

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

# ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»

*Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*

№ 56 (1098) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2014

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 56 (1098)

1

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 56 (1098). – 176 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).*

*У квітні 2013 р. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).*

#### **Координаційна рада:**

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитрисенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

#### **Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** І. О. Костиюков, асистент.

**Члени редколегії:** С. Ф. Артюх, д-р техн. наук, проф.; В. Є. Бондаренко, д-р техн. наук,

проф.; Г. В. Безпрозванних, д-р техн. наук, проф.; Ю. М. Веприк, д-р техн. наук, проф.;

О. Г. Гриб, д-р техн. наук, проф.; Г. А. Сендерович, д-р техн. наук, проф.; О. П. Лазуренко,

канд. техн. наук, проф.; К. В. Махотіло, канд. техн. наук, доц.; С. Ю. Шевченко канд.

техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 28 листопада 2014 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

2

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 56 (1098)

**А. Г.ГУРИН**, д-р техн наук, проф. НТУ «ХПИ»

### КАФЕДРЕ «ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ И КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА» - 50 ЛЕТ!

Послевоенные годы стали для Харькова периодом бурного развития электромашиностроения и электроэнергетики, а наряду с этим внедрения новых конструкций и материалов, развития научных исследований. Вопросы электрической изоляции стали одними из основных факторов, определяющих долговечность, надежность, габариты, вес и стоимость широкой номенклатуры изделий электротехнического профиля. Создание отделов электрической изоляции на крупных НИИ и заводах вызвало необходимость открытия в 1950 году на электроэнергетическом факультете специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника».

В 1964 году новая специальность стала основой создания кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника».

Основателем и первым заведующим кафедры ЭИКТ был доцент Багалея Юрий Владимирович (1915-1976 гг.), родственник нашего знаменитого земляка академика Багалея Дмитрия Ивановича. Юрий Владимирович отличался высоким профессионализмом, широкой эрудицией в области электрической изоляции, лекторским мастерством. Под его руководством был создан преподавательский коллектив в составе доцентов Лизунова Л. И., Ильинской Р. С. – специалистов в кабельной технике, Зеленской З. Б. – по измерительным методам в электрической изоляции, Тоцкого В. И. и Бессмертного В. Д. – в области электрической изоляции трансформаторов, электрических машин и материалов, Оболончика И. Б., Старусевой С. Ф. и Щепенюк Л. А. – специалистов в области физики диэлек-



*Юрий Владимирович Багалея  
Основатель и первый заведующий  
кафедры ЭИКТ*

триков, конденсаторов, теории надежности электрической изоляции, статистических методов обработки экспериментальных данных.

Именно в те, 70-е годы формировались основные дисциплины специальности, составляющие ее основу в настоящее время. Это «Электротехнические материалы», «Физика диэлектриков», «Кабельная техника», «Конденсаторная техника», «Расчет и конструирование изоляции», технологические дисциплины «Технология изготовления проводов и силовых кабелей», «Методы испытаний электрической изоляции», «Технология изоляции электрических машин». Для чтения лекций привлекались ученые и специалисты ХФТИ, НИИ «Электротяжмаш», НИИ «ХЭМЗ», завода «Южкабель». Развивается лабораторная база, над созданием которой активно работали Биньков С.В., Слупская В.И., Моисеева (Чернова) Н. А.

Шли годы. Промышленности стали необходимы кадры, умеющие создавать и обслуживать одно из самых автоматизированных производств - кабельное, - сочетать точные расчеты и новые технологии. В учебные планы включаются новые дисциплины: «Математическое моделирование электрической изоляции», «Испытательное оборудование современных изоляционных лабораторий», «Контроль и диагностика электрической изоляции», «Изоляция высоковольтных электрических машин», созданные профессорами кафедры Б. Г. Набокой, Л. А. Щепенюк, доц. Ломовым С. Г.

Важным этапом в жизни кафедры стало внедрение в учебный процесс новых разработок в области создания и эксплуатации кабелей связи, особенно оптоволоконных линий связи. Профессорами Набокой Б. Г. и Беспрозванных А.В. были разработаны новые курсы лекций и лабораторный практикум дисциплин «Физические основы оптоволоконной техники», «Расчет и конструирование оптических кабелей», «Глобальные и локальные кабельные сети», что позволило подготовить инженеров-технологов, конструкторов и исследователей в этом важном направлении для заводов «Южкабель» и «Одескабель», которые обеспечивают до 80% отечественный рынок оптических кабелей.

В настоящее время подготовка специалистов и магистров в этих направлениях проходит в рамках специальности «Техника и электрофизика высоких напряжений» по направлениям «Электроизоляционная и кабельная техника» и «Оптоволоконная техника и кабели связи».

Одной из первых НИР, в которой принимали участие все преподаватели специальности, была разработка короностойкой изоляции

А. Г. Гури, 2014

мощных турбо- и гидрогенераторов. Эта работа проводилась с 1954 по 1958 годы по договорам с НИИ «Электротяжмаш». В результате ее выполнения были предложены материалы по рациональной конструкции полупроводящих покрытий в пазовой и лобовой части обмоток, а также методы их контроля, а аспирант кафедры Маламуд Р. Е. защитила кандидатскую диссертацию.

С момента основания кафедры основным направлением НИР стало создание высоковольтных конденсаторов с твердой пропиткой, способных работать при высоких температурах и давлениях. Это были накопители энергии для космических исследований и оптоэлектронной техники, преобразовательных устройств и фазосдвигающих цепей питания электрооборудования (В. Я. Гладченко, С. В. Биньков, А. В. Зудин, Ю. В. Михайлусь, И. В. Степа, В. М. Исачкова). Эти работы были начаты Багалеем Ю. В. И в дальнейшем проводились под руководством Набоки Б. Г. Вопросы создания таких конденсаторов с бумажной, пленочной и слюдо-бумажной изоляцией, результаты исследований частичных разрядов отражены в докторских диссертациях Б. Г. Набоки и Чан Ки Фука (Вьетнам), а также в кандидатских диссертациях Оболончика И. Б., Старусевой С.Ф., Щепенюк Л. А., Гладченко В. Я., Беспрозванных А. В.

