеличения жесткости опоры. Результаты [12] показывают, что при магнитном поле 1Т первая критическая частота перемещается с 56 Гц до 63 Гц (рисунок 4).

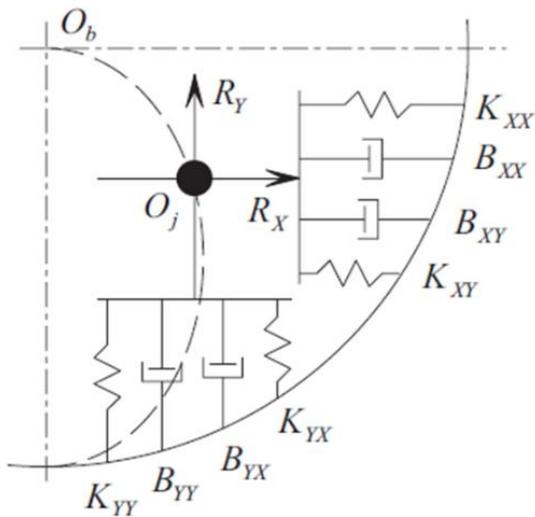


Рисунок 3 – Динамические коэффициенты подшипника скольжения

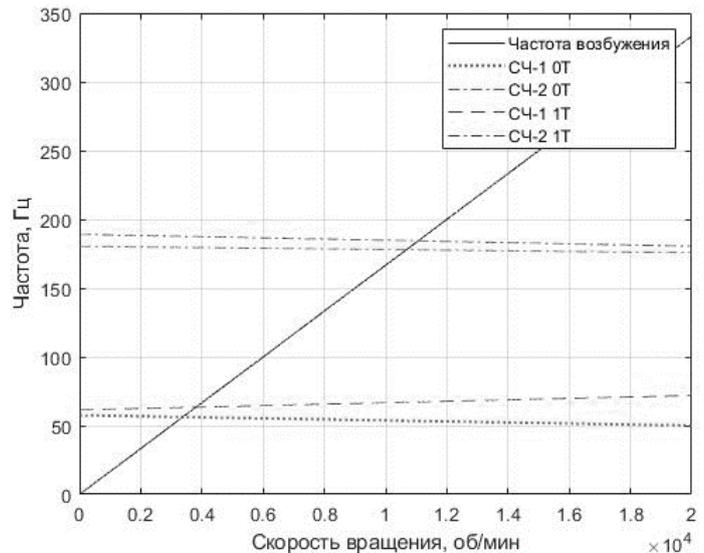


Рисунок 4 – Диаграмма Кэмпбелла

Второй гипотезой, проверяемой, в данном вычислительном эксперименте является уменьшение амплитуды колебаний в области резонансной частоты, что должно быть следствием увеличения демпфирования смазочного слоя подшипника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90259.

Список литературы

1. Xiaohu Wang. Dynamic characteristics of magnetorheological fluid lubricated journal bearing and its application to rotor vibration control / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Ming Li, Huiyu Bai, Guang Meng, Hua Zhang // jve international ltd. journal of vibroengineering. - 2015. – Vol.17 (4). – P. 1912-1927.
2. Dimitrios A. Bompos CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2011. - Vol.19. – P. 1035–1060.
3. Paras Ram. Ferrofluid lubrication in porous inclined slider bearing / Paras Ram // Indian Journal of Pure and Applied Mathematics. - 1999. – Vol. 30 (12). - P.1273-1281.
4. Dimitrios A. Bompos Rotordynamic analysis of a shaft using magnetorheological and nanomagnetorheological fluid journal bearings / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Tribology Transactions. – 2016. - Vol. 59. – P. 108 – 118. DOI 10.1080/10402004.2015.1050137.
5. H. Urreta. Hydrodynamic bearing lubricated with magnetic fluids / H Urreta, Z Leicht, A Sanchez, A Agirre, P Kuzhir and G Magnac // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. - Vol.149. – P.5. DOI:10.1088/1742-6596/149/1/012113.
6. Wojciech Horak. The analysis of the working conditions of a thrust squeeze bearing with a magnetorheological fluid operating in the oscillatory compression mode / Wojciech Horak, Marcin Szczęch // Tribologia. – 2019. - Vol.3. – P. 45-50
7. Xiaohu Wang. Rotordynamic coefficients of a controllable magnetorheological fluid lubricated floating ring bearing / Xiaohu Wang, Hongguang Li*, Guang Meng // Tribology International. – 2017. - Vol.114. – P. 1–14
8. Xiaohu Wang. Stiffness and Damping Properties of (Semi) Floating Ring Bearing Using Magnetorheological Fluids as Lubricant / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Wen Lu, Guang Meng // Journal of Tribology. – 2017. - Vol. 139. – P. 11.
9. Dimitrios A. Bompos Journal Bearing Stiffness and Damping Coefficients Using Nanomagnetorheological Fluids and Stability Analysis / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Journal of Tribology. – 2014. - Vol. 136. – P.9.

10. K.P. Gertzos. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant / K.P. Gertzos, P.G. Nikolakopoulos, C.A. Papadopoulos // Tribol.Int. – 2008. - Vol.41. – P. 1190–1204.
11. Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В. Динамические характеристики комбинированной опоры с многолепестковым газодинамическим подшипником скольжения и активным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – №1(333). – 2019. – С. 66-72.
12. Фетисов А.С. Мехатронный подшипник скольжения, смазываемый магнитореологической жидкостью / Сборник трудов Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем – 2021». – 9 с.
13. Фетисов, А.С. Траектории ротора на магнитореологических опорах скольжения / А.С. Фетисов / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2021. - № 6 (350). – 6 с.

Фетисов Александр Сергеевич. ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел. Младший научный сотрудник ПНИЛ «Интеллектуальные технологии мониторинга и диагностики энергогенерирующего оборудования» E-mail: fetisov57rus@mail.ru

UDC 62-13

RESEARCH OF THE ROTOR NATURAL FREQUENCIES ON JOURNAL BEARINGS LUBRICATED BY MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

Fetisov A.S.

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

The article presents the stages of the study of the influence of the applied magnetic field and the rotor speed on the integral and dynamic characteristics of the rotor system on sliding bearings lubricated by a magnetorheological fluid in the region of the first critical frequency. The main calculation ratios are given. Hypotheses are given that are tested in the course of this computational experiment.

Key words: rotor system, critical frequency, moving equilibrium position, dynamic coefficients

Bibliography

1. Xiaohu Wang. Dynamic characteristics of magnetorheological fluid lubricated journal bearing and its application to rotor vibration control / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Ming Li, Huiyu Bai, Guang Meng, Hua Zhang // jve international ltd. journal of vibroengineering. - 2015. – Vol.17 (4). – P. 1912-1927.
2. Dimitrios A. Bompos CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2011. - Vol.19. – P. 1035–1060.
3. Paras Ram. Ferrofluid lubrication in porous inclined slider bearing / Paras Ram // Indian Journal of Pure and Applied Mathematics. - 1999. – Vol. 30 (12). - P.1273-1281.
4. Dimitrios A. Bompos Rotordynamic analysis of a shaft using magnetorheological and nanomagnetorheological fluid journal bearings / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Tribology Transactions. – 2016. - Vol. 59. – P. 108 – 118. DOI 10.1080/10402004.2015.1050137.
5. H. Urreta. Hydrodynamic bearing lubricated with magnetic fluids / H Urreta, Z Leicht, A Sanchez, A Agirre, P Kuzhir and G Magnac // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. - Vol.149. – P.5. DOI:10.1088/1742-6596/149/1/012113.
6. Wojciech Horak. The analysis of the working conditions of a thrust squeeze bearing with a magnetorheological fluid operating in the oscillatory compression mode / Wojciech Horak, Marcin Szczech // Tribologia. – 2019. - Vol.3. – P. 45-50
7. Xiaohu Wang. Rotordynamic coefficients of a controllable magnetorheological fluid lubricated floating ring bearing / Xiaohu Wang, Hongguang Li*, Guang Meng // Tribology International. – 2017. - Vol.114. – P. 1–14
8. Xiaohu Wang. Stiffness and Damping Properties of (Semi) Floating Ring Bearing Using Magnetorheological Fluids as Lubricant / Xiaohu Wang, Hongguang Li, Wen Lu, Guang Meng // Journal of Tribology. – 2017. - Vol. 139. – P. 11.
9. Dimitrios A. Bompos Journal Bearing Stiffness and Damping Coefficients Using Nanomagnetorheological Fluids and Stability Analysis / Dimitrios A. Bompos, Pantelis G. Nikolakopoulos // Journal of Tribology. – 2014. - Vol. 136. – P.9.

10.K.P. Gertzos. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant / K.P. Gertzos, P.G. Nikolakopoulos, C.A. Papadopoulos // Tribol.Int. – 2008. - Vol.41. – P. 1190–1204.

11.Bondarenko M.E., Polyakov R.N., Gorin A.V. Dinamicheskiye kharakteristiki kombinirovannoy opory s mnogolepestkovym gazodinamicheskim podshipnikom skol'zheniya i aktivnym upravleniyem // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – №1(333). – 2019. – S. 66-72.

12.Fetisov A.S. Mekhatronnyy podshipnik skol'zheniya, smazyvayemyy magnitoreologicheskoy zhidkost'yu / Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Mekhanika i tribologiya transportnykh sistem – 2021». – 9 s.

13.Fetisov, A.S. Trayektorii rotora na magnitoreologicheskikh oporakh skol'zheniya / A.S. Fetisov / Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. - 2021. - № 6 (350). – 6 s

Fetisov Alexander Sergeevich. Orel State University, Junior Researcher, PNIL "Intelligent technologies for monitoring and diagnostics of power generating equipment" E-mail: fetisov57rus@mail.ru

УДК 62-19

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРНО-ОПОРНОГО УЗЛА МИКРОТУРБИНЫ

Поляков Р.Н., Горин А.В.,Бондаренко М.Э., Родичева И.В.
Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева

В работе кратко изложено современное состояние систем распределенной энергетики. Основным рабочим агрегатом данного типа систем выступают микротурбинные установки малой мощности. Представлены одномассовая и двухмассовая модели микротурбинного агрегата. Получены диаграммы осевых колебаний ротора. В модели учтены массы ротора и упругих элементов, приведены результаты моделирования при гармоническом и импульсном возбуждении.

Ключевые слова: ротор, модель, динамика, подшипниковый узел, микротурбина.

Турбоагрегаты малой мощности являются ключевым звеном в системе распределенной энергетики. Такие турбоагрегаты обеспечивают электрической и тепловой энергией объекты инфраструктуры в административных образованиях. Примером указанных турбоагрегатов являются микротурбины. Микротурбинные агрегаты применяются в тех случаях, когда необходим работоспособный, с большим ресурсом, универсальный, автономный источник электроснабжения. Такой источник требует незначительных капиталовложений при эксплуатации и обслуживании (рисунок 1). Паротурбинные энерго-

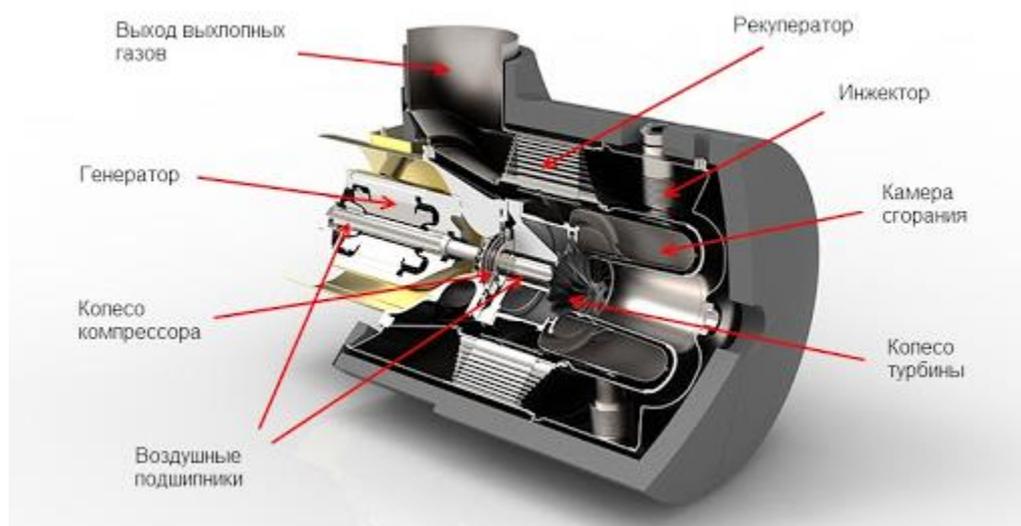


Рисунок 1 – Микротурбогенератор Capstone C65 (65 кВт)

установки признаны наиболее эффективными, обладающими высокими эксплуатационными и экономическими характеристиками в процессе создания тепла и электроэнергии для потребителей [1].

Самой ответственной частью в данных микротурбинных установках является роторно-опорный узел. На подшипниковые узлы приходится более 50% причин поломок и уменьшения производительности. Горизонтальное исполнение микротурбины является классическим. Однако за прошедшее время стали появляться и вертикальные турбины. Как в газовых, так и в паровых турбоагрегатах применяются опоры, воспринимающие осевые нагрузки. Режимы пуска, останова и переходные режимы регламентируют динамические характеристики микротурбин. Процесс исследования динамики микротурбин, направлен на рассмотрение колебательных процессов роторно-опорных узлов турбин. Особое внимание заслуживает исследование и определение критических режимов работы турбоагрегатов. Работа в критических областях производится с учетом минимальной амплитуды и воздействия вибраций на конструкцию микротурбины [2, 3].

Состояние микротурбины, с динамической точки зрения, описывается спектром собственных частот колебаний, вибрационным воздействием на статор, амплитудными значениями колебаний ротора. В дополнении, силовые факторы и знакопеременные напряжения, воздействующие на конструктивные элементы турбоагрегата регламентируются жесткостью и диссипацию колебаний в роторно-опорных узлах [4]. Основными причинами возникновения. Осевые воздействия в турбоагрегатах возникают в основном вследствие конструктивных факторов и факторов, определенных колебаниями теплофизических значений рабочего тела (газа) при разных режимах работы [5].

В рамках данной работы было произведено моделирование динамики ротора на опорах скольжения. Ротор состоит из вала, имеющего 6 секций различных диаметров, и 2 точек приложения масс (диски).

Результаты моделирования основывались на расчетах интегральных характеристик упорного подшипника скольжения, смазываемого рабочей жидкостью. На основе рассчитанных реакций смазочного слоя методом сканирования области зазора подшипника скольжения были определены положения, характеризующие отсутствием горизонтальной проекции реакции и вертикальной проекцией реакции, значение которой равно весу, приходящемуся на опору. Данные точки можно считать точками подвижного равновесия.

Предполагалось, что исходная расчетная система выглядит как жесткий вращающийся вал. Его масса равна m . Вращающийся вал базируется на газодинамической упорной опоре. Опорный узел характеризуется упругодемпфирующими свойствами (c, b). В этом случае дифференциальные уравнения, описывающие движения одномассовой динамической модели представляются в следующем виде:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = -mg + R_g(\dot{z}, w) + F(t); \\ \rho\delta \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = p(x, y); \end{cases} \quad (1)$$

где R_g – реакция газового слоя; g – ускорение силы тяжести; z – изменение положения ротора; δ – толщина лепестка; w – перемещение при поперечном изгибе лепестка, D – цилиндрическая жесткость пластины, $F(t)$ – вибрационная нагрузка.

Дифференциальное зависимость движения одномассовой динамической системы в дифференциальном виде (рисунок 2,а) представляется как:

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F(t) \quad (2)$$

Представленная выше динамическую модель достаточно легко сводится к двухмассовой системе. В этом случае в модели производится учет массы комплекта лепестков. Тогда система дифференциальных уравнений описывающих движение двухмассовой динамической модели (рисунок 2,б) представляется в следующем виде:

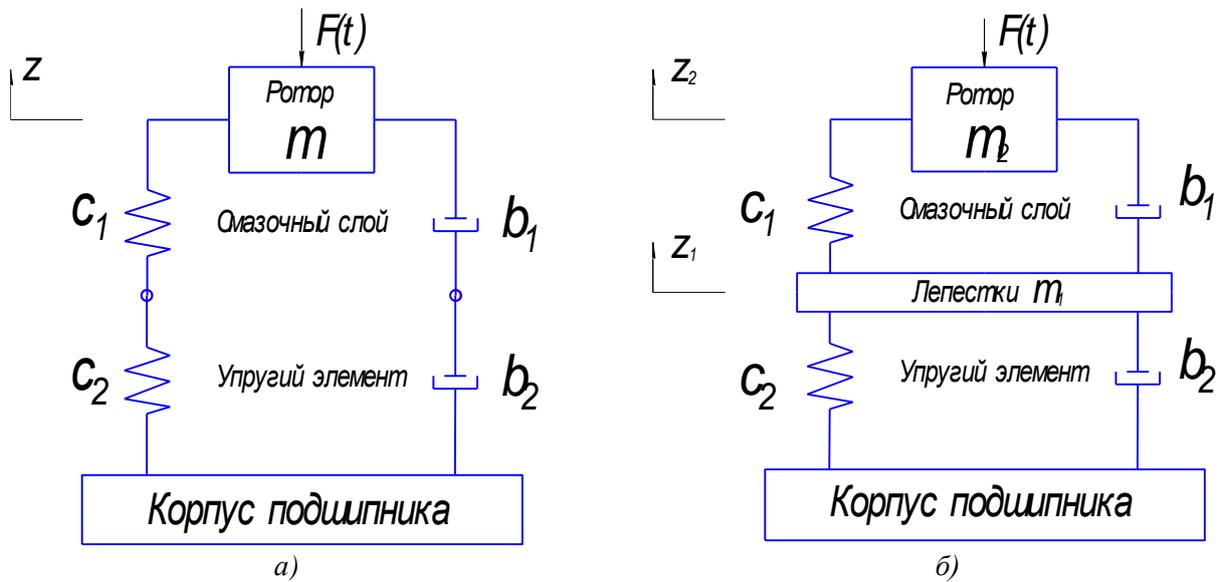


Рисунок 2 - Модели микротурбинного агрегата
 а) одномассовая модель; б) двухмассовая модель

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + B_1 \dot{z}_1 + B_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + C_1 z_1 + C_2 (z_1 - z_2) = 0, \\ m_2 \ddot{z}_2 + B_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + C_2 (z_2 - z_1) = F(t) \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) рационально решать в среде MATLAB. Получение результата обеспечивается применением функции ode23t, интегрированной в пакет программы. Наиболее характерные диаграммы колебаний ротора и лепестков при гармоническом и импульсном воздействии на систему приведены на рисунках 3 и 4.

Проанализировав диаграммы амплитудно-частотных характеристик одномассовой (рисунок 3) и двухмассовой (рисунок 4) моделей микротурбинного агрегата при воздействии по гармоническому закону выявил сходное поведение рассматриваемых систем. При этом системы обладают одинаковыми геометрическими и рабочими параметрами.

Основываясь на приведенном выше материале можно констатировать следующее;

- на ротор находящийся в упорных газодинамических подшипниках и его динамику влияет сочетание внешних сил нестационарного характера и реакций подшипникового узла;
- анализ возможных траекторий движения ротора под воздействием такой системы сил позволяет. Оценить рабочие и конструктивные параметры микротурбины и всей турбомашины, возможно при анализе траекторий движения вращающегося вала как на этапе проектирования, так же при принятии рационального решения на этапе эксплуатации.