Результаты исследований были изложены в учебнике «Расчет и конструирование конденсаторов» (В. Т. Ренне, Ю. В. Багалея, И. Д. Фридберг, 1966 г.), «Справочник по расчету режимов работы электрических конденсаторов», (О. Л. Мезенин, М. Н. Гураевский, В. В. Коноп, Б. Г. Набока, 1987 г.), в учебно-методических пособиях: «Технологический контроль эпоксидных смол для электроизоляционной техники» (В. Я. Гладченко, А. В. Беспрозванных, Б. Г. Набока), «Физические основы измерений вязкости жидких диэлектриков и показателей текучести расплавов полимеров» (2000 г.) и «Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике» (Б. Г. Набока, 1995 г.) и «Техніка та електрофізика високих напруг» (2005 г.), в котором Б. Г. Набокой подготовлен раздел «Електрофізичні явища в твердій ізоляції при тривалій дії сильних електричних полів» и А. Г. Гуриным «Силові високовольтні електричні кабелі».

В 80–90 годы в СССР и в Украине большое внимание уделялось поискам природных ресурсов – в первую очередь нефти и газа – в осваиваемых районах Восточной Сибири и Красноярского Края, на шельфах Чёрного, Азовского и Балтийского морей, в районе острова Сахалин. Требование было одно – заменить буровзрывные работы, как источник акустических волн в толще Земли и водных бассейнах, но-

вым, экологически чистым источником сейсмических волн. Среди пневматических, газодинамических, ударных, предложенный кафедрой электродинамический источник с емкостным накопителем энергии оказался наиболее приемлемым для этих целей. Руководитель НИР – А. Г. Гурин. Для решения этой непростой задачи сотрудниками кафедры были разработаны передвижные установки ударных импульсов с амплитудой до 100 кН, которые позволяли с поверхности Земли имитировать взрыв, а также генераторы гидроакустических импульсов, способных проникать вглубь донных осадков более чем на 500 м. Среди разработчиков и, главное, исследователей – инженеры, старшие научные сотрудники и преподаватели кафедры: Л. А. Щепенюк, Ю. В. Михайлусь, В. Я. Гладченко, А. В. Выдря, Н. А. Поветкин, Ю. Г. Усиченко, А. В. Ткаченко, И. И. Панов, О. И. Панов, О. А. Литвиненко. Работы проводились по программе НИР ГКНТ «Вибрационное просвечивание Земли» и по межвузовской программе «Шельф» совместно с организациями АН СССР и АН Украины. Результатом этих работ стало создание более 60 передвижных установок ударного действия с емкостными накопителями энергии, которые позволили выполнять до 20 % сейсморазведочных работ в суровых условиях Красноярского края, изучить донные осадки в районе Азово-Черноморского бассейна, изучить экологическую обстановку в районе реки Даугава и шельфа Балтийского моря. По результатам исследований защищена 1 докторская диссертация (А. Г. Гурин) и 3 кандидатские (С. П. Мостовой, Шейх Абубакер Али из Ливии, О. А. Литвиненко).

В настоящее время это научное направление связано с созданием высоковольтных электрофизических устройств для повышения дебита действующих глубоких нефтяных скважин в Украине.



Владимир Михайлович Золотарев,  
выпускник 1998 года, генеральный  
директор ПАО «Южкабель»

Становление кафедры неразрывно связано с ПАО «Завод «Южкабель». Более 20 лет на заводе работает филиал кафедры под руководством д.т.н., профессора кафедры Золотарева В.М. Студенты на филиале слушают лекции ведущих специалистов завода, проводят лабораторные работы в сертифицированных лабораториях, выполняют дипломные проекты. За организацию про-

изводства силовых кабелей до 330 кВ с изоляцией со сшитым полиэти-

леном выпускники кафедры – генеральный директор завода Золотарев В. М., главный инженер, к.т.н. Антоненц Ю. А., советник директора по техническим вопросам, к.э.н. Карпушенко В.П. стали Лауреатами государственной премии Украины в области науки и техники. «Южкабель» – единственный завод на Украине, номенклатура продукции которого превышает 14500 наименований: это силовые кабели до 330 кВ, выпуск оптических кабелей, самонесущих проводов, новых типов эмалированных проводов. Ответственные участки работы завода возглавляют Обозный А. Л., Золотарев В.В., Антоненц Т. Ю. и Антоненц С. Ю. – Лауреаты и кандидаты на соискание премии Президента Украины для молодых ученых. Главное, что кафедра и завод едины во мнении: наука и производство должны поддерживать и дополнять друг друга. Результатом такой работы стало учебное пособие и учебник по кабельной технике (В. П. Карпушенко, Л. А. Щебенюк, А. А. Науменко, Ю.А. Антоненц, 2000 г.), ряд монографий и учебных пособий под редакцией д.т.н. проф. Золотарева В.М.

В настоящее время продукция должна соответствовать международному уровню. Совместно с заводом в 1999 г. на кафедре создан Технический комитет ТК 131 «Электроизоляционная и кабельная техника» Министерства экономического развития и торговли Украины, в состав которого входит 20 организаций, как производителей – кабельные заводы Украины, так и потребителей.

За 1999 – 2005 гг. Комитетом создано более 60 государственных стандартов Украины, адаптированных с международными. Много внимания этому вопросу уделяют преподаватели кафедры: профессор Л. А. Щебенюк – научный секретарь ТК 131, инженер В. А. Данилин, доцент С. Г. Ломов – председатель подкомитета по диагностике изоляционных конструкций и изоляционных материалов.

Важным научным направлением кафедры является создание научных основ изучения процессов старения электрической изоляции в условиях действия сильных электрических полей и радиации. Начатые в 80-е годы работы доц. Оболончиком И. Б., проф. Набокой Б. Г. успешно продолжает проф. Беспрозванных А. В. Исследования, представленные в докторской диссертации «Мониторинг старения много-



*Василь Петрович Карпушенко,  
выпускник 1970 года, советник  
генерального директора  
ПАО «Южкабель»*

жилых кабелей АЭС: теоретические основы и методы сканирования изоляции электрическим полем», находят внедрение при определении остаточного ресурса кабельных сетей атомных электростанций Украины. Решению этих вопросов посвящены кандидатские диссертации доц. А.С. Федяй и Е. С. Москвитина.



*Виктор Кириллович Иванюков,  
выпускник 1978 года, генеральный  
директор ЗАО ЦО «Бердянський  
кабельний завод»*



*Заур Азеркович Божкипер  
выпускник 1959 года, генеральный  
директор ОАО «Завод «Сарансккабель»*

Разработки ученых внедряются при чтении одного из основных курсов «Электротехнические материалы», который постоянно совершенствуется. Большую работу по сохранению работоспособности и созданию новых лабораторных работ, ведению учебной документации проводят заведующий лабораторией Выдря А. В., инженеры Скибин В. П., Хоруженко А. М., Скибина С. П., Гончарь Ю. Г. Ежегодно лабораторные работы по этой дисциплине выполняют более 30 академических групп трех факультетов.

За годы работы кафедры подготовлено 3439 бакалавров, специалистов и магистров. Многие из наших выпускников заняли ведущее положение в отраслях и работают генеральными директорами, главными инженерами и главными технологами крупных заводов Украины и стран СНГ. В Харькове это генеральный директор одного из лучших в Украине кабельного завода «Южкабель», д.т.н. В.М.

Золотарев, советник генерального директора, к.э.н. В.П. Карпушенко, технический директор к.т.н. Антоненц Ю.А., а в Украине – генеральный директор «Азовкабель», главный инженер «Одескабель» и многие другие, которых судьба и комиссия по распределению разбросала по всему Союзу – от Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре до Таллинна и Кисинева, от Сыктывкара до Еревана. Несмотря на сложность современных отношений между производителями этой «непростой» продукции,

они постоянно собираются на заседаниях секций «Интеркабеля», «Укркабеля», ежегодных семинарах кафедры, встречах выпускников, сохранив дух ХПИ: стремление к новому, взаимовыручку, ответственность за порученное дело, и, конечно, благодарность своим учителям, которые стояли у истоков создания новой кафедры.

В разные годы работы кафедры ее возглавляли:

- с 1964 по 1976 гг. – к.т.н., доц. Багалея Ю. В.;
- с 1976 по 1987 гг. – к.т.н., доц. Гурин А. Г.;
- с 1987 по 1992 гг. – к.т.н., доц. Ломов С. Г.;
- с 1992 по настоящее время – д.т.н., проф. Гурин А. Г.

Подготовку специалистов на кафедре осуществляют 4 профессора (3 д.т.н. и 1 к.т.н.), 4 доцента (к.т.н.), 3 старших преподавателя. Кафедра проводит подготовку по двум специальностям «Техника и электрофизика высоких напряжений» и «Электротехнические системы электропотребления». На кафедре ведется подготовка кадров высшей квалификации. За время существования кафедра подготовила 4 доктора наук и более 20 кандидатов технических наук не только для своего университета, но и для других организаций Украины.



*Анатолій Григорьевич Гурін  
д.т.н., професор, завідувач кафедри  
«Електроізляційна та кабельна техніка»*

В настоящее время преподаватели, аспиранты и студенты продолжают исследования по основным направлениям:

1. Технология изготовления и процессы старения электрической изоляции электрооборудования (проф. Беспрозванных А. В., проф. Щепенюк Л. А.);

2. Создание высокотемпературных эмалированных проводов, вероятностные оценки их

старения и надежности (проф. Щепенюк Л. А., доц. Голик О.В.);

3. Влияние условий эксплуатации и определение остаточного ресурса бумажно-масляной и полимерной изоляции (проф. Беспрозванных А. В., к.т.н. Москвитин Е.С.);

4. Создание технологических электрофизических установок с емкостными накопителями энергии (проф. Гурин А.Г., доц. Ломов С.Г., ст.преп. Ложкин Р.С.).

Объем научных исследований в 2013 году составил 190 тыс. грн.

Новые направления научных исследований развивают аспиранты и соискатели ученой степени:

1. Аспирант Костюков И. А. изучает электромагнитные процессы в сильноточных высоковольтных кабелях (руководитель доц. Ломов С. Г.);

2. Аспирант Бойко А. Н. исследует влияние трибоэлектрического и поверхностного заряда на старение изоляции кабелей и использует трибоэлектрический метод контроля для оценки состояния полимерной изоляции под действием внешних факторов (температуры, влажности, радиации, электрического поля, вибрации) (руководитель проф. Беспрозванных А. В.);

3. Аспирант Антоненко С. Ю. внедряет методы контроля качества эмалированных проводов на ПАО «Завод «Южкбель» (руководитель проф. Гурин А. Г.);

4. Аспирант Антоненко Т. Ю. исследует возможность перегрузочной способности современных силовых высоковольтных кабелей (руководитель проф. Золотарев В.М.);

5. Аспиранты Щербина С. А., Кессаев А. Г. и соискатель Лактионов С. В. изучают влияние различных факторов, в том числе частичных разрядов, на процессы старения тонкослойной изоляции (руководитель проф. Беспрозванных А. В.);

6. Соискатель Ложкин Р. С. разрабатывает новые методы ускорения заряженных частиц для радиационной сшивки полимерных материалов, а Гонтарь Ю. Г. исследует разрядные процессы на поверхности изоляции (руководитель проф. Гурин А. Г.).

Пятидесятилетие кафедры – это славная история, и яркое настоящее, и твердая уверенность в завтрашнем дне. 50 лет – возраст, которому присущи успех созидания, активного творчества, осмысленность дальнейшего развития.