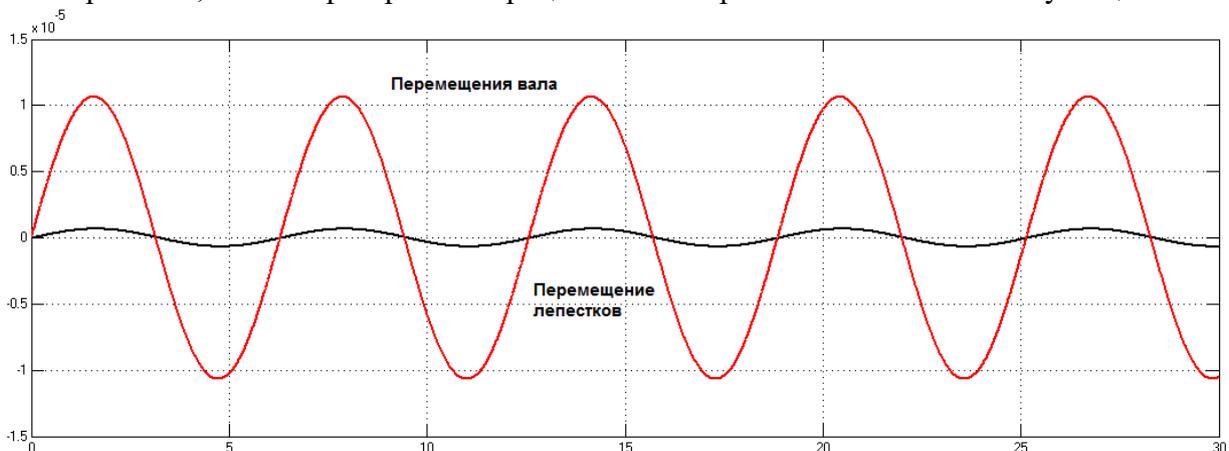


Рисунок 3 – Диаграмма осевых колебаний ротора и лепестков при гармоническом возбуждении двухмассовой системы

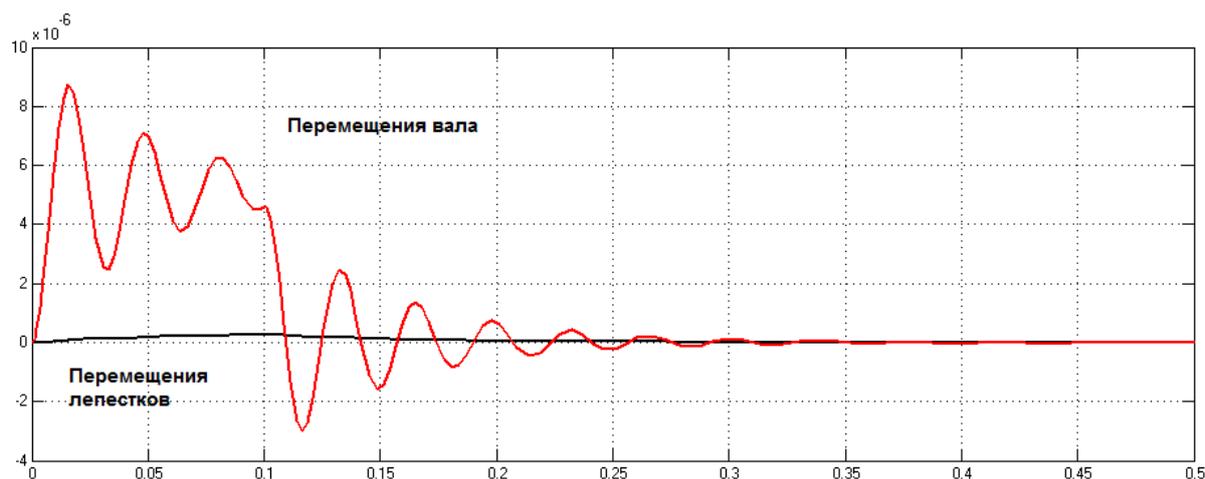


Рисунок 4 – Диаграмма осевых колебаний ротора и лепестков при возбуждении двухмассовой системы импульсной силой

Выше представленные материалы получены при работе над проектом в рамках Постановления Правительства РФ №218 «Создание цифровой системы мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния технического оборудования с применением технологии искусственного интеллекта на базе отечественных аппаратных и программных средств», договор совместно с ЗАО «Электропривод и Силовая электроника» №4869-2081.

Список литературы

1. Гиршфельд В.Я. Режимы работы и эксплуатации ТЭС: Учебник для вузов. - М.: Энергия, 1980. – 288 с.
2. Горшков А.С. Техничко - экономические показатели тепловых электрических станций. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1974. – 240 с.
3. НТЦ «Микротурбинные технологии» Обзор и состояние развития со-временных газотурбинных установок малой мощности. [Электронныйресурс].–Режимдоступа: <http://stc-mtt.ru/publication>.
4. Creating a Turbomachinery Revolution. NASA Facts.National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center.Cleveland, Ohio 44135-3191 FS-2001-07-014-GRC. Research at Glenn Enables an Oil-Free Turbine Engine. FS-2001-07-014-GRC. 2001.
5. Elliott Energy Systems, Inc.2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449.www.tapower.com. Rick Lucas – Sales Engineer. January 17, 2003.

Поляков Роман Николаевич, д-р.техн. наук, доцент, заведующий кафедрой мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: romanpolak@mail.ru,

Горин Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: gorin57@mail.ru

Бондаренко Максим Эдуардович, старший преподаватель ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Родичева Ирина Владимировна, студент ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: rodfox@yandex.ru.

УДК 62-19

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES WHEN DESIGNING UNMANNED AIRCRAFT FOR VICTIM EVACUATION

*Polyakov R.N., Gorin A.V., Bondarenko M.E., Rodicheva I.V.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev*

The paper briefly describes the current state of distributed energy systems, which acts as a leading supplier of electric and thermal energy to small cities, towns and villages, industrial enterprises, livestock farms, etc. The main working unit of this type of systems is low-power microturbine installations. For these types of installations, the most critical and critical part is the rotor-bearing assembly. The article discusses a dynamic two-mass model of a rotor-

bearing assembly including a rotor and a thrust paddle bearing. The masses of the rotor and elastic elements are taken into account in the model, and the simulation results are given for harmonic and pulse excitation.

Keywords: rotor, model, dynamics, bearing assembly, microturbine.

Bibliography

1. Girshfeld V.Ya. Modes of operation and operation of TPPs: Textbook for universities. - M.: Energiya, 1980.- 288 p.
2. Gorshkov A.S. Technical and economic indicators of thermal power plants. Ed. 2nd, rev. and add. - M.: Energiya, 1974.- 240 p.
3. STC "Microturbine Technologies" Review and state of development of modern low-power gas turbine plants. [Electronic resource]. - Access mode: <http://stc-mtt.ru/publication>.
4. Creating a Turbomachinery Revolution. NASA Facts. National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center. Cleveland, Ohio 44135-3191 FS-2001-07-014-GRC. Research at Glenn Enables an Oil-Free Turbine Engine. FS-2001-07-014-GRC. 2001.
5. Elliott Energy Systems, Inc. 2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449. www.tapower.com. Rick Lucas – Sales Engineer. January 17, 2003.

Polyakov Roman Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics OSU named after I.S. Turgenev, e-mail: romanpolak@mail.ru

Gorin Andrei Vladivirovich, associate professor of the department Mechatronics, Mechanics and Robotics, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: gorin57@mail.ru

Bondarenko Maxim Eduardovich, associate professor of the department Mechatronics, Mechanics and Robotics, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Rodicheva Irina Vladimirovna, student Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: rodfox@yandex.ru

УДК 519.688, 62-79

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

Стебаков И.Н., Корнаев А.В., Корнаева Е.П.
Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева

В статье рассматривается применение методов машинного обучения для диагностики неисправностей роторных систем. Изучаются шесть состояний вращающейся машины, включая нормальное состояние. Оценивается применение глубоких сетевых архитектур, включая многослойные перцептроны, сверточные нейронные сети, остаточные сети и автокодеры, а также их комбинации. В результате полученная точность обнаружения неисправностей составляет 83,3%.

Ключевые слова: роторная система, подшипник жидкостного трения, диагностика неисправностей, измерения, машинное обучение, искусственная нейронная сеть.

Подшипники являются важнейшими элементами вращающихся машин. Большинство исследователей занимается подшипниками качения. В настоящее время активно развиваются методы диагностики неисправностей на основе машинного обучения. Одна из самых распространенных задач – обнаружение аномалий. Это позволяет находить редкие события, выбросы, отклонения в данных на основе отклонений от нормы. Основным методом заключается в применении модели распределения Гаусса [1, 2]. Метод показывает хорошие результаты при небольшом количестве входных данных. Другой подход к проблеме обнаружения аномалий – применение автоэнкодеров (АЕ). Этот подход может быть реализован на основе многослойного перцептрона (MLP) [3, 4]. АЕ на основе сверточных нейронных сетей (CNN) используются для обнаружения аномалий на изображениях [5, 6]. Сеть. Другим применением АЕ может быть извлечение признаков и фильтрация данных [7, 8]. Классификация для обнаружения дефектов - более сложная задача. В этой области широко используются сети MLP [9]. Если данные могут быть представлены в виде изображений,

рекомендуется использовать двумерные CNN [10]. Одномерные CNN применимы при обработке временных рядов [11, 12].

Данная статья посвящена применению машинного обучения для диагностики неисправностей роторных систем с подшипниками жидкостного трения. Основные проблемы связаны со слабым влиянием наблюдаемых дефектов на результаты измерений и переобучением при обучении искусственных нейронных сетей.

Экспериментальная установка представляет собой роторную систему на подшипниках жидкостного трения с мультисенсорной системой измерения [13, 14]. Фотография экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Используется бронзовый подшипник с шириной 20 мм и с диаметром 40,2 мм. Подшипник смазывается водой. Расход в подшипнике измеряется расходомером YF-S201 и регулируется сервоклапаном Burkert 2835. Полный вал массой 0,6 кг соединен с электродвигателем с помощью зубчатой муфты. Длина вала 380 мм, диаметр 40 мм. Смещения вала измеряются бесконтактными датчиками AE051.00.07.

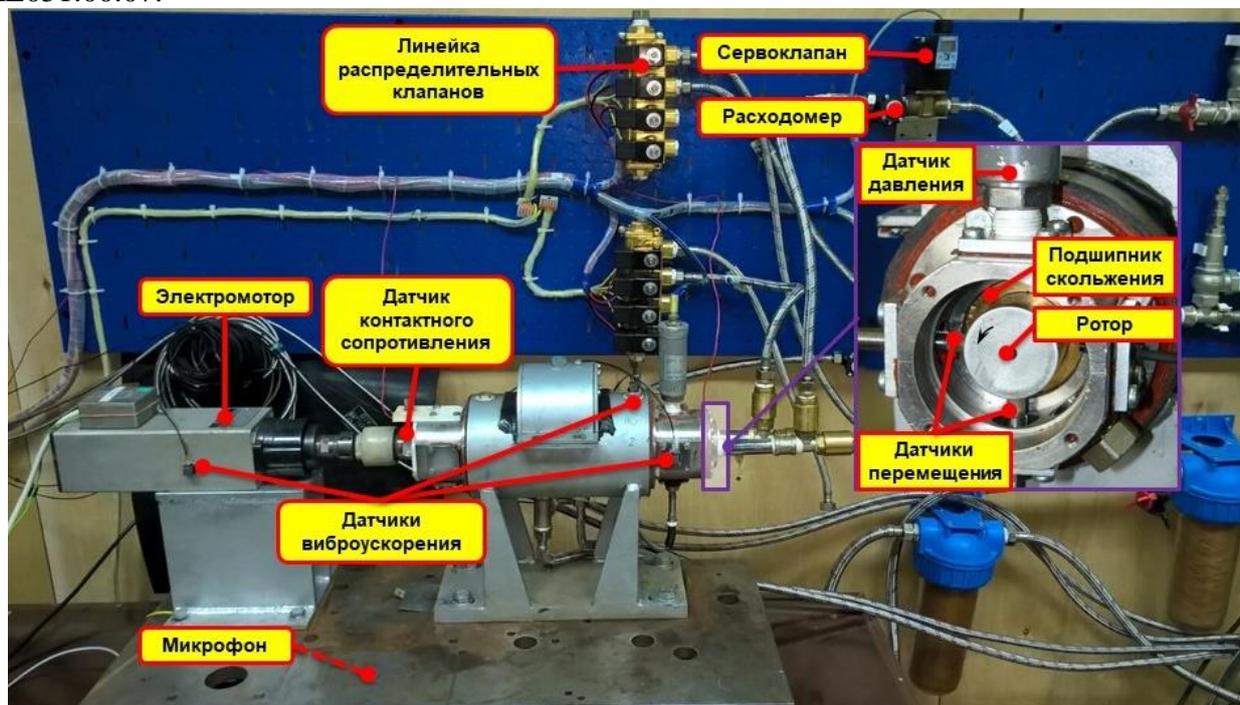


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

Модули NationalInstrumentsNI 9269 и NI 9205 используются как преобразователи для систем управления и измерения соответственно. Модуль аналогового вывода NI 9269 используется для управления скоростью вала и скоростью потока в подшипнике. Данные, полученные от модуля аналогового ввода NI 9205, используются для сбора данных. Данные, полученные от контактного датчика сопротивления [15], датчика давления KPT5-3, бесконтактных датчиков AE051.00.07 и преобразователя частоты электродвигателя ALTIVAR 312, составляют половину набора данных для машинного обучения. Другая часть данных поступает с микрофона 4192-L-001 и виброакселерометров 4507-001 портативного блока сбора данных Briel&KjaerPULSEType 3560 C.

В ходе эксперимента изучались 6 состояний: дефекты отсутствуют (состояние 1), ослаблен болт станины подшипника (состояние 2), ослаблено 2 болта станины подшипника (состояние 3), ослаблен болт крепления двигателя (состояние 4), установлен дисбаланс (состояние 5), комбинация 2 и 4 состояния (состояние 6). В результате эксперимента были получены данные мультисенсорных измерений для 60 опытов, по 10 опытов для каждого состояния. Каждый опыт включал, 1200 фрагментов быстрого преобразования Фурье размером 400 для микрофона и виброакселерометров, подключенных к Briel&Kjaer, и временные ряды из 120000 измерений для остальных датчиков, подключенных к шасси NI.

Для последующего обучения нейросетей с помощью датчиков во временной области были взяты 1200 фрагментов по 400 измерений в случайные моменты времени из каждого опыта. Для датчиков виброускорения и микрофона были использованы все доступные данные. На рисунке 2 показаны примеры измерений. Набор данных был разделен на 3 части в соотношении 0,7: 0,2: 0,1 для обучения, валидации и тестирования соответственно. Данные были нормализованы.

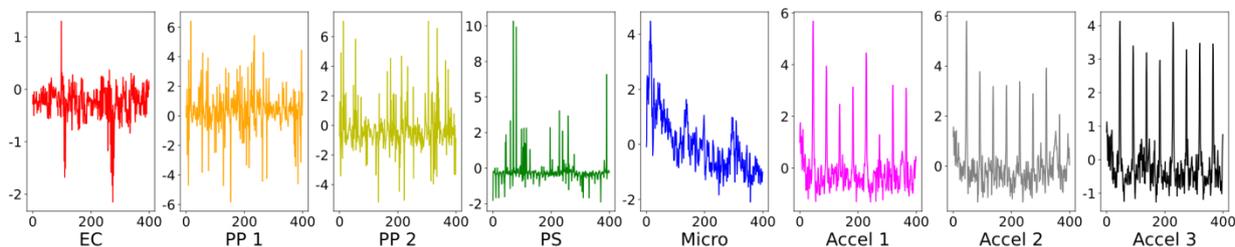


Рисунок 2 – Примеры измерений

MLP, представленный на рисунке 3, является основной моделью для классификации дефектов. При обучении варьировались следующие гиперпараметры сети: количество скрытых слоев (1, 2 или 4) и их размер (4, 8, 16 и 32 нейрона). В модели используются слои BatchNormalization. Коэффициент смещения используется только в выходном слое. В данной модели каждый выходной нейрон соответствует рассмотренным ранее классам.

Автоэнкодер на основе одномерной сверточной нейронной сети (1dCNNAE) с

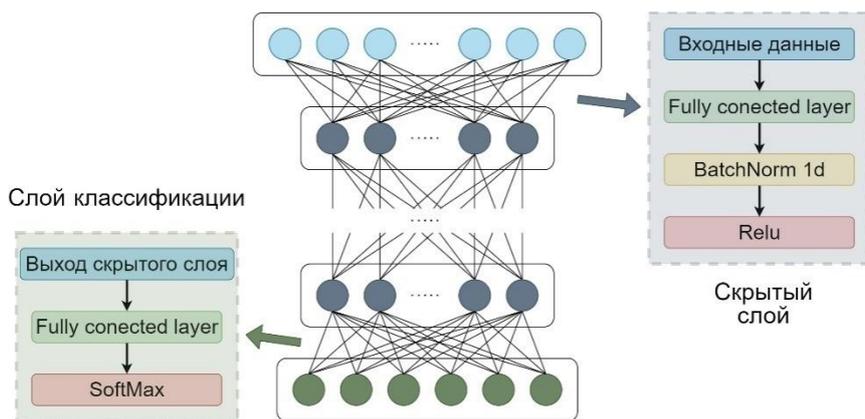


Рисунок 3 – Архитектура многослойного перцептрона

длиной 400 элементов. В сети используются сверточные и транспонированные сверточные слои. Параметр шага в слоях сети равен 2. Слои MaxPooling и Upsampling уменьшают и увеличивают карты функций в 2 раза соответственно. Параметр padding обеспечивает правильный размер выходного слоя сети. Используются слои BatchNormalization. При обучении варьировались следующие гиперпараметры сети: количество фильтров N в первом блоке кодера (1, 2 или 4 фильтра), размер фильтра (2, 4, 6 или 8). Коэффициент смещения используется только в выходном слое. Задача автоэнкодера – восстановить входные данные при их предварительном сжатии. Основываясь на гипотезе о том, что, обучая нейросеть на данных без дефектов, она не сможет с той же точностью восстановить данные с дефектами, ошибка восстановления данных является критерием для поиска аномалий.

Предварительный анализ показал, что более информативными для диагностики являются измерения датчиков виброускорения и микрофона, которые использовались для дальнейшего обучения нейросетей.

1d CNN AE была обучена для поиска аномалий, а затем дообучалась на всех данных. Далее ее энкодер использовался совместно с MLP классификации дефектов. Такой подход позволил добиться увеличения точности в сравнении и MLP, который принимает на вход не обработанные данные. Дополнительного увеличения точности удалось добиться при помощи

одномерным входным слоем из n каналов (количество каналов равно количеству используемых датчиков) использовался для обнаружения аномалий и выделения признаков. На рисунке 4 показана архитектура 1dCNNAE для случая, когда входной слой принимает измерения в виде 4 последовательностей

предсказаний по серии примеров. Р представлено сравнение результатов обуч подхода с рядом известных решений

Таким образом, для класси дефектов предложена архитектура CNN+MLP основанная на 1D CNN AE для поиска аномалий. Разработка архитектуры на 1D CNN обоснована тем, что это позволяет эффективно обрабатывать данные измерений, распределенные по каналам, а также извлекать признаки и сжимать данные для дальнейшей классификации дефектов. Разработанная архитектура 1D CNN AE имеет следующие особенности: сжатие данных происходит как в сверточн и в слоях MaxPooling, увеличение происходит в транспонированных сверточн помощью слоев UpSamplig, количест является гиперпараметром. Для к предобученный энкодер AE использовался как средство извлечения признаков.