*Поступила (received) 18.10.2014*

**С. Ф. АРТЮХ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**А. Л. КУХАРЕВ**, канд. техн. наук, доц., СУНИГОТ УИПА,  
 Стаханов

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВОК

На основе анализа современного состояния технологических и конструктивных особенностей мощных дуговых сталеплавильных и руднотермических печей выделены наиболее перспективные направления по совершенствованию их систем электропитания и средств автоматизации, намечены актуальные задачи исследований. Намечены основные мероприятия для повышения пропускной способности и снижения потерь в СЭП, основанные на применении источников напряжения пониженной частоты, а также на совершенствовании электрооборудования компенсации реактивной мощности

**Ключевые слова:** дуговые сталеплавильные печи, руднотермические печи, система электропитания.

**Постановка проблемы.** В современной электрометаллургии наиболее мощными электропечными установками являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП), руднотермические печи (РТП), а также агрегаты внепечной обработки стали (АВОС), также называемые установками «печь-ковш». По нашим данным максимальная единичная установленная мощность ДСП составляет 300 МВА, РТП – 120 МВА, АВОС – 50 МВА [1, 2]. В таких установках одной из главнейших задач является повышение их энергоэффективности, направленное на снижение электрических, тепловых и технологических потерь.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Рассматриваемые электропечные установки представляют собой сложные электро-технологические комплексы, в которых одновременно протекают множество физико-химических процессов. Среди них можно выделить пять основных процессов – технологический (термодинамика и кинетика химических реакций), энергетический (выделение тепловой энергии от горения различных видов топлива и преобразование электрической энергии в тепловую), теплообменный (распределение теплового потока в виде теплопроводности, конвективное перемещение газообразных и жидких масс, волновые процессы радиационного теплообме-

© С. Ф. Артюх, А. Л. Кухарев, 2014

на), гидрогазодинамический (явления механики газов и жидкостей) и механический (механика твердых тел) [3]. При этом взаимосвязи между этими процессами к настоящему времени изучены не полностью.

Проблемам повышения эффективности электропечных установок посвящено достаточное количество работ, некоторые из последних приведены в [1-16]. Однако большая часть работ посвящена усовершенствованию технологических режимов или отдельных параметров и узлов электропечных установок, при этом системологические требования для повышения эффективности их работы не всегда учитываются.

**Целью данной статьи** является анализ состояния проблемы повышения эффективности мощных электропечных установок.

**Материалы и результаты исследований.** Традиционно ДСП и РТП проектировались как различные электрометаллургические агрегаты и имели много технологических и конструктивных отличий. Как правило, ДСП работали в периодическом режиме (с остановкой на слив металла и загрузку новой шихты) и в большей степени с использованием открытых дуг. В большей части мощных РТП выплавка сплавов велась, и до настоящего времени ведется непрерывным способом с постоянной загрузкой шихты и периодическими выпусками сплава с глубоко погруженными в шихту электродами и закрытыми короткими дугами. Однако за последние годы в технологии выплавки стали в ДСП и технологии рудного переplava в РТП появилось много общих подходов. Например, некоторые современные ДСП могут работать в непрерывном режиме подобно РТП [4]. Также в мощных ДСП дуги экранируют вспененным шлаком, который образуется путем вдувания в печь кислорода и углеродсодержащих материалов, таким образом, происходит некоторое «закрытие» дуги, по подобию с РТП. В свою очередь, в некоторых РТП используется режим с длинными дугами [2], при котором торцы электродов подымаются на уровень насыпного слоя шихты для нагрева верхних слоев шихтовых материалов, что подобно режимам работы ДСП.

Нагрев металла в АВОС осуществляется практически также, как и в ДСП, при этом электрические параметры и длины электродуг адекватны электродугам процесса доводки металла в традиционных ДСП [5], но мощность таких печей несколько меньше. Это объясняется отсутствием такой энергозатратной стадии, как расплавление шихты, при этом тепло затрачивается только на расплавление вводимых материалов и поддержание необходимой температуры металла [5]. Из выше изложенного следует, что ДСП, РТП и АВОС можно рассматривать как

подобные электротехнологические агрегаты дугового нагрева. Обобщенная схема энергетических и материальных потоков в электропечных установках представлена на рис. 1.

В комплекс печного оборудования входит непосредственно сама электропечь, содержащая электроды и ванну, а также система электропитания (СЭП), содержащая электропечные трансформаторы, короткую сеть, коммутационную и защитную аппаратуру. Также используется другое вспомогательное оборудование, обеспечивающее подачу шихты и электродов, выпуск сплава и т.п.

Процессы передачи и потребления электроэнергии при некоторых допущениях [6] целесообразно рассматривать с помощью однофазной схемы замещения, приведенной на рис. 2.

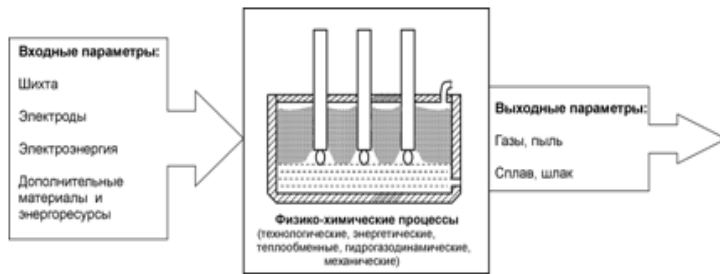


Рис. 1 – Обобщенная схема энергетических и материальных потоков в электропечных установках

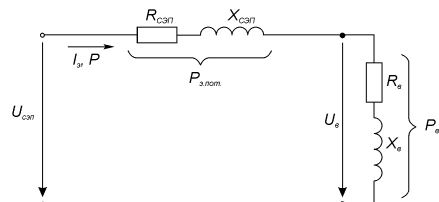


Рис. 2 – Однофазная схема замещения печного контура

На схеме:  $R_{сэл}$ ,  $X_{сэл}$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления системы электропитания,  $R_в$ ,  $X_в$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления ванны печи,  $U_{сэл}$ ,  $U_в$  – соответственно напряжения системы электропитания и ванны печи.

Одним из основных показателей энергоэффективности данных электропечных установок является удельный расход электроэнергии, определяемый отношением количества электрической энергии, затра-

ченной на 1 т выплавляемого продукта, при обеспечении его необходимого химического состава и требуемой производительности печи. Затраты электрической энергии, потребляемой печью, можно представить суммой активной мощности потерь в элементах системы электропитания  $P_{эл.пот.}$  и мощности, вводимой в ванну печи  $P_в$ :

$$P = P_{эл.пот.} + P_в, \quad (1)$$

Причем мощность электрических потерь относительно активной  $P_в$  и реактивной  $Q_в$  мощностей ванны печи можно выразить следующей формулой:

$$P_{эл.пот.} = \frac{P_в^2 + Q_в^2}{U_в^2} R_{сэл}, \quad (2)$$

а пропускную способность СЭП можно оценить известной в теории электропередач формулой:

$$P = \frac{U_{сэл} \cdot U_в \sin \delta}{X_{сэл}}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – угол между векторами  $\vec{U}_{сэл}$  и  $\vec{U}_в$ .