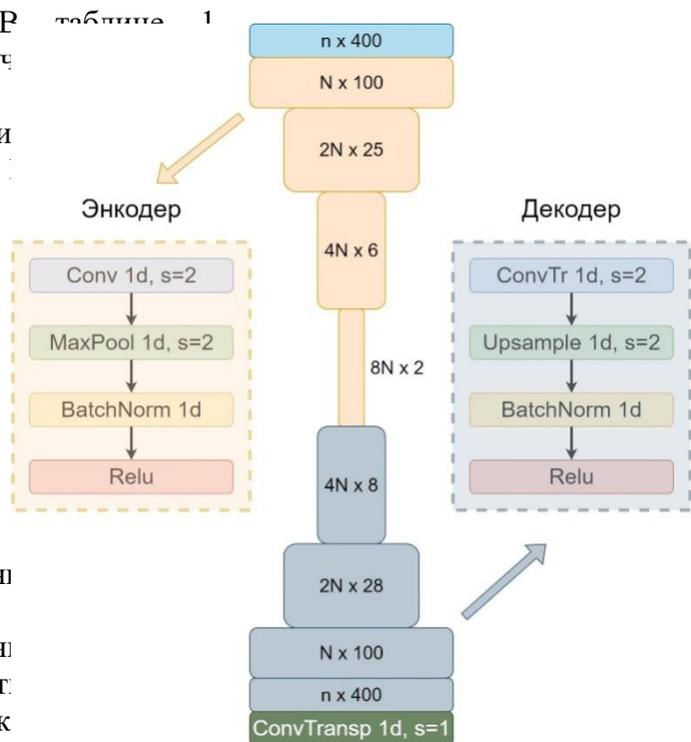


Рисунок 4 – Архитектура 1d CNN AE

Таблица 1 – Сравнение моделей

| Модель | Train accuracy | Val accuracy | Test accuracy |
|---|----------------|--------------|---------------|
| Случайный лес | 0.995 | 0.646 | 0.603 |
| LSTM+MLP | 0.97 | 0.638 | 0.668 |
| MLP | 0.987 | 0.79 | 0.801 |
| ResNet18 | 1.0 | 0.795 | 0.801 |
| 1d CNN+MLP | 0.936 | 0.846 | 0.8 |
| 1d CNN+MLP+предсказания по серии примеров | 0.972 | 0.916 | 0.833 |

АЭ при этом обучался сначала для поиска аномалий, а затем для восстановления данных всех классов. 1D CNN+MLP показал лучшую точность в сравнении с другими используемыми моделями. Одной из особенностей обучения лучшей модели была блокировка обучения энкодера. Для дополнительного увеличения точности были протестированы предсказания по серии сэмплов. В этом случае среднее по сэмплам предсказание является выходным. Данный подход позволил увеличить точность распознавания. Данный алгоритм позволит своевременно определять дефекты машин для предотвращения их полной поломки и изнашивания. Это позволит повысить показатели энергоэффективности и снизить финансовые издержки, связанные с ремонтом оборудования.

Работа подготовлена в рамках выполнения гранта Президента РФ №МД-129.2020.8. Авторы выражают благодарность фонду за оказанную поддержку. Также авторы выражают благодарность А.С. Фетисову и А.Ю. Родичеву за помощь в разработке экспериментальной установки.

Список литературы

1. An J., Ai P. Deep Domain Adaptation Model for Bearing Fault Diagnosis with Riemann Metric Correlation Alignment // Math. Probl. Eng. 2020. Т. 2020. № Mmd.

2. Babin A., Polyakov R. Imitation model of unbalanced rotor on fluid-film bearings // *Vibroengineering Procedia*. : JVE International, 2020. С. 38–44.
3. Cong T., Baranowski J. Binary Classifier for Fault Detection Based on Gaussian Model and PCA * // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Т. 51. № 24.С. 1317–1323.
4. Gauthama Raman M. R., Dong W., Mathur A. Deep autoencoders as anomaly detectors: Method and case study in a distributed water treatment plant // *Comput. Secur.* 2020. Т. 99. С. 102055.
5. Kazakov Y., Kornaev A., Polyakov R. Rotary Machines Diagnosis Systems Based on Feed Forward Neural Networks // *Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*. , 2020.
6. Kornaev A. V. и др. Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // *Tribol. Int.* 2021.Т. 160. С. 107027.
7. Kumar A. и др. Improved deep convolution neural network (CNN) for the identification of defects in the centrifugal pump using acoustic images // *Appl. Acoust.* 2020. Т. 167. С. 107399.
8. Li Y. и др. A novel feature extraction method based on discriminative graph regularized autoencoder for fault diagnosis // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Т. 52. № 24.С. 272–277.
9. Liu X. и др. Fault diagnosis of rotating machinery under noisy environment conditions based on a 1-D convolutional autoencoder and 1-D convolutional neural network // *Sensors (Switzerland)*. 2019. Т. 19. № 4.
10. Noori M. и др. Automatic fault detection in seismic data using Gaussian process regression // *J. Appl. Geophys.* 2019. Т. 163. С. 117–131.
11. Roelofs C. M. A. и др. Autoencoder-based anomaly root cause analysis for wind turbines // *Energy AI*. 2021. Т. 4. С. 100065.
12. Tsai D. M., Jen P. H. Autoencoder-based anomaly detection for surface defect inspection // *Adv. Eng. Informatics*. 2021. Т. 48. С. 101272.
13. Wang X., Mao D., Li X. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network // *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2021. Т. 173. С. 108518.
14. Yang Z. и др. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN // *Comput. Electr. Eng.* 2021. Т. 92. С. 107070.
15. Yu Q., Kavitha M., Kurita T. Autoencoder framework based on orthogonal projection constraints improves anomalies detection // *Neurocomputing*. 2021. Т. 450. С. 372–388.

Стебаков Иван Николаевич, аспирант ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: chester50796@yandex.ru, тел.: +79536180866

Корнаев Алексей Валерьевич, доктор техн. наук., профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: rusakor@inbox.ru, тел. +79534781591

Корнаева Елена Петровна, канд. физ. мат. наук., доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: lenoks_box@inbox.ru, тел. +79538173050

UDC 519.688, 62-79

INTELLIGENT DIAGNOSTICS OF ROTARY SYSTEMS FAILURES

Stebakov I.N., Kornaev A.V., Kornaeva E.P.

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

The paper deals with the application of machine learning methods to rotating machines fault diagnosis. The application of deep network architectures including multilayer perceptrons, convolutional neural networks, residual networks, and autoencoders and their combination is estimated. As the result the fault detection accuracy is 83.3%

Keywords: rotating machine, fluid-film bearing, fault diagnosis, measurements, machine learning, artificial neural network.

Bibliography

1. Cong T., Baranowski J. Binary Classifier for Fault Detection Based on Gaussian Model and PCA * // *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 51, № 24. P. 1317–1323.
2. Noori M. et al. Automatic fault detection in seismic data using Gaussian process regression // *J. Appl. Geophys.* Elsevier B.V., 2019. Vol. 163. P. 117–131.
3. Roelofs C.M.A. et al. Autoencoder-based anomaly root cause analysis for wind turbines // *Energy AI*. Elsevier BV, 2021. Vol. 4. P. 100065.
4. Gauthama Raman M.R., Dong W., Mathur A. Deep autoencoders as anomaly detectors: Method and

- case study in a distributed water treatment plant // *Comput. Secur.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 99. P. 102055.
5. Tsai D.M., Jen P.H. Autoencoder-based anomaly detection for surface defect inspection // *Adv. Eng. Informatics.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 48. P. 101272.
 6. Yu Q., Kavitha M., Kurita T. Autoencoder framework based on orthogonal projection constraints improves anomalies detection // *Neurocomputing.* Elsevier BV, 2021. Vol. 450. P. 372–388.
 7. Liu X. et al. Fault diagnosis of rotating machinery under noisy environment conditions based on a 1-D convolutional autoencoder and 1-D convolutional neural network // *Sensors (Switzerland).* 2019. Vol. 19, № 4.
 8. Li Y. et al. A novel feature extraction method based on discriminative graph regularized autoencoder for fault diagnosis // *IFAC-PapersOnLine.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 52, № 24. P. 272–277.
 9. Yang Z. et al. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN // *Comput. Electr. Eng.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 92. P. 107070.
 10. Kumar A. et al. Improved deep convolution neural network (CNN) for the identification of defects in the centrifugal pump using acoustic images // *Appl. Acoust.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 167. P. 107399.
 11. Wang X., Mao D., Li X. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network // *Meas. J. Int. Meas. Confed.* Elsevier B.V., 2021. Vol. 173. P. 108518.
 12. An J., Ai P. Deep Domain Adaptation Model for Bearing Fault Diagnosis with Riemann Metric Correlation Alignment // *Math. Probl. Eng.* 2020. Vol. 2020, № Mmd.
 13. Kornaev A. V. et al. Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // *Tribol. Int.* Elsevier BV, 2021. Vol. 160. P. 107027.
 14. Babin A., Polyakov R. Imitation model of unbalanced rotor on fluid-film bearings // *Vibroengineering Procedia.* JVE International, 2020. Vol. 32. P. 38–44.
 15. Kazakov Y., Kornaev A., Polyakov R. Rotary Machines Diagnosis Systems Based on Feed Forward Neural Networks // *Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020.* 2020.

Stebakov Ivan Nikolaevich, graduate student Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: chester50796@yandex.ru, tel.: +79536180866

Kornaev Alexey Valerievich, Doctor of Sciences, Professor at the Department of Mechatronics, Mechanics, and Robotics Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: rusakor@inbox.ru, tel. +79534781591

Kornaeva Elena Petrovna, Candidate of Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Digital Technologies, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: lenoks_box@inbox.ru, tel. +79538173050

УДК 62-543.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Казakov Ю.Н., Корнаев А.В., Савин Л.А., Шутин Д.В.

Россия, г. Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ)

В работе рассмотрено моделирование роторов как твердотельных моделей. Представлены способы расчета реакций смазочного слоя для подшипников жидкостного трения. Приведено сравнение модели с реальными результатами. Рассмотрено применение классических и интеллектуальных систем управления в активных опорах жидкостного трения.

Ключевые слова: управляемые опоры жидкостного трения, конические подшипники жидкостного трения, опоры с многозонной подачей жидкости, моделирование опор жидкостного трения, ПИ-контроллер, классические системы управления, DQN-agent.

Сегодня все больше стали набирать популярность опоры с активным управлением. Существует несколько наиболее популярных видов таких опор: опоры со встраиваемыми элементами для изменения геометрии зазора в подшипнике, опоры в которых используются активные элементы оказывающие воздействие на ротор для смещения его в подшипнике, опоры в которых регулирование происходит за счет изменения давления подачи и д.р. В качестве систем управления в таких опорах применяют классические системы, такие как ПИ,

ПД и ПИД регуляторы. Большое количество работ в данной области направлены на их математическое и симуляционное моделирование [1-5].

При моделировании роторных машин как сложных систем из-за сложной структуры и использования систем управления необходимо чтобы модель как можно больше соответствовала реальному объекту. Для этого можно использовать ряд методов и программных комплексов. При моделировании объектов как твердотельных моделей широко распространено использование программного комплекса MATLAB/Simulink. В данном аппарате решается большое количество задач. Также он может использоваться при моделировании роторных систем.

Для моделирования объектов в среде Simulink используют 3D-модели объектов, разработанные в различных комплексах, что позволяет воспроизвести геометрию и распределение массы реального объекта. После 3D-модель загружается в среду, где на ее звенья накладываются связи при необходимости [6]. Моделирование роторных систем таким способом показывает достаточно хорошие результаты. Существует несколько подходов к способу задания реакций смазочного слоя. Первый заключается в поиске точки равновесия ротора и определения коэффициентов жесткости и демпфирования. Второй способ заключается в аппроксимации сил реакций смазочного слоя искусственными нейронными сетями, что значительно увеличивает скорость работы модели, но может приводить к появлению погрешности, если модель будет работать за пределами обучения [7].

Использование первого способа показало хорошие результаты при моделировании опоры с многозонной подачей жидкости. Такая концепция позволяет получать результаты качественно схожие с реальными, что подтверждается экспериментами [8]. В связи с этим появляется такая возможность как разработка и тестирование систем управления на моделях перед их использованием на реальных объектах. Это значительно сказывается при использовании систем управления основанных на методах глубокого обучения. В работе [9] представлена модель ротора с многозонной подачей жидкости (рисунок 1). В качестве контроллера выступает DQN-agent. Задачей контроллера являлось минимизировать амплитуды колебаний ротора при переходе через критические частоты.

На вход агенту подаются 3 параметра: параметры наблюдения, награда, прерывание. В качестве параметров наблюдения были выбраны значения координат центра ротора в подшипнике $X1$ и $X2$, скоростей колебаний $V1$ и $V2$, а также значение вращающего момента необходимого на вращение вала двигателя с заданной скоростью.

В результате обучения системы агент научился генерировать управляющие воздействия для уменьшения пикового значения колебаний, а также избегал, попадание в резонансные частоты. Графические результаты представлены на рисунке 2.

Использование искусственных нейронных сетей для аппроксимации смазочного слоя позволяет моделировать конические опоры с учетом возможных колебаний и смещений в осевом направлении. Использование данного эффекта в реальных роторных машинах позволяет изменять характер колебаний ротора, а также регулировать показания момента трения в опоре.

В работе рассматривается коническая опора с изменяемой геометрией (рисунок 1). Опора состоит из конической втулки и вала с конусом. В таких подшипниках имеется возможность изменять величину зазора смазочного слоя за счет осевого смещения вала относительно неподвижной втулки. Для моделирования подшипникового узла с изменяемой величиной смазочного слоя была разработана твердотельная 3D-модель вала и подшипника. После чего она была сконвертирована в среду моделирования Simulink [6]. Модель состоит из муфты, которая передает вращающий момент на вал массой 1 кг, скорость вращения равна 3000 об/мин. Вал может перемещаться в муфте в осевом направлении. Справа вал размещен в конической опоре жидкостного трения, в которой вращается под действием сил

реакции смазочного слоя, дисбаланса, собственного веса. Для управления были реализованы контроллеры на основе ПИ-регуляторов.

Базовый контроллер реализован в форме дискретного ПИ-контроллера, выходной, сигнал которого изменяется по закону:

$$u_{PI}(z) = P + IT_S \frac{1}{z-1}, \quad (1)$$

где P, I – пропорциональный и интегральный коэффициенты, T_S – время сэмплирования сигнала.

Основу адаптивного ПИ-регулятора составляет тот же базовый ПИ-контроллер, описанный выражением (1), с дополнительными ограничениями по уровню выходного сигнала в виде насыщения:

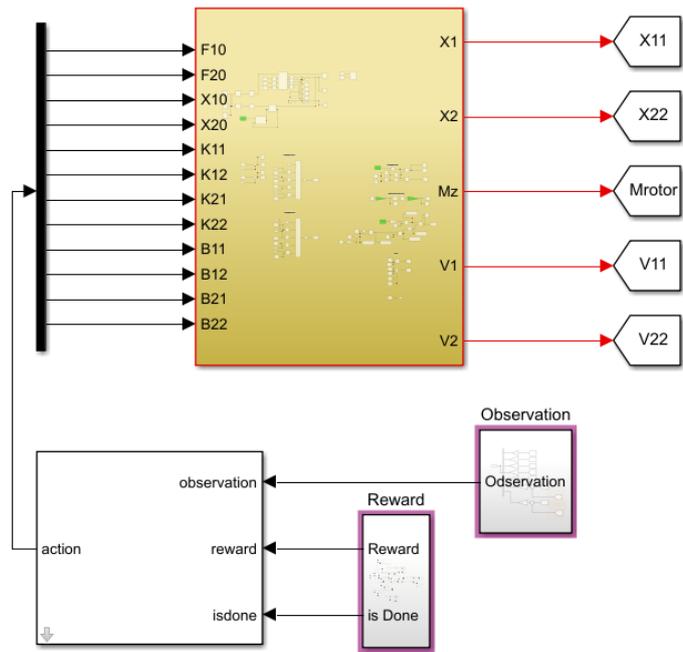


Рисунок 1 – Модель управляемого ротора

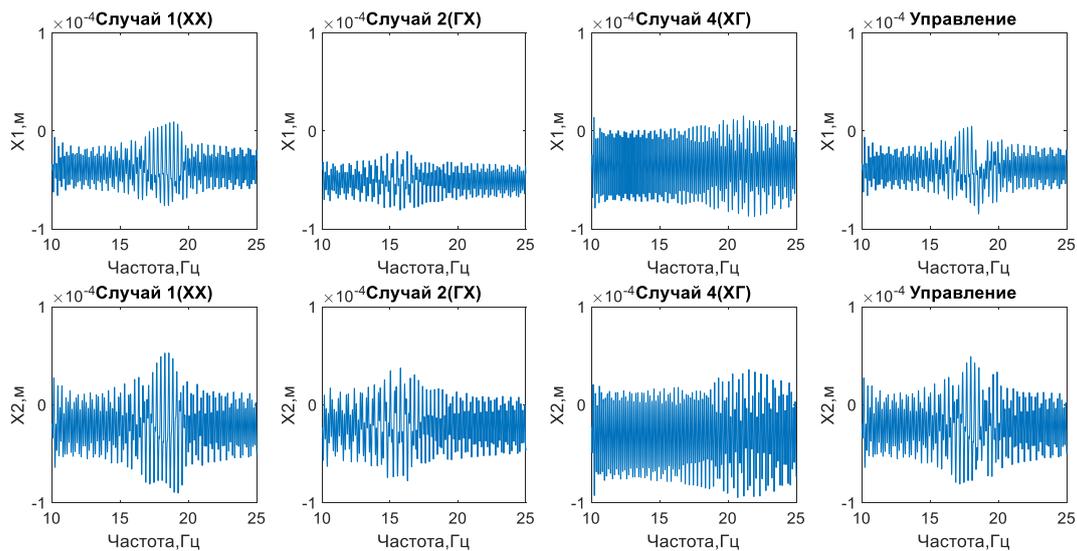


Рисунок 2 – Колебания центра ротора в зависимости от комбинации смазочного материала

$$u_{API}(s) = \begin{cases} P + I \frac{1}{s} & \text{if } L_{min} < u_{API} < L_{max} ; \\ L_{max} & \text{if } u_{API} \geq L_{max} ; \\ L_{min} & \text{if } u_{API} \leq L_{min}, \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки работы систем управления был проведен ряд симуляционных экспериментов. Основной задачей регуляторов было справиться с возникновением осевой силы и вследствие чего увеличением момента трения.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования. Графики изменения момента в соответствие с управляющим воздействием регуляторов показывают, что адаптивный ПИ-регулятор значительно лучше справляется с поставленной задачей. Однако на графике управляющего сигнала адаптивного ПИ-регулятора видны колебания управляющего сигнала из-за плавающей границы. Данный эффект может быть решен за счет увеличения частоты

управляющего воздействия. Что касательно ПИ-регулятора то регулирование осуществляется только в первой половине до достижения максимума.