Из выражений (2-3) видно, что эффективность печей существенно зависит от значений активного и реактивного сопротивлений СЭП, типовые значения которых для мощных печей приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1 – Типовые сопротивления и мощности потерь СЭП печей

| Наименование печи   | Установленная мощность $S$ , МВА | Ток электрода $I_э$ , кА | Сопротивления короткой сети |                 | Мощность потерь $P_{эл.пот.}$ , МВт |
|---------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|                     |                                  |                          | $R_{сэл}$ , мОм             | $X_{сэл}$ , мОм |                                     |
| ДСП                 | 50-80                            | 44-61                    | 0,3-0,63                    | 3,5-4,5         | 3-4,7                               |
| АВОС                | 50                               | 64-70                    | 0,431                       | 1,963           | 1,77                                |
| РТП:                |                                  |                          |                             |                 |                                     |
| для ферросплавов    | 40-80                            | 89-171                   | 0,097-0,109                 | 0,814-1,238     | 4,5-6,8                             |
| для карбида кальция | 40-80                            | 86-160                   | 0,044-0,088                 | 0,383-0,558     | 2,6-5,99                            |
| для фосфора         | 50-80                            | 58-78                    | 0,072-0,082                 | 0,647-0,93      | 1,3-1,97                            |

Из табл. 1 видно, что данные сопротивления при значениях токов, составляющих десятки килоампер, обуславливают достаточно большие потери активной мощности, достигающие нескольких мегаватт, при этом также снижается коэффициент мощности печной установки (до 0,65 – 0,75) и, в целом, полезная мощность и КПД.

Среди последних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на снижение потерь и повышение пропускной способности СЭП печей, можно выделить следующие основные направления:

1. Улучшение конструктивных показателей коротких сетей.
2. Применение источников постоянного напряжения или напряжения пониженной частоты.
3. Усовершенствование способов и средств компенсации реактивной мощности.

К первому направлению относятся работы по оптимизации схемы и геометрии коротких сетей, симметрированию сопротивлений по фазам, электромагнитному экранированию отдельных участков короткой сети, усовершенствованию конструкции электрододержателей, в том числе контактных систем «короткая сеть-электрод» и др. Однако резервы повышения эффективности печей в этом направлении во многом уже исчерпаны.

По второму направлению следует отметить, что СЭП постоянным током достаточно давно применяются для ДСП, и максимальная их единичная мощность составляет 256 МВА [8]. Что касается РТП, то по данным компании Siemens [9] в настоящее время постоянный ток выгодно применять при выплавке только некоторых сплавов (феррохрома, ферроникеля, титановых шлаков). Компанией разработан ряд печей постоянного тока для данных сплавов мощностью от 1 до 70 МВт. Для выплавки остальных продуктов применение постоянного тока может быть неэкономичным или вообще неприемлемым в связи с возможностью развития побочных физико-химических процессов [9, 10].

Применение напряжения пониженной частоты в диапазоне 0,1-10 Гц представляется более целесообразным для РТП и для некоторых ДСП. Важным достоинством такого решения является возможность работы печи без малоресурсных подовых электродов. Кроме того, изменением частоты можно влиять на тепломассообменные процессы в печи, при этом также будет изменяться скорость протекания некоторых химических реакций [11]. При этом процессы, протекающие в печах при изменении частоты питающего напряжения исследованы недостаточно.

Что касается третьего направления, то здесь наиболее эффективным подходом является применение технологии FASTs (flexible alternating current transmission - управляемые (гибкие) системы передачи). Данные системы позволяют существенно повысить пропускную способность СЭП и эффективно регулировать напряжение для технологических нужд печи.

Однако, как и в случае преобразователей частоты, так и в случае оборудования FASTs, их применение в СЭП электропечей требует решения ряда вопросов, связанных с проработкой наиболее эффективных схемотехнических и алгоритмических решений.

Рассмотрим теперь вторую составляющую энергопотребления печи из выражения (1). Если пренебречь влиянием экзотермических реакций, то электрическая мощность в ванне печи расходуется на проведение технологических процессов  $P_{техн.}$  и компенсацию тепловых потерь через футеровку и свод печи  $P_{т.ном.}$ :

$$P_{г} = P_{техн.} + P_{т.ном.}, \quad (4)$$

Однако, как отмечено в начале статьи, мощность, в ванне печи распределяется с учетом всех протекающих процессов и зависит от физико-химических характеристик находящихся в печи материалов, а также параметров подводимого к электродам напряжения и конструктивных особенностей печи.

Традиционно рабочее пространство печи разделяют на три основные зоны, отличающиеся характером происходящих в них энергетических процессов [12]. Это зона материалов, имеющая относительно низкую электропроводность, зона дугового разряда и зона, в которой расположены твердые и жидкие материалы с высокой электропроводностью. Распределение энергии между этими зонами характеризует специфику конкретного технологического процесса и конкретной печи. Исследованиям процессов, протекающих в рабочем пространстве ДСП, РТП и АВОС, посвящено достаточно большое количество публикаций. Одной из основных проблем, снижающих эффективность работы печей, является тепловая неоднородность нижнего пояса ванн печей [13]. При этом зоны высоких температур формируются электрическими дугами в небольших областях, расположенных вокруг электродов (так называемые «горячие» зоны). В этих областях и протекают основные химические реакции, формирующие конечный состав выплавляемого продукта. В свою очередь в пространствах между электродами и футеровкой печи образуются так называемые «холодные» зоны, в которых



основные химические реакции значительно замедляются, и в них могут развиваться побочные реакции с образованием шлаков.

Для повышения интенсивности массо- и теплообмена в современных печах (в большей части в ДСП) применяются различные способы внешних воздействий на ванну печи, способствующие интенсификации процесса плавления [14, 15]:

- дополнительный подогрев шихты в «холодных» зонах топливными горелками (плазмотронами);
- ввод в печь дополнительных источников экзотермических реакций (углерод, природный газ и т.п.);
- продувка расплава инертными газами;
- электромагнитное перемешивание расплава;
- электромагнитное управление направлением горения дугового разряда.

Однако параметры применяемых внешних воздействий сложнейшим образом влияют на физико-химические процессы, происходящие в печах, поэтому перспективным направлением исследований является оптимизация данных процессов [16].