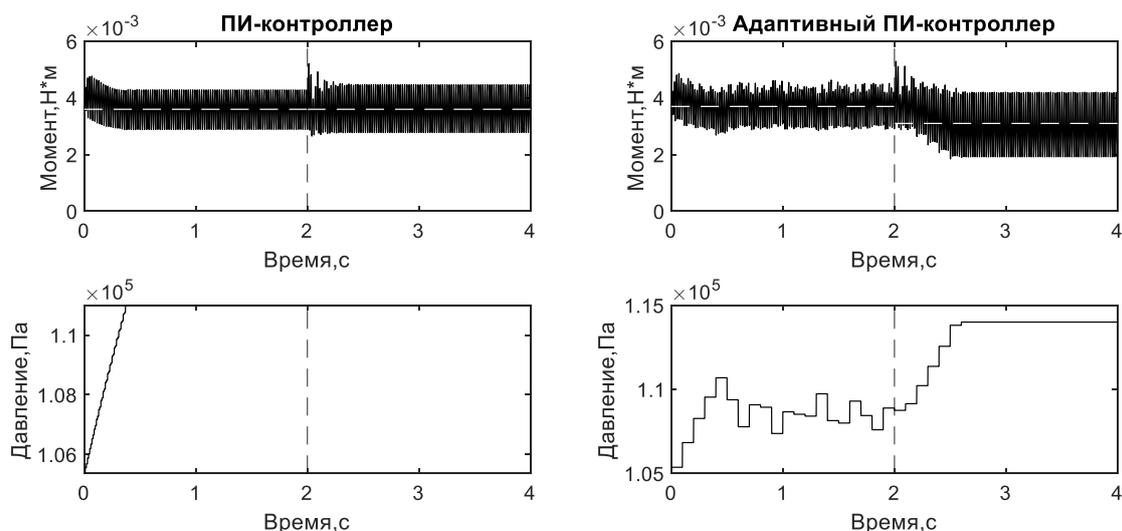


Рисунок 3 - Значение момента трения в соответствии с управляющим воздействием контроллеров

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД -129.2020.8. Авторы благодарностью признают эту поддержку.

Список литературы

1. D. C. De Moraes and R. Nicoletti Hydrodynamic bearing with electromagnetic actuators: Rotor vibration control and limitations/ D. C. De Moraes and R. Nicoletti // Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010, pp. 3715–3721
2. D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca Application of gain-scheduled vibration control to nonlinear journal-bearing supported rotor/ D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca // J. Sound Vib.-2019. vol. 442, pp. 714–737, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.027.
3. J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los Active vibrations control of journal bearings with the use of piezoactuators/ J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los // Mech. Syst. Signal Process.-2013. vol. 36, no. 2, pp. 618–629, doi: 10.1016/j.ymsp.2012.11.010.
4. I. F. Santos and F. Y. Watanabe Compensation of cross-coupling stiffness and increase of direct damping in multirecess journal bearings using active hybrid lubrication: Part i-theory/ I. F. Santos and F. Y. Watanabe // J. Tribol.-2004. vol. 126, no. 1, pp. 146–155, doi: 10.1115/1.1631015.
5. Ilmar Santos, Stefano Morosi Experimental investigations of active air bearings/ Ilmar Santos, Stefano Morosi // ASME Turbo Expo 2012 - Copenhagen, Denmark.-2012 pp. 1–10
6. smimport //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/smimport.html> (датаобращения 23.06.2021)
7. A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, and L. A. Savin Application of Artificial Neural Networks to Calculation of Oil Film Reaction Forces and Dynamics of Rotors on Journal Bearings // Int. J. Rotating Mach., vol. 2017, doi: 10.1155/2017/9196701.
8. Alexey V. Kornaev, Elena P. Kornaeva, Leonid A. Savin, Yuri N. Kazakov, Alexander Fetisov, Alexey Yu. Rodichev, Sergey V. Mayorov Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // Tribology International. 2021. №160. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107027>
9. А.В. Корнаев, Е.П. Корнаева, Ю.Н. Казаков, А.Ю. Бабин Управление температурно-вязкостным клином в подшипнике жидкостного трения на основе алгоритма глубокого обучения с подкреплением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. №1

Казаков Юрий Николаевич, студент магистр ОГУ им И.С. Тургенева, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. E-mail: KazakYurii@yandex.ru.

Корнаев Алексей Валерьевич, д.т.н., профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. E-mail: rusakor@inbox.ru.

Шутин Денис Владимирович, к.т.н., доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. E-mail: rover.ru@gmail.com.

Савин Леонид Алексеевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. E-mail: savin3257@gmail.com.

UDC 62-543.3

MODELING OF ACTIVE LIQUID FRICTION SUPPORTS

Kazakov Yu. N., Kornaev A.V., Shutin D.V., Savin L.A.
Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev (OSU)

The paper considers the modeling of rotors as solid-state models. Methods for calculating the reactions of the lubricating layer for liquid friction bearings are presented. The model is compared with real results. The application of classical and intelligent control systems in active liquid friction supports is considered.

Key words: controlled liquid friction bearings, liquid friction tapered bearings, supports with multi-zone fluid supply, modeling of liquid friction supports, PI controller, classical control systems, DQN-agent.

Bibliography

1. D. C. De Moraes and R. Nicoletti Hydrodynamic bearing with electromagnetic actuators: Rotor vibration control and limitations/ D. C. De Moraes and R. Nicoletti // Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010, pp. 3715–3721
2. D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca Application of gain-scheduled vibration control to nonlinear journal-bearing supported rotor/ D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca // J. Sound Vib.-2019. vol. 442, pp. 714–737, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.027.
3. J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los Active vibrations control of journal bearings with the use of piezoactuators/ J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los // Mech. Syst. Signal Process.-2013. vol. 36, no. 2, pp. 618–629, doi: 10.1016/j.ymssp.2012.11.010.
4. I. F. Santos and F. Y. Watanabe Compensation of cross-coupling stiffness and increase of direct damping in multirecess journal bearings using active hybrid lubrication: Part i-theory/ I. F. Santos and F. Y. Watanabe // J. Tribol.-2004. vol. 126, no. 1, pp. 146–155, doi: 10.1115/1.1631015.
5. Ilmar Santos, Stefano Morosi Experimental investigations of active air bearings/ Ilmar Santos, Stefano Morosi // ASME Turbo Expo 2012 - Copenhagen, Denmark.-2012 pp. 1–10
6. smimport //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/smimport.html> (датаобращения 23.06.2021)
7. A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, and L. A. Savin Application of Artificial Neural Networks to Calculation of Oil Film Reaction Forces and Dynamics of Rotors on Journal Bearings // Int. J. Rotating Mach., vol. 2017, doi: 10.1155/2017/9196701.
8. Alexey V. Kornaev, Elena P. Kornaeva, Leonid A. Savin, Yuri N. Kazakov, Alexander Fetisov, Alexey Yu. Rodichev, Sergey V. Mayorov Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // Tribology International. 2021. №160. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107027>
9. A.V. Kornaev, E.P. Kornaeva, Yu. N. Kazakov, A.Yu. Babin Temperature-viscosity wedge control In a fluid friction bearing based On a deep reinforcement learning algorithm // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2021. №1

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 621.383

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА ЦВЕТА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПИРОМЕТРЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Вальке А. А., Лобов Д. Г., Шкаев А. Г.

Россия, г. Омск, Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

Аннотация. При решении задач повышения энергоэффективности высокотемпературных технологических процессов важную роль играют средства бесконтактного теплового контроля. В целях создания таких средств контроля авторами была проанализирована возможность разработки высокотемпературного пирометра спектрального отношения, использующего многоспектральный приемник излучения (датчик цвета) TCS34725. В работе определены коэффициенты использования данного приемника, приведены графики зависимости отношения сигналов в различных спектральных интервалах от температуры для двух вариантов применения: без дополнительной фильтрации инфракрасной составляющей излучения объекта контроля и с использованием внешнего фильтра, непрозрачного в инфракрасной части спектра.

Ключевые слова: датчик цвета, многоспектральный приемник излучения, пирометр, тепловой контроль, бесконтактное измерение температуры

В настоящее время существует, множество технологических процессов с рабочими диапазонами температур от 1000 до 3000°С. Повышение энергоэффективности таких процессов является сегодня актуальной задачей, поскольку это приводит к существенной экономии энергоресурсов при одновременном сокращении вредного влияния соответствующих производств на окружающую среду.

Такие технологические процессы встречаются в металлургической промышленности, в производстве негорючей теплоизоляции и технического углерода [1]. При решении задач повышения энергоэффективности высокотемпературных технологических процессов важную роль играют методы бесконтактного контроля температуры с использованием пирометров.

Для измерения высоких температур применяются два основных типа пирометров: яркостные (или радиационные) и цветовые (или пирометры спектрального отношения). Радиационные пирометры основаны на зависимости энергетической яркости излучения объекта в ограниченном диапазоне длины волн от его температуры. Принцип работы пирометров спектрального отношения заключается в определении температуры по отношению сигналов от нескольких приемников, работающих в разных спектральных диапазонах.

Применение пирометров спектрального отношения в ряде случаев является более предпочтительным, поскольку показания таких приборов наименее подвержены влиянию загрязнения смотровых окон и частичному запылению смотровых каналов объекта контроля [2-5].

В настоящее время существует большое количество пирометров спектрального отношения, применяющихся в производстве. К таким приборам относятся, например «Термоконт-ТЦ5П», «С-3000.1 "Сталь"», «RaytekMR1S» и другие. Основным недостатком пирометров спектрального отношения является высокая (сотни тысяч рублей) стоимость, значительную часть которой составляет стоимость многоспектрального приемника излучения (ПИ).

В статье рассматривается возможность создания пирометра спектрального отношения невысокой стоимости, в котором используется недорогой многоспектральный приёмник излучения (датчик цвета) типа TCS34725 производства фирмы AMS-TAOS USA Inc. (США).

Известно, что физические тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля, испускают лучистую энергию в виде электромагнитных волн. При этом мощность излучения

с единицы поверхности и спектр излучения зависит от температуры тела. Спектр электромагнитного излучения для абсолютно черного тела (АЧТ) описывается законом Планка:

$$W_{\lambda}(\lambda, T) = C_1 \cdot (\lambda)^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

где W_{λ} – спектральная плотность потока, c_1 и c_2 – константы, λ – длина волны, T – температура тела.

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k} \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана.

На графиках рисунка 1 показано изменение относительной спектральной плотности W_{λ} потока излучения АЧТ для различных температур.

Из рисунка 1 видно, что максимум функции Планка в диапазоне температур от 1200 до 2000°C находится в диапазоне длин волн 1 – 2 мкм. При этом при повышении температуры максимум смещается в более коротковолновую часть спектра. Соответственно приемник излучения должен работать именно в этой части спектра. Нормализованная спектральная характеристика датчика цвета TCS34725 приведена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что максимум спектральной характеристики R-канала приходится на 615 нм, G-канала на 525 нм, B-канала на 465 нм. В процессе исследований рассматривалась возможность использования датчика, цвета TCS34725 в качестве приемника излучения для измерения температур в диапазоне от 1200 до 2100°C. Такой диапазон температур характерен для технологического процесса производства технического углерода.

В ходе исследований сначала был произведен расчет коэффициентов использования приемников излучения для каждого из трех каналов датчика цвета TCS34725, для температур 1200°C и 2100°C.

Коэффициент использования определяется зависимостью [4]:

$$K = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d(\lambda)} \quad (4)$$

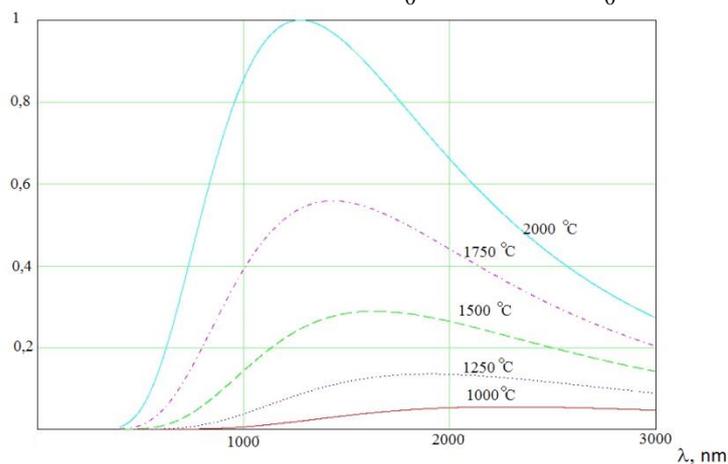


Рисунок 1 - Изменение относительной спектральной плотности W_{λ} потока излучения АЧТ для различных температур

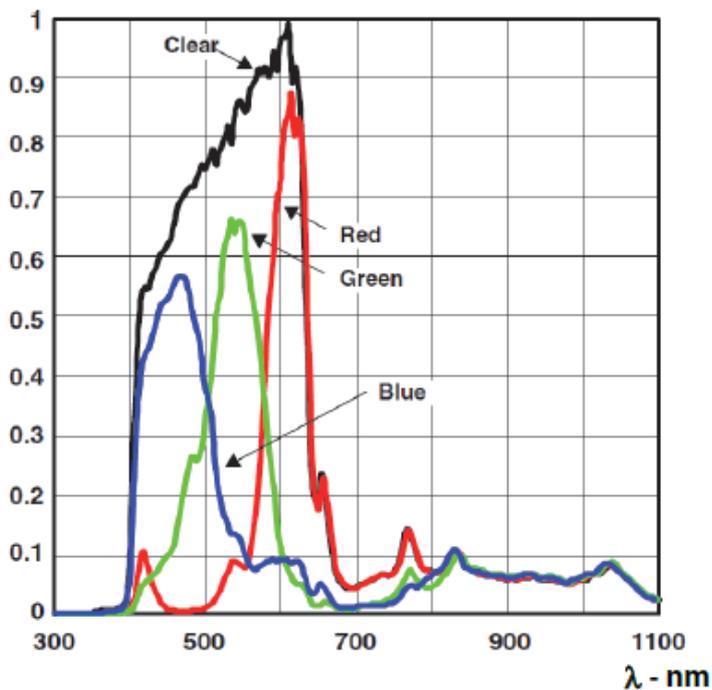


Рисунок 2 - Нормализованная спектральная характеристика датчика цвета TCS34725.

спектральных характеристик, представленных на рисунке 2.

Вычисленные значения коэффициента использования по различным каналам для температур 1200°C и 2100°C приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты использования

| Канал | Температура | |
|-------|-------------|---------|
| | 1200 °C | 2100 °C |
| R | 0.073 | 0.1 |
| G | 0.067 | 0.085 |
| B | 0.066 | 0.07 |

температуру объекта по отношению сигналов от нескольких приемников, работающих в различных спектральных диапазонах. Поэтому был произведен расчет отношения сигналов с каналов R, G и B в диапазоне измеряемых температур от 1200 до 2100°C.

На рисунке 3 и 4 показаны зависимости отношения сигналов каналов G и R, и каналов B и R от температуры без использования внешнего дополнительного фильтра.

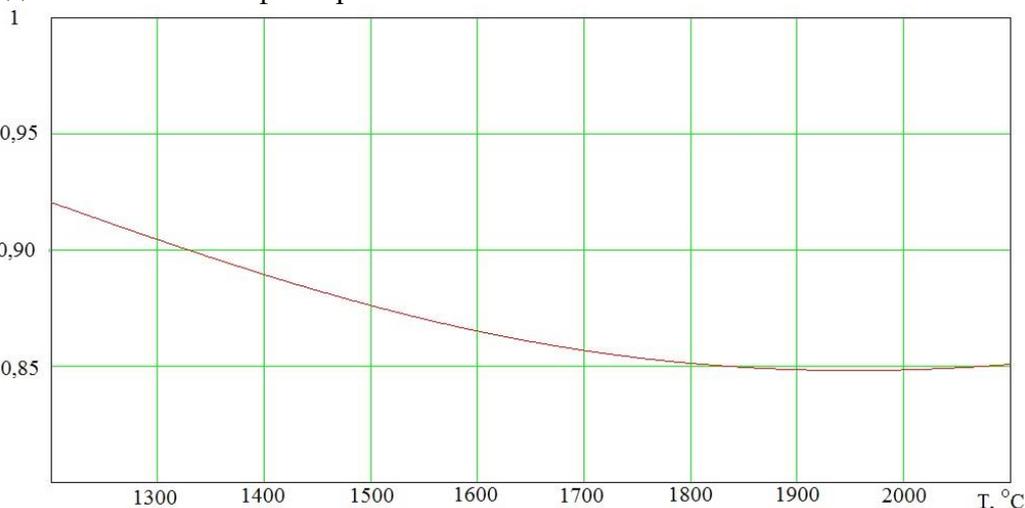


Рисунок 3 - Зависимость отношения сигналов каналов G и R от температуры без использования фильтра

где $\Phi(\lambda)$ – функция, описывающая распределение падающего на ПИ потока от длины волны, при заданной температуре контролируемой поверхности; $S(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности ПИ.

Таким образом, этот коэффициент показывает, какая доля потока излучения, попадающего на ПИ, соответствует его спектральной чувствительности, и, следовательно, преобразовывается в выходной сигнал.

При этом функция $\Phi(\lambda)$ для заданных температур рассчитывалась в соответствии с законом Планка, а функции спектральных характеристик $S(\lambda)$ приемников излучения R-, G-, и B-каналов определялись путем сплайн-интерполяции нормированных

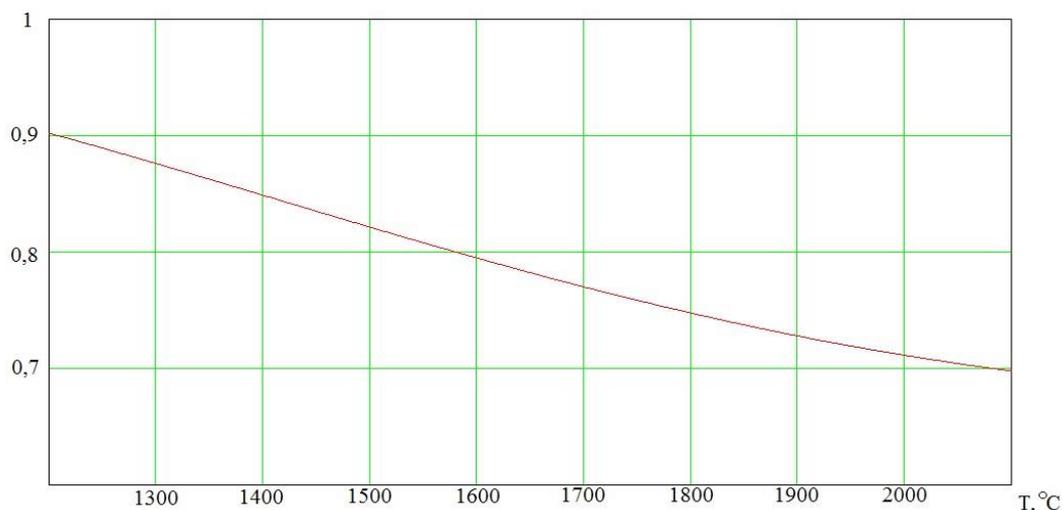


Рисунок 4 - Зависимость отношения сигналов каналов В и R от температуры без использования фильтра

На рисунках 5 и 6 показаны зависимость отношения сигналов каналов G и R, и каналов В и R от температуры с использованием внешнего фильтра, отсекающую инфракрасную часть спектра, на длине волны 700 нм.