Одним из наиболее важных показателей, определяющих эффективность печных установок, является уровень применяемых систем автоматического управления. Современные системы управления ДСП и РТП направлены на минимизацию потерь электроэнергии и других энергоресурсов и основаны на комбинации математических моделей физико-химических процессов, теории преобразования сигналов и идентификации, методов адаптивного управления и оптимизации (рис. 3) [16, 17].

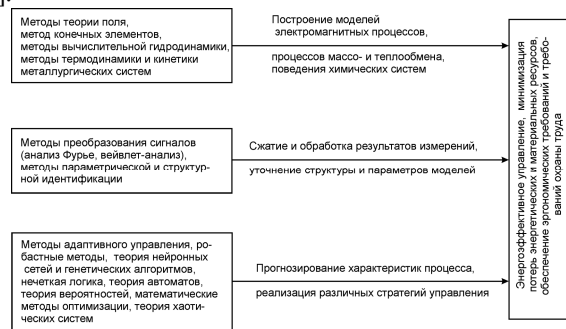


Рис. 3 – Математический базис систем автоматического управления электропечными установками

Следует отметить, что непосредственный прямой контроль ряда показателей физико-химических процессов в ванне печи весьма сложен в связи с наличием высоких температур, значительных электромагнитных полей и запыленности среды, поэтому в последнее время широко применяются косвенные методы оценки, основанные на анализе электротехнических параметров, температурных измерений, состава отходящих газов и др [10, 12, 16].

Важными элементами анализа работы печей являются расчеты энергетического и материального балансов, анализ параметров распределения энергий в ванне печи, получаемые на основе данных измерений, реализуемых современными системами управления (см. табл. 2).

Таким образом, чтобы получить наиболее полную модель печи и эффективно управлять технологическим процессом необходимо задействовать большое количество измерений, в том числе физико-химических, а также значительные математические и программные ресурсы. Поэтому работы по усовершенствованию систем управления электропечами с использованием надежных критериев оптимизации к настоящему времени далеки от своего завершения.

Таблица 2 – Некоторые идентифицируемые параметры электропечей

| Показатели энергоэффективности                                   | Основные измеряемые величины для идентификации процесса       | Идентифицируемые параметры   |
|--|---|--|
| Электротехнические показатели                                    |   |  |
| Распределение электрической мощности в подэлектродных зонах печи | активное и индуктивное сопротивление ванны печи               | интегральное представление о распределении электроэнергии в пространстве печи, длина (положение торцов) электродов |
|  | параметры электромагнитного поля электродов печи              |  |
|  | физические уровни расплава, шлака                             |  |
|  | высшие гармоники и постоянные составляющие токов и напряжений | мощность дугового разряда, устойчивость горения дуг, параметры зоны, шунтирующей дугу и зоны расплава              |
|  | вибрация конструктивных элементов печи                        |  |
|  | акустические сигналы из ванны печи                            |  |
| динамические параметры вольтамперной характеристики печи         |   |  |
| Физико-химические показатели                                     |   |  |

Продолжение таблицы 1

|  |   |   |
|--|---|---|
| Интенсивность процессов тепло- массопереноса, обеспечение однородности температуры и химического состава расплава, направленность и скорость протекания химических реакций | температура конструктивных элементов печи (ванны, короткой сети, охлаждаемой жидкости и т.д.) | стадийность технологического процесса, тепловой режим печи, составляющие материального баланса (баланса углерода), составляющие энергобаланса, параметры околоэлектродных зон |
|  | физико-химические параметры выплавляемого продукта в различных участках ванны печи            |   |
|  | физико-химические параметры отходящих газов   |   |
|  | скорость схода шихты  |   |

**Выводы.**

1. В результате анализа технологических и конструктивных особенностей мощных электропечных установок, показаны причины, ухудшающие технико-экономические показатели работы печей, в том числе значительные потери активной мощности, достигающие нескольких мегаватт, обусловленные достаточно большими активными и индуктивными сопротивлениями СЭП.

2. Намечены основные мероприятия для повышения пропускной способности и снижения потерь в СЭП, основанные на применении источников напряжения пониженной частоты, а также на совершенствовании электрооборудования компенсации реактивной мощности и способов управления электрическими и технологическими режимами печей.

3. Показана необходимость дальнейшего изучения взаимосвязей между параметрами СЭП и физико-химическими процессами, протекающими в печи при различных внешних воздействиях, с целью повышения эффективности энергетических и тепломассообменных процессов.

**Список літератури:** 1. Sellan R. The 300-Ton "Jumbo-Size" FastArc EAF at MMK Iskenderun new Danieli Minimill Complex (Turkey) / R. Sellan, M. Fabbro // AISTech 2009 Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference (St. Louis, Missouri, May 4 - 7, 2009). – 2009. – pp. 657–666. 2. Walker C. High power, shield-arc FeNi furnace operation – challenges and solutions / C. Walker, T. Koehler, N. Voermann // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6 – 9, 2010). – 2010. – pp. 681–696. 3. Педро А.А., Модульная технология – один из путей развития рудной электротермии / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, В.В. Дрессен // Руднотермические печи (конструкции, исследование и оптимизация технологических процессов, моделирование): сб. тр. Всероссийской научно-технической конференции «ЭЛЕКТРО-