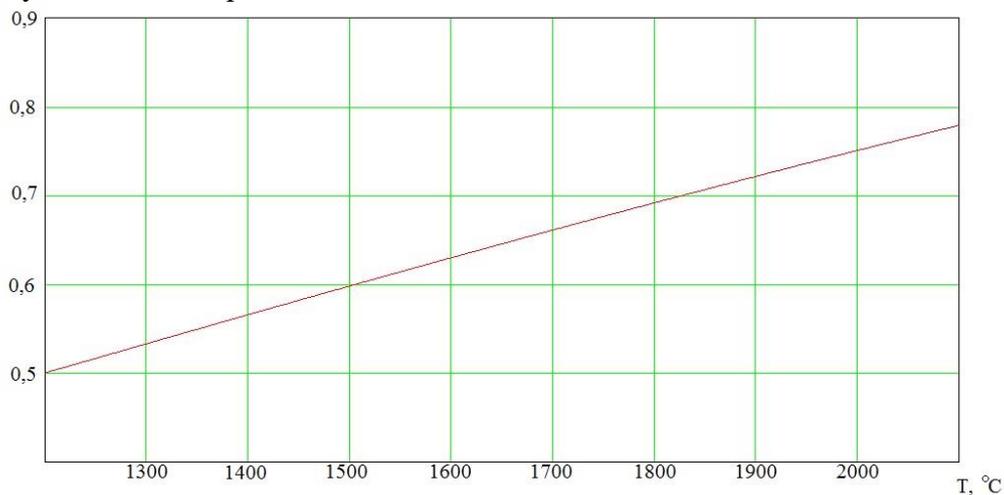


Рисунок 5 - Зависимость отношения сигналов каналов G и R от температуры с фильтром

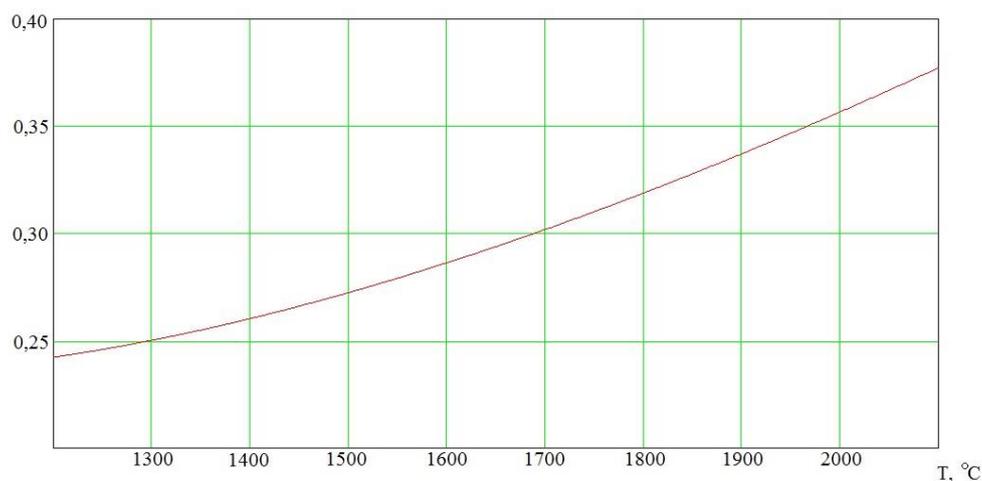


Рисунок 6 - Зависимость отношения сигналов каналов В и R от температуры с фильтром

Исходя из представленных результатов, можно сделать вывод о возможности использования датчика цвета TCS34725 в качестве приемника излучения для пирометра спектрального отношения с диапазоном температур 1200 – 2100 °С. При этом наилучшим

вариантом является построение пирометра спектрального отношения, использующего каналы G и R с внешним фильтром, отсекающим инфракрасную часть спектра.

Данное решение в соответствии с таблицей 1 обеспечивает наибольшие коэффициенты использования приёмников излучения и при этом зависимость отношения сигналов каналов G и R от температуры является монотонно возрастающей и практически близка к линейной (рисунок 5). Два этих фактора позволяют упростить реализацию электронной схемы пирометра спектрального отношения.

Список литературы

1. Valke, A. A. Visual level measurement system application in the technological process automated control system of the recuperative furnace bath / A.A. Valke, D.G. Lobov, A.G. Shkaev, A.A. Shkaev, D.B. Ponomarev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012111 // Journal of Physics : Conference Series. – 2021. - 1791 (1)
2. Zhang, Yuzhong & Lang, Xianli & Hu, Zhenwei & Shu, Shuangbao. (2017). Development of a CCD-based pyrometer for surface temperature measurement of casting billets. Measurement Science and Technology. 28. 10.1088/1361-6501/aa6928.
3. Wei Wang, Jie-Dong Lin, Wan-Li Zhong , Biao Zhang, Chuan-Long Xu, Hui Ding. Analysis of infrared temperature measurement for flu gas shielding metal surface using source multi-flux method. Thermal science: Year 2018, Vol. 22, No. 1A, pp. 313-321.
4. Srsen, Davor, "Temperature measurement and thermal control of die casting processes using CCD cameras" (2012). Electronic Theses and Dissertations. 5348.
5. F. Tairan, Z. Huan, Z. Jun, W. Zhe, Z. Maohua, and S. Congling, "Improvements to the three-color optical ccd-based pyrometer system," Applied Optics, pp. 5997–6005, 2010.

Вальке Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника», ОмГТУ. 644050, Российская федерация г. Омск пр. Мира д. 11. E-mail: alex_sibiria@yahoo.com тел. +7 (3812) 65-26-69

Лобов Дмитрий Геннадьевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроника», ОмГТУ. 644050, Российская федерация г. Омск пр. Мира д. 11. E-mail: dg_lobov@mail.ru тел. +7 (3812) 65-26-69

Шкаев Александр Геннадьевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроника», ОмГТУ. 644050, Российская федерация г. Омск пр. Мира д. 11. E-mail: shkaev@mail.ru тел. +7 (3812) 65-26-69

UDC 621.383

APPLICATION OF COLOR SENSOR IN HIGH-TEMPERATURE PYROMETER OF SPECTRAL RATIO

A. A. Valke, D. G. Lobov, A. G. Shkaev
Russia, Omsk, Omsk state technical university (OmSTU)

Annotation. Contactless thermal control tools play an important role in solving the problems of improving energy efficiency of high-temperature technological processes. In order to create such controls, the authors analyzed the possibility of developing a high-temperature pyrometer of spectral ratio using a multispectral radiation receiver (color sensor) TCS34725. In operation, the coefficients of use of this receiver are determined graphs of the ratio of signals in different spectral intervals to temperature are given for two applications: without additional filtration of the infrared component of the radiation of the control object and using an external filter opaque in the infrared part of the spectrum.

Keywords: color sensor, multispectral radiation receiver, pyrometer, thermal control, contactless temperature measurement

Bibliography

1. Valke, A. A. Visual level measurement system application in the technological process automated control system of the recuperative furnace bath / A.A. Valke, D.G. Lobov, A.G. Shkaev, A.A. Shkaev, D.B. Ponomarev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012111 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. - 1791 (1)

2. Zhang, Yuzhong & Lang, Xianli & Hu, Zhenwei & Shu, Shuangbao. (2017). Development of a CCD-based pyrometer for surface temperature measurement of casting billets. Measurement Science and Technology. 28. 10.1088/1361-6501/aa6928.

3. Wei Wang, Jie-Dong Lin, Wan-Li Zhong, Biao Zhang, Chuan-Long Xu, Hui Ding. Analysis of infrared temperature measurement for flu gas shielding metal surface using source multi-flux method. Thermal science: Year 2018, Vol. 22, No. 1A, pp. 313-321.

4. Srsen, Davor, "Temperature measurement and thermal control of die casting processes using CCD cameras" (2012). Electronic Theses and Dissertations. 5348.

F. Tairan, Z. Huan, Z. Jun, W. Zhe, Z. Maohua, and S. Congling, "Improvements to the three-color optical ccd-based pyrometer system," Applied Optics, pp. 5997–6005, 2010.

Valke Alexey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electronics", 644050, Russian Federation, Omsk, Mira pr., 11, E-mail: alex_sibiria@yahoo.com

Lobov Dmitriy Gennadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electronics", 644050, Russian Federation, Omsk, Mira pr., 11, E-mail: dg_lobov@mail.ru

Shkaev Alexandr Gennadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electronics", 644050, Russian Federation, Omsk, Mira pr., 11, E-mail: shkayev@mail.ru

УДК 665.637.88

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА ГРЕЮЩЕГО ТОКА ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИЛОВЫХ IGBTМОДУЛЕЙ

Лобанова В.А., Верёвкин В.В., Пилипенко А.П.

Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева, АО «Протон-Электротекс»

Разработка и производство IGBTмодулей связано со значительными временными, финансовыми и энергозатратами. Сюда входит разработка, производство, доставка, хранение комплектующих, а также квалификационные, исследовательские и типовые испытания. Принципа энергоэффективности необходимо придерживаться на каждом из перечисленных этапов, а в данной статье речь будет идти о повышении скорости и снижении затрат на разработку новых типов силовых IGBT модулей вследствие точного выбора требуемой длительности греющего импульса во время испытаний в циклическом режиме.

Ключевые слова: силовой IGBTмодуль, электротермоциклирование, длительность греющего импульса, переходное тепловое сопротивление.

Типовая конструкция IGBTмодуля [1] представляет собой многослойную структуру (рис. 1), токопроводящие, активные, резистивные либо изолирующие элементы которой соединены между собой с помощью припоя, либо в редких случаях используется технология синтеринга или прямого размещения токопроводящих дорожек на основании с изоляцией эпоксидной смолой.

На заключительных этапах разработки, после выбора конструкции нового прибора и определения его электрических характеристик, проводятся испытания на надежность. Среди них наиболее энергозатратными являются ресурсные испытания, характеризующиеся циклическим перепадом температур структурных элементов прибора либо под воздействием греющего тока (активное циклирование), либо под воздействием изменения температуры окружающей среды (пассивное циклирование).

В настоящее время существует проблема выбора времени цикла при проведении активного циклирования

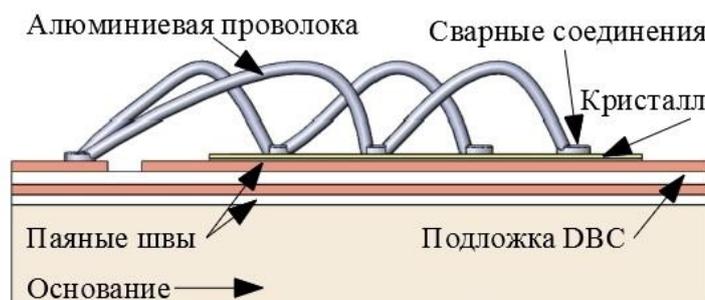


Рисунок 1 – Структура типового IGBT модуля паяной конструкции

в связи с отсутствием методики решения данной

задачи. Наиболее распространенным способом выбора времени цикла на практике является его произвольное задание в соответствии с ориентировочными значениями для «коротких» или «длинных» циклов, взятыми из различных источников, причем в зависимости от выбранного источника рекомендации могут различаться [2]. Общепринятый стандарт выбора времени цикла отсутствует.

В связи с этим предлагается формализовать подход к определению времени цикла ресурсных циклических испытаний с учетом особенностей конструкции конкретного исследуемого прибора.

Многослойная структура исследуемых приборов предполагает различие в коэффициентах температурного линейного расширения (КТЛР) соседствующих слоев [3], что обуславливает возникновение термомеханических напряжений как в зоне их соединения, так и воздействующих непосредственно на элементы конструкции прибора. Известно, что тепловое сопротивление элементов конструкции прямо пропорционально выбранной длительности греющего импульса, что объясняется инерционностью тепловых процессов и конечностью значений теплоемкостей и теплопроводности материалов [4]. Прибор считается равномерно прогретым, то есть в нем устанавливается стационарное распределение температуры, когда время нагрева в несколько раз больше суммы тепловых постоянных времени всех слоев. Из этого следует возможность подвергать термомеханическим нагрузкам те или иные элементы конструкции при достаточно быстром изменении количества рассеиваемой теплоты, то есть, варьируя длительность греющего импульса.

Таким образом, некорректно установленная длительность греющего импульса приводит к некорректной нагрузке на элементы конструкции прибора, некорректным результатам испытаний и, как следствие, к неправильному установлению ресурса испытываемых приборов.

Важными параметрами для выполнения тепловых расчетов с поставленной целью являются температура p -перехода T_j , температура корпуса T_c , тепловое сопротивление в установившемся режиме R_{th} , мощность потерь $P = U_i(i)I$ и переходное тепловое сопротивление $Z_{th}(t)$. Повышение температуры компонентов силового полупроводникового прибора ухудшает его рабочие характеристики и способствует выходу прибора из строя. Эти процессы характеризуются значениями параметра теплового сопротивления. Параметр R_{th} широко используется в качестве маркера степени деградации силового полупроводникового модуля и для расчетов надежностных характеристик разрабатываемого модуля в связи с возможностью реализации его отслеживания.

Для расчета корректной длительности греющего импульса, соответствующей нагрузке на исследуемые элементы конструкции прибора, предлагается следующая методика:

1. Составление граничной задачи с построением нестационарной тепловой модели для каждого слоя прибора с заданием геометрических и тепловых характеристик каждого слоя для кремниевого чипа $c\rho \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \left(\frac{\delta \lambda}{\delta t}\right) \left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)^2 + Q(t, T)$ [5] и для остальных слоев

$\frac{\delta T_i}{\delta t} = a_i \frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2}$ [6] с заданием граничных условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i \left(\frac{\delta T_i}{\delta x}\right)_{-R_k} = \lambda_{i+1} \left(\frac{\delta T_{i+1}}{\delta x}\right)_{+R_k} \\ (T_i)_{-R_k} = (T_{i+1})_{+R_k} - (\lambda_{i+1}) R_{k_i} - (i+1) \left(\frac{\delta T_{i+1}}{\delta x}\right)_{+R_k} \end{array} \right. \quad (1)$$

где R_k – контактное сопротивление i -го интерфейса, $\alpha_i = \lambda_i / c_i \rho_i$ – коэффициент температуропроводности материала i -го слоя, ρ_i – плотность материала i -го слоя, c_i – удельная теплоемкость материала i -го слоя, λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя.

2. Расчет распределения температуры по слоям во времени $T(t)$ решением системы дифференциальных уравнений числовым методом (в предлагаемой методике – явным сеточным), предварительно определив величину переходного теплового сопротивления для каждого слоя $Z(t) = [T_j(t) - T_c] / P_0 = \sum_{i=1}^m R_i (1 - e^{-t/\tau_i})$ [7].

3. Получение временных зависимостей $T_c(t)$ и $T_j(t)$ с помощью интеграла Дюамеля [7] $\Delta T(t) = P(t_0)Z(t) + \int_0^t \frac{dP(\tau)}{d\tau} Z(t - \tau) d\tau$, где $P(t_0) = P(t = 0)$.

4. Получение экспериментальных зависимостей $T_c(t)$ и $T_j(t)$ с помощью специально разработанной установки измерения переходного теплового сопротивления $Z_{th}(t)$.

5. Корректировка построенной тепловой модели в соответствии с экспериментальными значениями для соответствия расчетных и экспериментальных зависимостей $T_c(t)$ корпуса и $T_j(t)$ полупроводникового элемента.

6. Построение временного графика распределения температур по слоям (рис. 2) и выбор оптимальной длительности греющего импульса в соответствии с поставленной задачей. Приведенный на рис. 2 график показывает степень прогрева каждого слоя (Si, Ge, – полупроводниковый элемент; Sn – слой припоя или, в некоторых случаях, синтер-слой

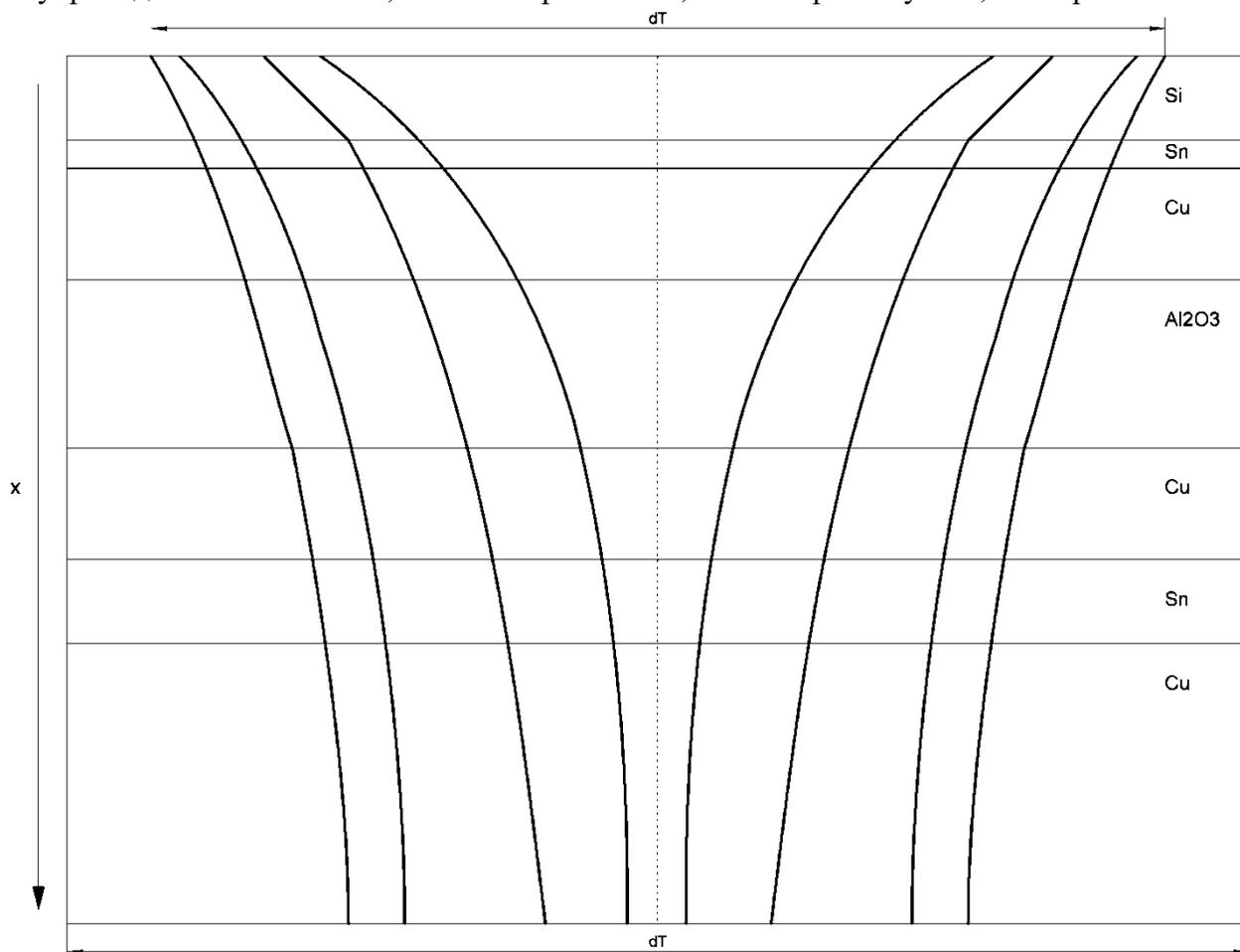


Рисунок 2 – Условный график перепада температур по слоям при различной длительности импульса греющего тока

между полупроводниковым элементом и DBC-подложкой; Cu+Al₂O₃+Cu–DBC-подложка, представляющая собой керамическую пластину, покрытую с двух сторон медной металлизацией, на одной из сторон которой, со стороны размещения полупроводниковых элементов, протравлена топология; нижний слой Sn–паяное соединение DBC-подложки с основанием, нижний слой Cu–условное обозначение основания, которое может быть изготовлено из меди либо из композитных материалов) при выбранной длительности греющего импульса.

Тепловая модель любой степени сложности будет иметь определенные допущения, которые упрощают расчет, но снижают его точность. Например, в стандартных технологических условиях неизвестно с достоверной степенью точности толщина слоя припоя и возможные имеющиеся в нем дефекты, не выявляемые с помощью ультразвукового сканирования или рентгенографической дефектоскопии. При этом теплопроводность таких элементов конструкции, как керамика в DBC-подложках, зачастую известна только со слов ее поставщика, и неизвестны возможные ее дефекты в части пористости или включений. Предлагаемый метод применим и к другим типам силовых полупроводниковых приборов: так, например, становится возможным определить, до какой степени в биполярном модуле можно уменьшать толщину молибдена, чтобы это не привело к снижению уровня ударного тока. Таким образом, фактические характеристики каждого слоя конструкции, особенно после сборочных операций, таких как пайка, синтеринг или сплавление, точно неизвестны. Также неизвестно влияние этих характеристик на распределение температуры по времени и координате.

С целью решения поставленной задачи была разработана и спроектирована установка измерения переходного сопротивления силовых полупроводниковых модулей, позволяющая производить контроль во времени таких параметров, как температура корпуса T_c , мощность потерь $P(t)$ и напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{ce(sat)}$ при измерительном токе, равном 1-2 А, являющееся температурно-чувствительным параметром (ТЧП), характеризующим падение напряжения на p -переходе, линейно уменьшающимся с ростом температуры. Далее по результатам измерений данных параметров с помощью ПО установки отдельной операцией производится градуировка по измерению кривой охлаждения, расчет температуры перехода T_j по ТЧП и вычисление $Z_{th}(t) = \delta T(t) / P(t)$. Подробнее устройство и принцип работы данной установки будет описано в отдельной статье.

Выводы

Предложен метод, позволяющий определить длительность греющего импульса при испытаниях в циклическом режиме для нагрузки на выбранные элемента конструкции, с помощью специально сконструированной установки контроля переходного теплового сопротивления. Данный метод позволяет с точностью определить режим испытаний еще на этапе разработки модуля, что значительно сокращает энергозатраты проведение ресурсных испытаний с некорректно выбранной длительностью греющего импульса. Данный подход на текущий момент разработан для одномерной конструкции прибора, что представляет дальнейший интерес исследования его согласования с неоднородной моделью многоэлементных приборов. Предварительно предполагается их согласование, так как в одной из предыдущих работ было показано, что значение ТЧП соответствует температуре наиболее нагретого чипа в многоэлементном модуле.

Список литературы

1. Верёвкин В.В., Волобуев К.А., Стригунов С.Л., Пилипенко А.П., Лобанова В.А. Механизмы отказов IGBT-модулей при испытании в режиме электротермоциклирования [Текст]. –Известия СПбГУ «ЛЭТИ». –2020. –№ 10. –с. 68-79.
2. Sarkany Z., Vass-Varnai A., Rencz M. Effect of power cycling parameters on predicted IGBT lifetime [Текст]. –2015 IEEE Aerospace Conference. –2015. – с. 1-9.

3. Herrmann T., Feller M., Lutz J., Bayerer R., Licht T. Power cycling induced failure mechanisms in solder layers [Текст]. –2007 European Conference on Power Electronics and Applications. –2007. – с. 1-7.
4. Вишнеvский А.И., Руденко В.С., Платонов А.П. Силовые ионные и полупроводниковые приборы [Текст]. –М.: Высш. Школа. – 1975. –343 с.
5. Дерменжи П. Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н., Мамонов В.И., Павлик В.Я. Расчет силовых полупроводниковых приборов, под ред. В.А. Кузьмина [Текст]. –М.:Энергия. –1980. –184 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. [Текст]. –М.:Наука. –1964. – 488 с.
7. Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках [Текст].–М.:Энергоатомиздат –1992.–432 с.
8. Верёвкин В.В., Стригунов С.Л., Пилипенко А.П., Волобуев К.А., Лобанова В.А. Испытания многокристальных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока [Текст]. – Изв.вузов. Приборостроение. –2020. –Т.63, № 5. –с. 173-178. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-173-178

Лобанова Валентина Андреевна, к.т.н., доцент кафедры электроники, радиотехники и систем связи ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: lvanata@yandex.ru,

Верёвкин Владимир Викторович, к.т.н., технический эксперт АО «Протон-Электротекс», e-mail: verevkin.v52@gmail.com

Пилипенко Анастасия Петровна, аспирант кафедры электроники, радиотехники и систем связи ОГУ имени И.С. Тургенева, инженер-технолог АО «Протон-Электротекс», e-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com

UDC 621.383

METHOD FOR CALCULATING THE CURRENT PULSE DURATION FOR POWER IGBT MODULES LIFETIME TESTING

Lobanova V.A., Verevkin V.V., Pilipenko A.P.

Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev, JSC “Proton-Electrotex”

The development and production of IGBT modules is associated with significant time, financial and energy costs. This includes the development, production, delivery, storage of components, as well as qualification, research and type lifetime testing. The principle of energy efficiency must be adhered at each of the listed stages, and this article is about increasing the speed and reducing the cost of developing new types of power IGBT modules due to precise selection of the required duration of heating pulse during power cycling testing.

Keywords: power IGBT module, power cycling, heating pulse duration, transient thermal resistance.

Bibliography

1. Verevkin V.V., Volobuev K.A., Strigunov S.L., Pilipenko A.P., Lobanova V.A. IGBT modules failure mechanisms during power cycling tests [Text]. –Izv.vuzov. Priborostroyeniye.–2020. –N 10. –pp. 68-79.
2. Sarkany Z., Vass-Varnai A., Rencz M. Effect of power cycling parameters on predicted IGBT lifetime [Текст]. –2015 IEEE Aerospace Conference. –2015. – pp. 1-9.
3. Herrmann T., Feller M., Lutz J., Bayerer R., Licht T. Power cycling induced failure mechanisms in solder layers [Text]. –2007 European Conference on Power Electronics and Applications. –2007. – pp. 1-7.
4. Vishnevskij A.I., Rudenko V.S., Platonov A.P. Power ion and semiconductor devices [Text]. – Moscow: Vyssh.Shkola. – 1975. –343 p.
5. Dermenzhi P. G., Kuz'min V.A., Kryukova N.N., Mamonov V.I., Pavlik V.YA. Power semiconductor devices calculation, pod red. V.A. Kuz'mina [Text]. –Moscow: Energiya.–1980. –184 p.
6. Carslaw H., Jaeger J. Conduction of heat in solids [Text]. –Moscow: Nauka.–1964. –488 p.
7. Abramovich M.I., Babajlov V.M., Liber V.E. Diodes and thyristors in converter machines [Text].– Moscow:Energoatomizdat –1992.–432 p.
8. Verevkin V.V., Strigunov S.L., Pilipenko A.P., Volobuev K.A., Lobanova V.A. IGBT modules failure mechanisms during power cycling test [Text]. –Journal of Instrument Engineering. –2020. –Vol. 63, N 5. –p. 173—178 (in Russian).

Lobanova Valentina Andreevna Candidate of Engineering Sciences, associate professor at the department of Electronics, Radio Engineering and Communication Systems, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: Ivanata@yandex.ru,

Verevkin Vladimir Viktorovich, Candidate of Engineering Sciences, JSC “Proton-Electrotex” technical expert, e-mail: verevkin.v52@gmail.com,

Pilipenko Anastasia Petrovna student at Orel State University named after I.S. Turgenev, process engineer at JSC “Proton-Electrotex”, e-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com.

СЕКЦИЯ 6. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Руководитель:

Мещеряков Виктор Николаевич, заслуженный работник высшего образования РФ, д.т.н., профессор, зав. каф.электропривода ЛГТУ, г. Липецк

УДК.621.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОВОЧНЫХ И ШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БАБЫ МОЛОТА С НАПОЛНИТЕЛЕМ

Лавриненко В.Ю.

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Аюпов Т.Х.

Россия, г. Москва, АО «Московский машиностроительный завод «Авангард»

В статье приведен расчет экономической эффективности использования бабы с наполнителем штамповочного молота модели М2140 с массой падающих частей 1000 кг в кузнечном цехе АО «Московский машиностроительный завод «Авангард».

Ключевые слова: штамповочный молот, баба молота с наполнителем, производительность молота, энергопотребление

В производственных условиях АО «ММЗ «Авангард» проведена модернизация штамповочного молота модели М2140 с массой падающих частей 1000 кг [1-5], заключающаяся в применении бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков вместо стандартной бабы молота.

Согласно, разработанных рекомендаций в корпусе бабы были изготовлены 4 цилиндрических отверстия для последующего размещения в них наполнителя в виде стальных шариков (сталь ШХ15, ГОСТ 3722-2014). Для фиксации сепараторов внутри цилиндрических отверстий в корпусе бабы молота использовали цилиндрические крышки с фланцами, закрепляемые с помощью верхней крышки и винтов М20.

После установки модернизированной бабы с наполнителем на молот модели М2140 была проведена экспериментальная штамповка партии поковок «Угольник» (сталь 12Х2НВФА) в общем количестве 20 шт. (рис. 1).

В табл. 1 приведены значения количества ударов, а также величины контролируемых параметров поковки А, В и R при штамповке стандартной бабой и бабой с наполнителем.

При этом необходимо отметить уменьшение общего количества ударов при использовании модернизированной бабы молота с наполнителем (5 ударов) по сравнению со штамповкой стандартной бабой молота (7 ударов) в 1,4 раза при полном соответствии

размеров поковок, полученных, при использовании бабы молота с наполнителем, требованиям чертежа.



Рисунок 1 - Фотографии поковки «Угольник», полученной при использовании стандартной бабы молота (а) и бабы молота с наполнителем (б)

Таблица 1 - Результаты штамповки поковок «Угольник» стандартной бабой и бабой с наполнителем штамповочного молота модели М2140 на АО «ММЗ «Авангард»

| | Кол-во ударов в предварительном ручье штампа | Кол-во ударов в окончательном ручье штампа | Общее кол-во ударов | А, мм | В, мм | R, мм |
|-----------------------------------|--|--|---------------------|-------|-------|-------|
| Штамповка стандартной бабой | 3 | 4 | 7 | 72* | 32* | 10* |
| Штамповка бабой с наполнителем | 2 | 3 | 5 | 72,3* | 32,2* | 10* |
| * - соответствует чертежу (рис.3) | | | | | | |

Далее был проведен расчет экономической эффективности использования бабы с наполнителем штамповочного молота модели М2140 с массой падающих частей 1000 кг при штамповке поковок «Угольник» стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем, включающий:

- расчет производительности

$$Q = M_{\text{пок}} \cdot 60 / T_{\text{ш}} \quad (1)$$

- расчет нормы штучного времени на горячую штамповку

$$T_{\text{ш}} = (T_0 + T_{\text{в}}) \cdot K, \quad (2)$$

где T_0 - основное время в мин; $T_{\text{в}}$ - вспомогательное время в мин; K - коэффициент,

учитывающий организационно-техническое обслуживание, перерыв на отдых и личные надобности.

При этом установлено, что:

- при использовании стандартной бабы молота

$$T_0 = 0,077 \cdot 1,25 = 0,0963 \text{ мин,}$$

- при использовании бабы молота с наполнителем

$$T_0 = 0,055 \cdot 1,25 = 0,0688 \text{ мин.}$$

позволил установить снижение нормы штучного времени на штамповку при использовании бабы молота с наполнителем на 11%; снижение удельного энергопотребления и экономию электроэнергии при использовании бабы молота с наполнителем на 12% и снижение удельного потребления сжатого воздуха при использовании бабы молота с наполнителем на 11% [8].

Норма штучного времени на горячую штамповку при $K = 1,4$ [6]:

- при использовании стандартной бабы молота

$$T_{ш} = (0,0963 + 0,183) \cdot 1,4 = 0,3910 \text{ мин,}$$

- при использовании бабы молота с наполнителем

$$T_{ш} = (0,0688 + 0,183) \cdot 1,4 = 0,3525 \text{ мин.}$$

Производительность горячей объемной штамповки на молоте модели M2140:

- при использовании стандартной бабы молота

$$Q = 4 \cdot 60 / 0,3910 = 613 \text{ кг/ч,}$$

- при использовании бабы молота с наполнителем

$$Q = 4 \cdot 60 / 0,3525 = 680 \text{ кг/ч.}$$

Удельное энергопотребление $K_э$ при штамповке определяли по формуле:

$$K_э = N \cdot K_{дв} \cdot K_{дм} / \eta_{дв} \cdot Q \quad (3)$$

где N – мощность электродвигателя компрессора, кВт. Для компрессора, используемого в кузнечном цехе АО «ММЗ «Авангард», $N = 75$ кВт;

$K_{дв}$ – коэффициент загрузки двигателя по времени, $K_{дв} = 0,7$;

$K_{дм}$ – коэффициент загрузки двигателя по мощности, $K_{дм} = 0,82$;

$\eta_{дв}$ – КПД электродвигателя, $\eta_{дв} = 0,65$.

Удельное энергопотребление $K_э$:

- при использовании стандартной бабы молота

$$K_{э1} = 75 \cdot 0,7 \cdot 0,82 / 0,65 \cdot 613 = 0,110 \text{ кВтч / кг}$$

- при использовании бабы молота с наполнителем

$$K_{э2} = 75 \cdot 0,7 \cdot 0,82 / 0,65 \cdot 680 = 0,097 \text{ кВтч / кг}$$

Снижение энергопотребления при горячей объемной штамповке прямо пропорционально повышению производительности штамповки (при неизменных N , $K_{дв}$, $K_{дм}$, $\eta_{дв}$).

Экономия электроэнергии составила:

$$\Delta_э = (1 - K_{э2} / K_{э1}) \cdot 100 = (1 - 0,097 / 0,110) \cdot 100 = 12\%$$

Таким образом, при использовании бабы молота с наполнителем при неизменной мощности электродвигателя имеет место снижение удельного энергопотребления на 12%.

Удельное потребление сжатого воздуха

$$K_{эв} = qв / Q,$$

где $qв$ - производительность компрессора (давление 6-7 атм.), $qв = 1050 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Удельное потребление сжатого воздуха $K_{эв}$:

- при использовании стандартной бабы молота

$$K_{эв} = 1050 / 613 = 1,71 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

- при использовании бабы молота с наполнителем

$$K_{эв} = 1050 / 680 = 1,54 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Таким образом, снижение удельного потребления сжатого воздуха составило 11% при использовании бабы молота с наполнителем.

Выводы

Проведенный расчет экономической эффективности использования бабы с наполнителем штамповочного молота модели М2140 с массой падающих частей 1000 кг при горячей объемной штамповке поковок «Угольник» из стали 12Х2НВФА, проведенной в кузнечном цехе АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», позволил установить:

- уменьшение общего количества ударов молота при использовании бабы молота с наполнителем по сравнению с использованием стандартной бабой молота в 1,2 раза при полном соответствии размеров поковок требованиям чертежа;

- снижение нормы штучного времени на штамповку при использовании бабы молота с наполнителем на 11%;

- снижение удельного энергопотребления и экономию электроэнергии при использовании бабы молота с наполнителем на 12%;

- снижение удельного потребления сжатого воздуха при использовании бабы молота с наполнителем на 11%.

Список литературы

1. Лавриненко В.Ю. Повышение энергоэффективности кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т.16. №11. С. 502-508.

2. Лавриненко В.Ю., Чекалов В.П., Аюпов Т.Х. Применение бабы молота с наполнителем для модернизации штамповочного молота с массой падающих частей 1000 кг // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 1. С. 21-24.

3. Лавриненко В.Ю., Аюпов Т.Х. Промышленные испытания бабы с наполнителем штамповочного молота на АО «ММЗ «Авангард» // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Том 18. № 1. С. 19-22.

4. Лавриненко В.Ю., Аюпов Т.Х. Расчет экономической эффективности промышленного использования бабы с наполнителем штамповочного молота М2140 // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Том 18. №6. С. 262-266.

5. Патент на полезную модель РФ № 182268. Баба молота №1 / Лавриненко В.Ю. и др. опубл. 09.08.2018 Бюл. № 22.

6. Патент на полезную модель РФ № 182269. Баба молота №2 / Лавриненко В.Ю. и др. опубл. 09.08.2018 Бюл. № 22.

7. Патент на полезную модель РФ № 199522. Баба молота / Аюпов Т.Х., Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Шагалеев Р.Р., Изикаева А.И., Кошелев О.В., Чекалов В.П., Чекалов В.В. опубл. 07.09.2020. Бюл. №25.

Лавриненко В.Ю. д.т.н., заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Аюпов Т.Х., к.т.н., АО «Московский машиностроительный завод «Авангард»

UDC 621.7

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF FORGING AND STAMPING HAMMERS BY USING
A HAMMER HEAD WITH A FILLERS

Lavrinenko V., Ayupov T.

The data of calculation of economical efficiency of industrial application of ram with fillets of forging hammer model M2140 with drop mass 1000 kg in Moscow plant «Avangard» is presented.

Key words: forging hammer, ram of hammer with fillets, hammer capacity power usage

Bibliography

1. Lavrinenko V.YU. Povyshenie energoeffektivnosti kuznechno-shtampovochnogo oborudovaniya udarnogo dejstviya // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2018. T.16. №11. S. 502-508.
2. Lavrinenko V.YU. CHEkalov V.P. Ayupov T.H. Primenenie baby molota s napolnitelem dlya modernizacii shtampovochnogo molota s massoj padayushchih chastej 1000 kg // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2018. T. 16. № 1. S. 21-24.
3. Lavrinenko V.YU., Ayupov T.H. Promyshlennye ispytaniya baby s napolnitelem shtampovochnogo molota na AO «MMZ «Avangard» // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2020. Tom 18. № 1. S. 19-22.
4. Lavrinenko V.YU., Ayupov T.H. Raschet ekonomicheskoy effektivnosti promyshlennogo ispol'zovaniya baby s napolnitelem shtampovochnogo molota M2140 // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2020. Tom 18. №6. S. 262-266.
5. Patent na poleznuyu model' RF № 182268. Baba molota №1 / Lavrinenko V.YU.i dr. opubl. 09.08.2018 Byul.№ 22.
6. Patent na poleznuyu model' RF № 182269. Baba molota №2 / Lavrinenko V.YU.i dr. opubl. 09.08.2018 Byul.№ 22.
7. Patent na poleznuyu model' RF № 199522. Baba molota / Ayupov T.H., Lavrinenko V.YU., Semenov I.E., SHagaleev R.R., Izikaeva A.I., Koshelev O.V., CHEkalov V.P., CHEkalov V.V. opubl. 07.09.2020. Byul. №25.

УДК 621.3(075)+519.179

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД
В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ГРАФОСТРУКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ**

Блюмин С.Л.

Россия, Липецк, ЛГТУ

Нетрадиционное использование комплексных чисел в матрицах инцидентности, смежности и лапласианах графов охарактеризовано и проиллюстрировано примерами в сравнении с традиционным подходом, не использующим комплексные числа.

Ключевые слова: теоретическая электротехника, комплексный метод, матричное графоструктурное моделирование, каноническое соотношение, спектр графа, сравнительный анализ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 19-47-480003-р_а.

Эффективность использования комплексных чисел в теоретической электротехнике хорошо известна специалистам. Достаточно указать § 5.1. «Комплексный метод» и ряд последующих параграфов Главы 5 Тома 1 фундаментального учебника [1]. В этом же учебнике, начиная с § 3.10. «Топологические понятия схемы электрической цепи. Граф схемы», развито использование графового метода в теоретической электротехнике. Естественно, в дальнейшем изложении комплексный и графовый методы сочетаются. Не вдаваясь здесь в подробности, также хорошо известные специалистам, следует отметить, что

важные для задач электротехники матричные характеристики графов электрических цепей – матрицы узловых соединений, контуров, сечений – хотя и тесно связаны, но несколько отличаются от стандартных матричных характеристик графовых структур – матриц инцидентности, смежности, валентности и лапласианов [2]. Так, на стр. 155 в [1] приведена, причем даже без названия, матрица инцидентности соответствующего графа, но уже на следующей странице она заменяется отличной от нее матрицей узловых соединений, которая активно используется в дальнейшем, тогда как упомянутая собственно матрица инцидентности не используется. Следует отметить также, что, как в теоретической электротехнике, так и в стандартной теории графов, в указанных выше матрицах комплексные числа традиционно не использовались.