ТЕРМИЯ-2006» (С.Петербург, 6–8 июня 2006 года) / под ред. Ю.П. Удалова. – С.Петербург, изд. «Перспектив Науки». – 2006. – С. 8–13. 4. Загерман Т. Новая электродуговая печь S/EAF для работы в непрерывном режиме: экономичность при большой производительности / Т. Загерман // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 33–35. 5. Кузьменко А. Г. Перспективы развития электросталеплавильного комплекса — электропечей и ковшевых печей для производства стали / А. Г. Кузьменко, Ю. Ф. Фролов, Поздняков М. А. и др. // Электрометаллургия. – 2012. – № 11. – С. 2–10. 6. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. Справ. изд. / Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилов Г. М. и др. / 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Metallurgia, 1987. – 320 с. 7. Фролов Ю. Ф. Устройство для подвода электроэнергии к металлургическим и руднотермическим плавильным агрегатам. / Ю. Ф. Фролов, В. А. Лебедев // Научно-практическая конференция ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» - 60 лет. Новосибирск. – 2004. – Электронный сборник докладов. – 29. – 8 с. 8. Адати Т. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Tokyo Steel, Япония / Т. Адати, Р. Селлан // Металлургическое производство и технология. – 2012. – № 2. – С. 8–17. 9. Kleinschmidt G. AC- and DC- smelter technology for ferrous metal production / G. Kleinschmidt, R. Degel, M. Koneke, H. Oterdoom // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6–9). – 2010. – pp. 828–838. 10. Педро А. А. Особенности существования электрохимических процессов в ванне руднотермической печи / А. А. Педро, М. П. Арлиевский, Р. В. Куртенков // Электрометаллургия. – 2010. – № 11. – С. 19–24. 11. Козлов К. Б. Химические реакции в гетерогенной системе твердое-жидкость-газ при протекании переменного электрического тока / К. Б. Козлов, Б. А. Лавров, С. В. Чижов, К. В. Голованов, Д. А. Яворская // Актуальные проблемы рудной и химической электротермии: сб. тр. Всероссийской научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ-2012» (С.Петербург, 5–7 июня 2012 года) / под ред. Ю. П. Удалова. – С.Петербург, изд. «Перспектив Науки». – 2012. – С. 287–303. 12. Нехамин С. М. Управление энергетической структурой рабочего пространства дуговых сталеплавильных и руднотермических печей – механизм повышения эффективности их работы / С. М. Нехамин // Электрометаллургия. – 2013. – № 11. – С. 9–16. 13. Yang Y. Analysis of transport phenomena in submerged arc furnace for ferrochrome production / Y. Yang, Y. Xiao, M. A. Reuter // The Tenth International Ferroalloys Congress (INFACON X) (Cape Town, South Africa, 1–4 February 2004). – 2004. – pp. 15–25. 14. Гудым Ю. А. Рациональные способы идентификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудым, И. Ю. Зиннуров, А. Д. Киселев, А. М. Шумаков // Вестник Южноуральского государственного университета. – 2008. – С. 10–13. 15. Корытчинков Д. Е. Методы и алгоритмы математического моделирования процессов электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговых печах постоянного тока: дис...кандидата техн. наук: 05.13.18 / Корытчинков Дмитрий Евгеньевич. – Рязань, 2011. – 167 с. 16. Белковский А. Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Черная металлургия. – 2013. – № 3. – С. 72–88. 17. Петергеря Ю. С. Теория та засоби побудови енергоефективних систем керування електроживленням локальних об'єктів / Ю. С. Петергеря, Т. А. Хижняк, І. В. Блінов, В. В. Чопик // Технічна електродинаміка. – Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2010. – Ч.1. – С. 43–48.

**Bibliography (transliterated):** 3. Pedro A.A., Arlievskij M.P. Dressen V.V. Modul'naja tehnologija – odin iz putej razvitija rudnoj jelektrotermii, Rudnotermicheskie pechi (konstrukcii, issledovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov, modelirovanie): sb. tr. Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «JeLEKTROTERTMIJA-2006» (S.Peterburg, 6–8 ijunya 2006 goda). S.Peterburg, izd. «Prospekt Nauki», 2006. 8–13. Print. 4. Zagerman T. Novaja jelektro-

dugovaja pech' S/EAF dlja raboty v nepreryvnom rezhime: jekonomichnost' pri bol'shej proizvoditel'nosti. *Chernye metally*. No 2. 2013. 33–35 Print. **5**. Kuz'menko A. G., Frolov Ju. F., Pozdnjakov M. A. Perspektivy razvitiya elektrostaleplavil'nogo kompleksa — jelektropechej i kovshevyh pechej dlja proizvodstva stali. *Jelektrometallurgija*. No. 11. 2012. 2–10. Print. **6**. Dancis Ja. B., Kacevich L. S., Zhilov G. M. *Korotkie seti i jelektricheskie parametry dugovyh jelektropechej*. Moscow. : Metallurgija, 1987. **8**. Adati T. Sellan R. Sverhmoshhnaja 420-tonnaja jelektrodugovaja pech' kompanii Tokyo Steel, Japonija *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tehnologija*. No. 2. 2012. 8–17. Print **9**. Kleinschmidt G. AC- and DC- smelter technology for ferrous metal production / G. Kleinschmidt, R. Degel, M. Köneke, H. Oterdoom // The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future (INFACON XII) (Helsinki, Finland, June 6–9).— 2010.— rr. 828–838. **10**. Pedro A. A. M. P. Arlievskij, R. V. Kurtenkov Osobnosti sushhestvovaniya jelektrohimicheskikh processov v vanne rudnotermicheskoj pechi *Jelektrometallurgija*. No 11. 2010. 19–24. Print. **11**. Kozlov K. B. B. A. Lavrov, S. V. Chizhov, K. V. Golovanov, D. A. Javorskaja Himicheskie reakcii v geterogennoj sisteme tverdoe-zhidkost'-gaz pri protekanii peremennogo jelektricheskogo toka. *Aktual'nye problemy rudnoj i himicheskoj jelektrotermii: sb. tr. Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «JeLEK-TROTERMIJa-2012»* S.Peterburg, izd. «Prospekt Nauki». 2012. 287–303. Print **12**. Nehamin S. M. Upravlenie jenergeticheskoy strukturoj rabocheho prostranstva dugovyh staleplavil'nyh i rudnotermicheskikh pechej — mehanizm povyshenija jeffektivnosti ih raboty. *Jelektrometallurgija*. No. 11. 2013. 9–16. Print. **13**. Yang Y. Y. Xiao, M. A. Reuter Analysis of transport phenomena in submerged arc furnace for ferrochrome production *The Tenth International Ferroalloys Congress*. 2004. . 15–25. Print **14**. Gudym Ju. A. Zinnurov I. Ju. Kiselev A. D. A. M. Shumakov Racional'nye sposoby identifikacii plavki v sovremennyh dugovyh staleplavil'nyh pechah.. *Vestnik Juzhnoural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2008. 10–13. Print. **15**. Korytchinkov D. E. *Metody i algoritmy matematicheskogo modelirovanija processov jelektromagnitnogo upravlenija napravleniem gorenija dugovogo razrjada v jelektrodugovyh pechah postojannogo toka: dis...kandidata tehn. nauk: 05.13.18* Korytchinkov Dmitrij Evgen'evich.— Rjazan', 2011. **16**. Belkovskij A. G. Kac Ja. L., Krasnjanskij M. V. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitiya tehnologii proizvodstva stali v DSP i ih konstrukcij *Chernaja metallurgija*. 2013. No 3. 72–88. Print **17**. Petergerja Ju. S. Hizhnjak T. A. Blinov I. V Chopik V. V. Teorija ta zasobi pobudovi energoefektivnih sistem keruvannja elektrozhivlennjam lokal'nih ob'ektiv. *Tehnichna elektrodinamika.— Tematichnij vipusk „Problemi suchasnoj elektrotehniki”*. No.1. 2010. 43–48. Print.