Нетрадиционное использование комплексных чисел в матричных характеристиках графовых структур возникло сравнительно недавно и имеет определенные перспективы.

Цель данной работы – охарактеризовать и проиллюстрировать примерами нетрадиционное использование комплексных чисел в матричных характеристиках графовых структур в сравнении с традиционным подходом, не использующим комплексные числа.

В матричном графоструктурном моделировании [2] систематически используются, как при теоретических исследованиях, так и при практических применениях графовых структур, их матричные характеристики – матрицы инцидентности I , валентности D , смежности A и лапласианы L – с контролем расчетов на основе канонического соотношения типа

$$L = I \cdot I^* = D + (A), \quad (1)$$

в котором знак * означает транспонирование в случае использования действительных чисел и эрмитово сопряжение в случае использования комплексных чисел, а матрица (A) может быть собственно A или $-A$ или распадаться в алгебраическую сумму некоторых матриц, связанных с матрицей смежности.

Охарактеризуем нетрадиционное использование комплексных чисел в матричном графоструктурном моделировании в контексте матричных характеристик графов.

Работы [3,4] (2021 г.) являются одними из последних, в которых комплексные числа с единичным модулем используются в матричных представлениях графов, а именно в эрмитовых матрицах смежности смешанных графов. В [4] указана немного более ранняя работа [5] (2019 г.), в которой исследуется альтернативное определение эрмитовых матриц смежности смешанных графов. Одной из первых и более общих работ, использующих комплексные числа в матричных представлениях орграфов, является, по-видимому, [6] (2011 г.), в которой сказано: «В этой работе автор надеется заложить основы изучения спектров, ассоциированных с использованием комплексных чисел с единичным модулем в качестве весов дуг орграфов». Ряд работ, промежуточных между 2011 и 2021 гг., указаны в [3-5].

Одной из причин, мотивирующих использование комплексных чисел с единичным модулем в матричных характеристиках орграфов, послужило то, что обычные матрицы смежности орграфов несимметричны, из-за чего возникают некоторые проблемы изучения их спектров – наборов собственных чисел; таких проблем нет при изучении собственных чисел симметричных обычных матриц смежности неорграфов. Надлежащее использование комплексных чисел в случае орграфов приводит к эрмитовым матрицам смежности, с которыми также нет упомянутых проблем.

Следует отметить, что упомянутые проблемы не возникают при изучении спектров не обычных матриц смежности, а обычных лапласианов орграфов, которые симметричны, что позволяет обходиться без привлечения комплексных чисел.

Рассмотрим использование комплексных чисел в матричных характеристиках орграфов в сравнении с традиционным подходом, не использующим комплексные числа. Для большей

наглядности ограничимся простейшими примерами. Полученные выводы справедливы для более общих графов.

В [3-5] вводятся и исследуются эрмитовы матрицы смежности, получаемые подходящим введением мнимой единицы i сначала в матрицы инцидентности, а затем, вследствие канонического соотношения, в лапласианы и входящие в них матрицы смежности.

Для иллюстрации возникающих особенностей достаточно рассмотреть простейшие орграфы, имеющие три вершины и две или три дуги.

Пример 1.

Орграф $G=(V,A)$, $V=\{1,2,3\}$ – вершины, $A=\{a_1=(1,2), a_2=(2,3)\}$ – дуги.

Стандартные, в соответствии с традиционным подходом, не использующим комплексные числа, матрица инцидентности, лапласиан, матрицы смежности и валентности:

$$\begin{aligned}
 I \cdot I^T &= \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = L = \\
 &= D + (-A) = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \left(- \begin{bmatrix} & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь A – симметричная матрица смежности неорграфа, ассоциированного с данным орграфом, сумма несимметричной матрицы смежности орграфа с ее транспонированной.

Нестандартные, в соответствии с нетрадиционным подходом, использующим комплексные числа (-1 заменяется на i), матрица инцидентности, лапласиан, матрицы смежности и валентности:

$$\begin{aligned}
 \tilde{I} \cdot \tilde{I}^* &= \begin{bmatrix} i & 0 \\ 1 & i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i & 1 & 0 \\ 0 & -i & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & i & 0 \\ -i & 2 & i \\ 0 & -i & 1 \end{bmatrix} = \tilde{L} = \\
 &= D + \tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} & i & \\ -i & & i \\ & -i & \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь \tilde{A} – эрмитова матрица смежности, $(\tilde{A})^* = \tilde{A}$. Таким образом, матрицы валентности совпадают, но матрицы смежности различаются.

Несмотря на это, характеристические многочлены совпадают:

$$\begin{aligned}
 \chi(L) &= \begin{vmatrix} 1-\lambda & 1 & 0 \\ 1 & 2-\lambda & -1 \\ 0 & -1 & 1-\lambda \end{vmatrix} = (1-\lambda)^2 \cdot (2-\lambda) - 2 \cdot (1-\lambda), \\
 \chi(\tilde{L}) &= \begin{vmatrix} 1-\lambda & i & 0 \\ -i & 2-\lambda & i \\ 0 & -i & 1-\lambda \end{vmatrix} = (1-\lambda)^2 \cdot (2-\lambda) - 2 \cdot (1-\lambda).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Поэтому совпадают и спектры: 0, 1, 3.

Пример 2.

Орграф $G=(V,A)$, $V=\{1,2,3\}$ – вершины, $A=\{a_1=(1,2), a_2=(2,3), a_3=(3,1)\}$ – дуги.

Стандартные матрица инцидентности, лапласиан, матрицы смежности и валентности:

$$\begin{aligned}
I \cdot I^T &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} = L = \\
&= D + (-A) = \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{bmatrix} + \left(- \begin{bmatrix} & 1 & 1 \\ 1 & & 1 \\ 1 & 1 & \end{bmatrix} \right). \tag{5}
\end{aligned}$$

Нестандартные матрица инцидентности, лапласиан, матрицы смежности и валентности:

$$\begin{aligned}
\tilde{I} \cdot \tilde{I}^* &= \begin{bmatrix} i & 0 & 1 \\ 1 & i & 0 \\ 0 & 1 & i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i & 1 & 0 \\ 0 & -i & 1 \\ 1 & 0 & -i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & i & -i \\ -i & 2 & i \\ i & -i & 2 \end{bmatrix} = \tilde{L} = \\
&= D + \tilde{A} = \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} & i & -i \\ -i & & i \\ i & -i & \end{bmatrix}. \tag{6}
\end{aligned}$$

В этом примере, в отличие от предыдущего, характеристические многочлены не совпадают:

$$\begin{aligned}
\chi(L) &= \begin{vmatrix} 2-\lambda & -1 & -1 \\ -1 & 2-\lambda & -1 \\ -1 & -1 & 2-\lambda \end{vmatrix} = (2-\lambda)^3 - 2 - 3 \cdot (2-\lambda), \\
\chi(\tilde{L}) &= \begin{vmatrix} 2-\lambda & i & -i \\ -i & 2-\lambda & i \\ i & -i & 2-\lambda \end{vmatrix} = (2-\lambda)^3 - i + i - 3 \cdot (2-\lambda) = (2-\lambda) \cdot [(2-\lambda)^2 - 3]. \tag{7}
\end{aligned}$$

Поэтому различаются и спектры.

Необходимо указать, что в графоструктурном моделировании [2] обычные графы являются простейшими графовыми структурами, а основное внимание уделяется развивающим их более общим и гибким графовым структурам – гиперграфам, метаграфам и некоторым другим, использование которых в теоретической электротехнике является перспективным. В работе [7] (2020 г.), одним из авторов которой является автор [6], предпринята попытка распространения указанного выше подхода использования комплексных чисел на матричные представления гиперграфов.

Необходимо подчеркнуть, что ещё в 2010 г. в работе [8] заложены основы подхода к ориентации гипердуг оргигерграфов, при котором недостаточно использовать числа ± 1 , а предложено использовать наборы комплексных корней подходящих степеней из единицы. При этом матрицы смежности и лапласианы оказываются эрмитовыми и проблемы при изучении их спектров не возникают – в [8] представлена таблица таких спектров.

Аналог канонического соотношения для оргигерграфа OH :

$$\begin{aligned}
L(OH) &= I(OH) \cdot I(OH)^* = D + A = \\
&= \sum_{ha \in HA} P(ha)^0 + \sum_{ha \in HA} \left(\sum_{k(d(ha)=1)}^{d(ha)-1} \left(\varepsilon_{d(ha)}(ha) \cdot P(ha)^k(ha) \right) \right). \tag{8}
\end{aligned}$$

В контексте данной работы следует указать, что здесь $\varepsilon_{d(ha)}(ha) = \exp(2\pi i / d(ha))$ – комплексные корни из единицы степени $d(ha)$, равной валентности гипердуги ha оргигерграфа OH , а остальные элементы данной формулы объяснены в [8].

В заключение отметим, что в работе [9] предложен метод применения многозначных нейронных сетей для решения задач математического моделирования и управления технологическими процессами в системах автоматизации промышленных установок; многозначные

нейронные сети основаны на многозначной пороговой логике, использующей в соответствии с [10] кодирование значений многозначных логических функций комплексными корнями подходящих степеней из единицы.

Список литературы

1. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. Т. 3 - 4-е изд. [Текст] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. –СПб.: Питер, 2003.–463 с.
2. Блюмин, С.Л. Развитие методов графоструктурного моделирования и анализа конечных изменений: учебное пособие [Текст] / С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова, Н.Ю. Жбанова, А.С. Сысов. – Липецк: ЛГТУ, 2021. – 108 с.
3. Kadyan, M. Bhattacharjya B. Switching equivalence of Hermitian adjacency matrix of mixed graphs [Text] / M. Kadyan, B. Bhattacharjya // arXiv:2103.13632, 25 Mar 2021, 18 p.
4. Abudayah, M. Hermitian Adjacency Matrices of Mixed Graphs [Text] / M. Abudayah, O. Alomari, T. Sander // arXiv:2103.16969, 31 Mar 2021, 18 p.
5. Mohar, M. A new kind of Hermitian matrices for digraphs [Text] / M. Mohar // arXiv:1909.10878, 20 Sep 2019, 8 p.
6. Reff, N. Spectral properties of complex unit gain graphs [Text] / N. Reff. // arXiv:1110.4554, 15 Nov 2011, 13 p.
7. Mulas, R. Spectra of Complex Unit Hypergraphs [Text] / R. Mulas, N. Reff. // arXiv:2011.10458, 20 Nov 2020, 16 p.
8. Блюмин, С.Л. Полные гиперграфы. Спектры лапласианов. Мультиагентные системы [Текст] / С.Л. Блюмин // Управление большими системами. – 2010. - № 30. – С. 5-23.
9. Мещеряков, В.Н. Математическое моделирование и управление процессами в системах автоматизации промышленных установок с помощью многозначных нейронных сетей [Текст] / В. Н. Мещеряков, О. В. Мещерякова, П. В. Сараев // Проблемы управления. – 2013. - № 6. – С. 71–75.
10. Блюмин, С.Л. Пороговые многозначные функции [Текст] / С.Л. Блюмин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. –1972. –№ 1. –С. 101–108.

Блюмин Семен Львович, д.ф.-м.н., проф., Липецкий государственный технический университет, профессор кафедры прикладной математики, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30, sabl@lipetsk.ru, (4742)328050

UDC 621.3(075)+519.179

COMPLEX METHOD IN THEORETICAL ELECTROTECHNICS AND GRAPHOSTRUCTURAL MODELING

Blyumin S.

Russia, Lipetsk, LSTU

Untraditional using of complex numbers in incidence, adjacency, Laplacian matrices of graphs is characterized and illustrated by examples in the comparison with traditional approach which not use the complex numbers.

Key words: theoretical electrical engineering, complex method, matrix graphostructural modeling, canonical correlation, spectra of graphs, comparative analysis.

Bibliography

1. Demirchyan, K.S. Teoreticheskieosnovyelektrotehniki: uchebnikdlyavuzov. T. 3 – 4th izd. [Text] / K. S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin. –SPb.: Piter, 2003.–463 p.
2. Blyumin, S.L. Razvitiemetodovgrafostrukturogomodelirovaniyaianalizakonechnykhizmeneniy: uchebnoeposobie [Text] / S.L. Blyumin, G.S. Borovkova, N.Yu. Zhbanova, A.S. Sysoev. – Lipetsk: LGTU, 2021. – 108 p.
3. Kadyan, M. Bhattacharjya B. Switching equivalence of Hermitian adjacency matrix of mixed graphs [Text] / M. Kadyan, B. Bhattacharjya // arXiv:2103.13632, 25 Mar 2021, 18 p.
4. Abudayah, M. Hermitian Adjacency Matrices of Mixed Graphs [Text] / M. Abudayah, O. Alomari, T. Sander // arXiv:2103.16969, 31 Mar 2021, 18 p.

5. Mohar, M. A new kind of Hermitian matrices for digraphs [Text] / M. Mohar // arXiv:1909.10878, 20 Sep 2019, 8 p.
6. Reff, N. Spectral properties of complex unit gain graphs [Text] / N. Reff. // arXiv:1110.4554, 15 Nov 2011, 13 p.
7. Mulas, R. Spectra of Complex Unit Hypergraphs [Text] / R. Mulas, N. Reff. // arXiv:2011.10458, 20 Nov 2020, 16 p.
8. Blyumin, S.L. Polnye gipergrafy. Spektry Laplasianov. Mul'tiagentnye sistemy [Text] / S.L. Blyumin // Upravlenie bol'shimi sistemami. – 2010. - № 30. – P. 5-23.
9. Meshcheryakov, V.N. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie processami v sistemah avtomatizacii promyshlennyh ustanovok s pomoshchyu mnogoznachnyh neyronnyh setey [Text] / V.N. Meshcheryakov, O. V. Meshcheryakova, P. V. Saraev // Problemy upradkeniya. – 2013. - № 6. – P. 71–75.
10. Blyumin, S.L. Porogovye mnogoznachnye funkcii [Text] / S.L. Blyumin // Izvestiya AN SSSR. Tehnicheskaya kibernetika. –1972. –№ 1. –P. 101—108.

Blyumin Semen L'vovich, D.Sc. Ph.-Math., prof., Lipetsk State Technical University, prof. of applied mathematics department, 398055, Lipetsk, Moskovskaya 30, sabl@lipetsk.ru, (4742)328050.

УДК 51.74

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ И ФИЛЬТРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ОКРЕСТНОСТНЫХ СИСТЕМ

Сёмина В.В., Мишачев Н.М., Шмырин А.М.

Россия, г. Липецк, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)

Рассмотрена актуальная задача разработки и системного анализа новых классов, слабосвязанных окрестностных моделей, описывающих сложные производственные процессы. В качестве примера описана окрестностная модель системы вентиляции и фильтрации воздуха в цехе обжига цементного клинкера. Предложен алгоритм декомпозиции окрестностной структуры двойной системы, позволяющий значительно уменьшить количество идентифицируемых параметров модели. В контексте алгоритма декомпозиции рассмотрены задачи управления двойными слабосвязанными системами и задачи их оптимизации. Преимуществом использования слабосвязанных окрестностных систем является сокращение размерности задачи параметрической идентификации, а также возможность найти оптимальный режим управления микроклиматом в производственном помещении, позволяющий снизить расход электроэнергии.

Ключевые слова: окрестностная структура, окрестностная система, слабосвязанные системы, энергосбережение, структурная идентификация, параметрическая идентификация.

Одним из перспективных направлений решения задач структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем является окрестностное моделирование систем управления. Синтез окрестностной модели сложного производственного объекта или процесса основан, как правило, на системном анализе связей между составляющими его частями или узлами. Особенностью использования метода окрестностного моделирования для описания достаточно сложных объектов является наличие большого количества параметров (коэффициентов) синтезируемой системы управления, подлежащих идентификации. Поскольку, соответственно, для идентификации в таком случае требуется много данных, актуальной является задача поиска, возможностей уменьшения числа параметров. В работе данная задача решается для окрестностных моделей двух слабосвязанных процессов.

Под окрестностной структурой понимается оргграф с наборами переменных в вершинах. Окрестностная система – это система уравнений, соответствующих вершинам окрестностной структуры, при этом входящие дуги задают множество переменных, участвующих в уравнении.

В работах [1, 2] введен термин «параллельные» окрестностные системы, описывающий две окрестностные системы, которые заданы над одной окрестностной

структурой, а также термин «слабосвязанные» параллельные окрестностные системы, определяющий системы, в которых количество глобальных переменных можно считать малым по смыслу рассматриваемой задачи. Для формализации определения введено понятие мультииндекса двойной системы [1]. На основе рассмотрения примеров абстрактных систем можно сказать, что наличие порядка 30% глобальных переменных делает возможным сокращение количества идентифицируемых параметров примерно в 2 раза в линейном случае.

В процессе производства цемента в связи с неоптимальной работой системы аспирационно-обеспыливающей вентиляции в цехе обжига цементного клинкера существует проблема превышения допустимой концентрации пыли в цехе и в окружающей среде. Очистка воздуха от пыли осуществляется с помощью электрофильтров, что вносит существенную долю в расход электроэнергии наряду с кондиционированием воздуха. В зависимости от типа системы фильтрации ее эффективность составляет 70-95 %.

В производственном помещении необходимо обеспечить соответствующий СанПиН микроклимат, который способствует повышению работоспособности персонала, для этого следует оптимально организовать работу системы вентиляции, фильтрации и кондиционирования.

Достичь энергосбережения системы вентиляции и максимальной производительности вращательных цементных печей возможно путем нахождения оптимальных режимов работы для системы вентиляции, фильтрации и кондиционирования воздуха, которая связана с технологическим процессом, а именно в данной задаче с процессом обжига клинкера.

Рассмотрим окрестностную структуру системы управления производственной вентиляцией и фильтрацией воздуха в помещении, в воздух рабочей зоны которого могут выделяться вредные вещества. Этот процесс, включает фильтрацию воздуха от пыли и кондиционирование воздуха (нагрев/охлаждение воздуха), поэтому соотв. окрестностную систему можно считать двойной.

В простом случае окрестностная структура состоит из четырёх узлов – вершин ориентированного графа, из которых три узла состояния (обозначены кругами на рисунке 1) и один узел входа и выхода (обозначены квадратами). Ориентированные рёбра графа соответствуют материальным потокам (воздух) и информации.

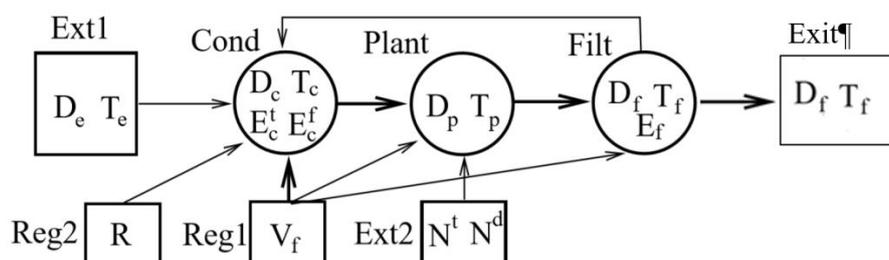


Рисунок 1 – Окрестностная структура системы управления производственной вентиляцией и фильтрацией

Верхние индексы переменных t и d соответствуют температуре и содержанию пыли, индекс f связан с приточной вентиляцией и фильтрацией воздуха. Входы Ext1, Ext2 – неуправляемые, Reg1, Reg2 – управляемые. Вершины, их тип и переменные – приведены в таблице 1.

В данном исследовании сначала определим переменные управления, оставшиеся переменные будут состояниями. Если значение переменной может быть изменено «поворотом регулятора», то данная переменная имеет тип «управление». В задаче окрестностного моделирования системы управления микроклимата управлениями будут являться переменные E_c^d, E_c^t, E_f и R .

С другой стороны в качестве управлений вместо переменных E_c^d, E_c^t, E_f можно взять переменные T_c, D_c, D_f , учитывая простейшие обратные связи $E_c^t \triangleright \triangleleft T_c, E_c^f \triangleright \triangleleft D_c$ и $E_f \triangleright \triangleleft D_f$,

которые реализованы физическими устройствами. Принимая во внимание более длинные обратные связи, переменные T_p или D_p можно определить как управления, также это возможно и с другими переменными. Некоторые из переменных не могут быть определены как переменные управления, а именно T_e , D_e , N^t , N^d и N . Все они являются переменными состояния.

Таблица 1 – Описание вершин окрестностной структуры

| Вершина | Тип | Переменные |
|------------|-------|--|
| Ext1 | Вход | D_e – концентрация пыли в приточном воздухе, T_e – температура приточного воздуха. |
| Cond | Узел | D_c – концентрация пыли после фильтрации, T_c – температура воздуха, E_c^d – расход энергии в единицу времени на фильтрацию, E_c^t – расход энергии в единицу времени на кондиционирование воздуха. |
| Plant | Узел | T_p – установившаяся температура в цехе, D_p – установившаяся концентрация пыли в цехе. |
| Filt | Узел | D_f – концентрация пыли после фильтрации, T_f – температура воздуха после фильтрации, E_f – расход энергии в единицу времени на вытяжку и фильтрацию. |
| Ext2 | Вход | N^t – интенсивность тепловыделения (глобальная переменная), N^d – интенсивность пылеобразования (глобальная переменная) |
| Reg1, Reg2 | Вход | V_f – объем кондиционируемого воздуха в единицу времени (глобальная переменная), R – коэффициент рециркуляции (глобальная переменная). |
| Exit | Выход | D_f – концентрация пыли после фильтрации, T_f – температура воздуха после фильтрации. |

Интенсивность тепловыделения N^t и интенсивность пылеобразования N^d являются внешними входами и не управляемыми, но в глобальном смысле в эти переменные управляемы в иерархической окрестностной структуре производства.

Применим к данной системе алгоритм декомпозиции и агрегирования, описанный в [2]. В результате получим структуру на рисунке 2 из двух слабосвязанных систем 1 – фильтрации и 2 – вентиляции, которые связаны только по управлениям V_f и R и по критерию оптимальности E , представленном на плакате.

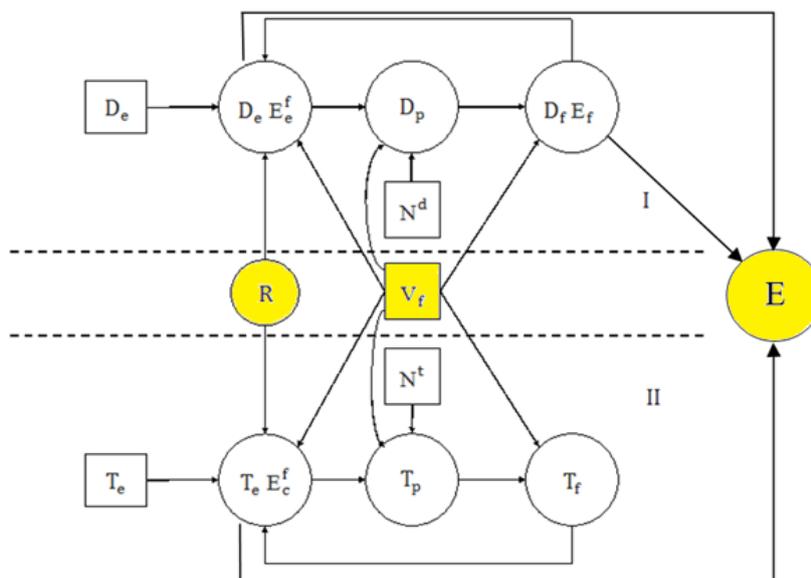


Рисунок 2 – Декомпозиция и агрегирование окрестностной системы

В структуру, представленную на рисунке 2 введем еще один узел E , характеризующий критерий оптимальности для системы вентиляции, кондиционирования и фильтрации воздуха:

$$E = E_c^t + E_c^f + E_f \rightarrow \min$$

На данном этапе системного анализа целью является упрощение системы на абстрактном уровне. В процессе структурной идентификации системы, описывающей два слабосвязанных процесса, необходимо выполнить декомпозицию – представление системы в виде двух слабосвязанных систем. В этой декомпозиции мы фактически имеем дело не с системами уравнений (так как они еще не сформулированы), а с окрестностной структурой процесса и пытаемся разделить процесс, моделируемый этой структурой, на два слабосвязанных. В частности, на этом этапе нужно разделить все переменные на локальные и глобальные. Это наиболее трудная и, как правило, не формализуемая часть задачи, даже в тех случаях, когда наличие параллельных процессов не вызывает сомнений.

В линейной реализации нерасщепленной окрестностной системы [1], представленной на рисунке 1, содержится 82 коэффициента, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации. В расщепленной системе или, точнее, в двух слабосвязанных системах [1] количество таких коэффициентов уменьшается до 49.

В билинейном случае количество параметров до декомпозиции составит – 427, после – 102 (1 подсистема) и 48 (2 подсистема), т.е. всего 150 параметров после декомпозиции. Таким образом, предложенный алгоритм декомпозиции и агрегирования сократит количество идентифицируемых параметров почти в 3 раза в билинейном случае.

В рамках теории окрестностных систем никаких ограничений на тип уравнений не существует, но обычно рассматриваются линейные или билинейные уравнения.

Далее использование простых физических соображений позволило дополнительно сократить количество уравнений в слабосвязанных системах после декомпозиции [2] и конкретизировать трилинейную аналитическую модель, в которой количество идентифицируемых параметров уменьшилось до 9. На данном этапе была учтена информация, связанная с физическим смыслом уравнений, а именно: использовано уравнение баланса объемов приточного и удаляемого воздуха; D_p , D_f , D_c удалось объединить в одно уравнение, введением новой переменной для первой подсистемы; T_p и T_c объединили в одно уравнение для второй подсистемы; уравнение T_f для примера цементного производства (и других подобных) можно не использовать, так как для удаляемого воздуха важно только его пылесодержание, но не температура.

Идентифицируем разработанные окрестностные модели слабосвязанных подсистем вентиляции и фильтрации для задачи управления, микроклимата цеха обжига клинкера АО «ЛипецкЦемент» по экспериментальным данным за календарный год. Модели для каждого сезона наилучшим образом соответствуют сезонным изменениям погоды, в качестве примера рассмотрим модели для летнего периода.

Модель фильтрации:

$$\begin{cases} E_c^f = 0.091V_f + 0.096(V_c S(D_e - D_c) + RV_f S(D_f - D_c)), \\ D_p = \hat{D}_c + 0.1838N^d - 0.0001V_f, \\ E_f = 0.089V_f(D_p - D_f) + 0.002V_f. \end{cases}$$

Модель вентиляции:

$$\begin{cases} T_p = T_c + 5.519N - 0.00025V_f, \\ E_c^t = 25.951V_f |(1-R)(T_e - T_c) + R(T_p - T_c)|. \end{cases}$$

Средняя ошибка аппроксимации для каждого уравнения сезонных моделей приведена в таблице 2, она не превышает установленных производством требований и свидетельствует о хорошем качестве моделей.

Таблица 2 – Средняя ошибка аппроксимации для моделей

| Сезон | Средняя ошибка аппроксимации, % | | | | |
|----------|---------------------------------|-------|---------|-------|---------|
| | E_f | D_p | E_c^f | T_p | E_c^t |
| Зимний | 0,855 | 0,147 | 0,905 | 0,246 | 1,05 |
| Весенний | 0,698 | 0,647 | 0,878 | 0,274 | 0,974 |
| Летний | 0,885 | 0,564 | 0,877 | 0,244 | 0,989 |
| Осенний | 0,789 | 0,598 | 0,606 | 0,206 | 0,62 |

Решим задачу поиска минимума функции, суммарных затрат электроэнергии в области определения ее аргументов с помощью градиентных численных методов в математическом пакете RТСMathCAD.

На основе оптимальных управлений V_f и R рассчитано оптимальное энергопотребление, график которого представлен на рисунке 3.

Суммарные значения энергозатрат за сезон приведены в таблице 3. Процент экономии составил порядка 3% за сезон, что в экономическом плане на дату расчетов эквивалентно 1,5 млн. руб.

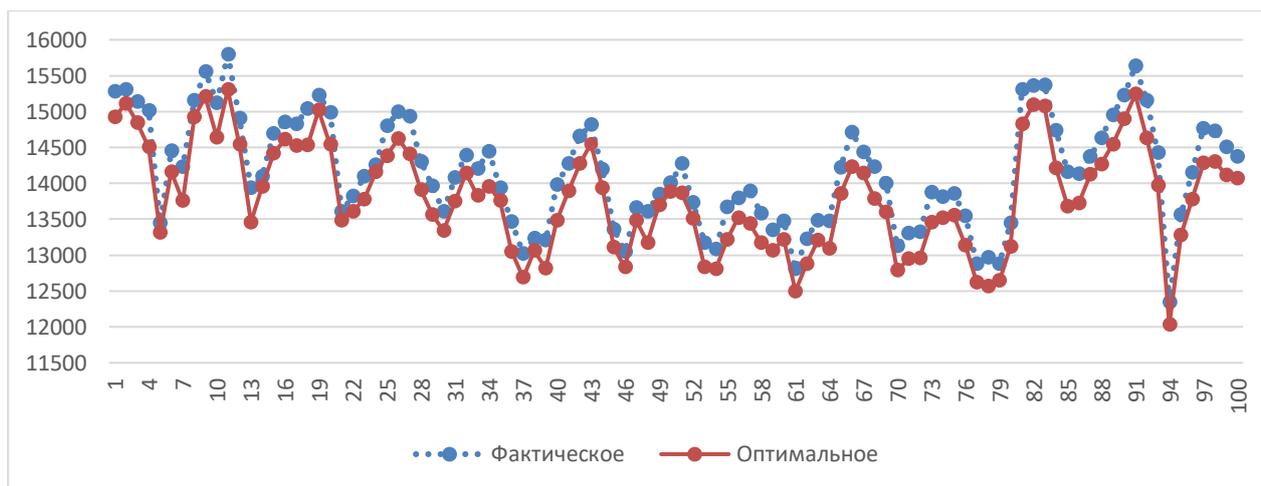


Рисунок 3 – График общего расхода энергии и фактических данных (кВт·ч)

Таблица 3 – Экономия электроэнергии с использованием окрестностных моделей

| Сезон | Фактическое значение, кВт·ч | Рассчитанное значение, кВт·ч | Процент экономии электроэнергии, % | | | |
|----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------|---------|---------|
| | E | E | E | E_f | E_c^f | E_c^t |
| Зимний | 10815264 | 10492860 | 2,981 | 3,671 | 5,146 | 3,015 |
| Весенний | 886959 | 858612 | 3,196 | 4,449 | 4,489 | 3,590 |
| Летний | 9189215 | 8938257 | 2,731 | 4,945 | 4,852 | 3,251 |
| Осенний | 861484 | 834614 | 3,119 | 4,596 | 4,146 | 3,146 |

Данные результаты показывают, что применение окрестностного подхода к моделированию и решению задачи оптимизации энергопотребления системой вентиляции и фильтрации воздуха позволяет достичь большего эффекта энергосбережения, чем построение математических моделей согласно только физическим законам [3] без выделения слабосвязанных параллельных подсистем.

Выводы

Определены перспективы реализации предложенного алгоритма структурного преобразования окрестностных моделей слабосвязанных процессов, позволяющего уменьшить количество идентифицируемых параметров модели.

Создана окрестностная система управления микроклиматом производственного помещения, разработанная на примере цеха обжига клинкера цементного предприятия, с целью оптимизации энергопотребления и экологических характеристик технологического процесса.

Выполнена параметрическая идентификация окрестностных моделей слабосвязанных процессов вентиляции и фильтрации по экспериментальным данным АО «ЛипецкЦемент».

Рассмотрен достаточно энергоемкий сложный процесс обжига клинкера, для системы управления вентиляцией и фильтрации в цехе решена задача минимизации суммарных затрат энергопотребления с помощью градиентных численных методов, найдены оптимальные управления, позволяющие достичь энергосбережения, сохраняя в норме показатели микроклимата.

Список литературы

1. Сёмина, В.В. Идентификация слабосвязанных окрестностных систем / В.В. Сёмина // Вестник ВГТУ. 2019. № 2. С. 69-75.
2. Semina, V.V. Weakly Connected Neighborhood Systems / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia, 2019. pp. 1-6.
3. Правильникова, В.В. Автоматизированная система управления вентиляцией в помещении плавательного бассейна / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин, П.В. Сараев, А.К. Погодаев // Сборник материалов X Международной научно-практической интернет-конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК ", 15 марта - 30 июня 2012. Орел: ОрГТУ, 2012. С. 16-19.

Сёмина Валерия Владимировна, старший преподаватель кафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. E-mail: pravilnik@mail.ru

Шмырин Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. E-mail: amsh@mail.ru

Мишачев Николай Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики ЛГТУ, 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30. E-mail: nmish@lipetsk.ru

UDC 51.74

COMPLEX INVESTIGATIONS OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF DEPOSITION OF DIFFERENT HEAT-RESISTANT LAYERS FOR HEAT-STRENGTHENED DETAILS OF GTE TURBINS

Semina V.V., Shmyrin A.M., Mishachev N.M.

Russia, Moscow, Lipetsk State Technical University (LSTU)

The actual problem of developing new classes of models based on the neighborhood approach, which describe complex production processes, is considered. As an example, a neighborhood model of the ventilation and air filtration system in the cement clinker firing workshop is described. An algorithm for the decomposition and of the neighborhood structure of a binary system is proposed, which makes it possible to significantly reduce the number of identifiable parameters of the model. The problems of control of double weakly coupled systems and problems of their optimization using the decomposition algorithm are considered. The advantage of using loosely coupled neighborhood systems is the reduction of the dimension of the parametric identification problem, also the ability to find the optimal microclimate control mode in the production premises, which allows to reduce, energy consumption.

Key words: neighborhood structure, neighborhood system, loosely coupled systems, energy saving, structural identification, parametric identification.

Bibliography

1. Semina, V.V. Identification of weakly connected neighborhood systems / V.V. Semina // Bulletin of VSTU. 2019. № 2. P. 69-75.

2. Semina, V.V. Weakly Connected Neighborhood Systems / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia, 2019. pp. 1-6.

3. Pravilnikova, V.V. Automated ventilation control system in the swimming pool premises / V.V. Pravilnikova, S.L. Blumin, P.V. Saraev, A.K. Pogodaev // Proceedings of the X International Scientific and Practical Internet Conference "ENERGY AND RESOURCE SAVINGS - XXI CENTURY", March 15 - June 30, 2012. Oryol: OrGTU, 2012. pp. 16-19.

Semina Valeria Vladimirovna, senior lecturer of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. E-mail: pravilnik@mail.ru

Shmyrin Anatoly Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. E-mail: amsh@mail.ru

Mishachev Nikolai Mikhailovich, Ph.D, associate professor of the department of higher mathematics, Lipetsk State Technical University, 398055, Russia, Lipetsk, st. Moscow, 30. E-mail: nmish@lipetsk.ru

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|---|
| СЕКЦИЯ 1. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ | 7 |
|---|---|

| | |
|---|---|
| Павлов Ю.В., Соколова Е.В. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ | 7 |
|---|---|

| | |
|--|----|
| Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МИКРО-ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ | 16 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Кудрявцев А.Е., Зацепин Е.П. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ УМНЫЙ ДОМ, ЗАПИТЫВАЕМОЙ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ | 18 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ | 22 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Плотников Ю. В. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА..... | 22 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Королева Т.Г., Филатенко М.А. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА | 27 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Чернышов В.А., Лошкарев М.О., Рыков А.А. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДОВ НА ЛЭП 10 КВ | 31 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Чернышов В.А., Рыков А.А., Лошкарев М.О. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОНИТОРИНГА СИЛЫ ТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА НА УЧАСТКАХ ЛЭП 10 КВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ | 36 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Качанов А.Н., Каменский В.В. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ..... | 43 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Филина А. В., Казакова Д. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕЗАПУСКА УСТРОЙСТВА | 48 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ..... | 52 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Птицын Д.В., Птицына Е.В., Кувалдин А.Б. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТЛЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ | 52 |
|---|----|

| | |
|---|-----|
| Мещеряков В.Н., Муравьев А.А., Пикалов В.В., Бойков А.И., Евсеев А.М. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА..... | 58 |
| Бабенко В.В., Крысанов В.Н. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ТИРИСТОРНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ..... | 62 |
| Коренков Д.А., Еремеев В.Д. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАБОЧЕГО КОНДЕНСАТОРА ПРИ ВЧ СУШКЕ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР | 67 |
| СЕКЦИЯ 4. ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ | |
| Халина Т.М., Ведманкин А.В. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ..... | 71 |
| Филина А. В., Носовец А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ | 76 |
| Филина А. В., Андреев Е.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ IGBT МОДУЛЕЙ В СХЕМАХ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ | 81 |
| СЕКЦИЯ 5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ | |
| Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ..... | 87 |
| Фетисов А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РОТОРА НА ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ, СМАЗЫВАЕМЫХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ | 91 |
| Поляков Р.Н., Горин А.В., Бондаренко М.Э., Родичева И.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРНО-ОПОРНОГО УЗЛА МИКРОТУРБИНЫ..... | 96 |
| Стебаков И.Н., Корнаев А.В., Корнаева Е.П. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ | 100 |
| Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Савин Л.А., Шутин Д.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ..... | 105 |
| Вальке А. А., Лобов Д. Г., Шкаев А. Г. ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА ЦВЕТА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПИРОМЕТРЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ..... | 110 |
| Лобанова В.А., Верёвкин В.В., Пилипенко А.П. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА ГРЕЮЩЕГО ТОКА ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИЛОВЫХ IGBT МОДУЛЕЙ..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| СЕКЦИЯ 6. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ | 120 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| Лавриненко В.Ю., Т.Х. Аюпов Т.Х. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОВОЧНЫХ И ШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БАБЫ МОЛОТА С НАПОЛНИТЕЛЕМ | 120 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Блюмин С.Л. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ГРАФОСТРУКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ | 124 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Сёмина В.В., Мишачев Н.М., Шмырин А.М. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ И ФИЛЬТРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ОКРЕСТНОСТНЫХ СИСТЕМ | 129 |
|--|-----|

Научное издание

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

МАТЕРИАЛЫ
XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

10 – 12 ноября 2021 г., г. Орёл

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

Материалы конференции печатаются в авторской редакции

Компьютерная верстка и оригинал-макет – технический секретарь программного комитета МНПК-2021, к.т.н. Коренков Д.А.

Электронный адрес размещения:
<http://myconfs.ru/energoser2021/conferences/info>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95, <http://oreluniver.ru>

Подписано к печати 10.12.2021 г. Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л. 8,69. Тираж 100 экз.
Заказ № ____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95