*Поступила (received) 16.10.2014*

**И.А. БЕРШАДСКИЙ**, д-р техн. наук, доц., проф. каф., ДВУЗ «ДонНТУ», Донецк

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКРОБЕЗОПАСНОГО СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В статье проведен анализ системы взрывозащищенного освещения для участка шахтной выработки длиной 100 м, научно обосновано определение параметров искробезопасного блока питания, количества и мощности светодиодных светильников, рабочего напряжения, допустимой длительности существования искрового разряда, сечения и длины питающего кабеля с учетом максимума энергии искрового разряда в электрической цепи и ограничений по потерям напряжения на участке заданной длины. Предложено выбирать максимальную мощность светодиодных светильников, основываясь на защитной функции динамической искрозащиты по ограничению длительности и энергии разряда, в результате чего ток в рабочем или аварийном режиме не может превышать по условиям взрывобезопасности.

**Ключевые слова:** искробезопасность, светодиодный светильник, блок питания, энергия разряда, питающая линия, напряжение

**Постановка задачи.** Анализ причин травматизма на угольных шахтах показал, что большую часть травм и смертей вызывает возгорание метановоздушной смеси. Согласно [1] источником воспламенения метановоздушной смеси на 45,1% является искрение в кабелях и электрооборудовании. Следовательно, обеспечение искробезопасного питания электроустановок является одним из самых важных вопросов в проблеме снижения травматизма и смертности на шахтах Украины. Осуществление нормального рабочего процесса неразрывно связано с качественным освещением рабочих зон в рамках заданной освещенности [2]. Особенно важно сохранить освещенность в аварийных ситуациях для обеспечения эвакуации рабочего персонала.

В настоящее время на предприятиях с взрывоопасной атмосферой, в особенности в условиях подземных горных выработок шахт, уровень осветительной техники характеризуется значительным отставанием от современных требований, предъявляемых к взрывозащищенному электрооборудованию и к современным осветительным приборам (ОП).

Неоднократно предпринимались попытки их совершенствования на базе эффективных технических решений, что относится, в частности, к головным искробезопасным светильникам [3]. Однако парк

© И.А. Бершадский, 2014

шахтного осветительного оборудования стационарного и локального освещения по-прежнему не имеет осветительных приборов, уровень взрывозащиты которых выше рудничного взрывозащищенного исполнения



Рис. 1 - Взрывозащищенный светодиодный светильник серии EV-1050 (установленная мощность  $P_y = 16$  Вт)

Безопасность применения таких ОП основывается, как и в случае любого взрывозащищенного электрооборудования, на обязательном применении автоматической газовой защиты, отключающей от сети все электрооборудование, в том числе и ОП, имеющие уровень РВ и ниже [4]. На многих горно-добывающих предприятиях применение ОП не допускается без выполнения специальных проектных решений и повышенных мер безопасности.

Основываясь на вышеперечисленных факторах, очевидной является перспективность разработок искробезопасных шахтных осветительных систем, имеющих уровень взрывозащиты РО и включающих в себя: искробезопасные блоки питания (ИБП), кабельные трассы, светодиодные (LED) светильники.

### Обзор предыдущих исследований и публикаций.

Следует учесть, что в настоящее время находят применение взрывозащищенные светодиодные светильники, имеющие, однако, вид взрывозащиты d - взрывонепроницаемая оболочка со всеми присущими ей недостатками [4]. К такого рода светильникам можно отнести, в

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098) 23

частности, EV-1050 (рис. 1), EV-2100, EWE-LED (Россия), EV 35 UD LED (США), Ватра ЛСР-01-16-033 (Украина) и др.

Как описано в [2, 5] наиболее эффективным методом достижения искробезопасности светильников является применение энергоэффективных светодиодных технологий (LED), а также питание LED светильников от искробезопасного источника, обеспечивающего динамическую искрозащиту взрывозащищенного электрооборудования, применяемого на предприятиях со взрывоопасной атмосферой.

Динамическая искрозащита не ограничивает мощность цепи в номинальном режиме, а срабатывает по сигналу датчика начала разряда и лимитирует энергию, поступающую из элементов цепи в разряд, только в момент аварийной коммутации за счет сокращения времени ее выделения. Это позволяет в номинальном режиме работы использовать мощность для рудничного электрооборудования, значительно превышающую допустимую при статических схемах искрозащиты [5, 6].

Исследование параметров такой защиты на основе существующих искробезопасных блоков питания для цифровых систем управления и диспетчеризации ИПИ-24-3 (ИПИ-12-6), а также источников питания постоянного тока АГАТ ВН-24.30 приведено в [6].

Полученные результаты показывают, что для первого типа блоков питания с учетом коэффициента искробезопасности по силе тока  $K_i = 1,5$  ток в цепи перед размыканием составляет  $I = 4,95$  А, а напряжение источника  $U_0 = 26,4$  В. Безопасные параметры в результате тестирования: допустимая индуктивность внешней цепи  $L = 55$  мкГн, длительность разряда  $T_p = 17,3$  мкс (колеблется в пределах 17..26 мкс), энергия разряда индуктивной цепи  $W_p = 646$  мкДж, опасная скорость размыкания цепи  $v = 6,5$  м/с.

Для второго типа источников питания с учетом коэффициента искробезопасности по силе тока  $K_i = 1,5$  при том же токе и скорости размыкания цепи в цепи перед размыканием и напряжением источника  $U_0 = 26,4$  В безопасные параметры несколько хуже: допустимая индуктивность внешней цепи  $L = 30$  мкГн, длительность разряда  $T_p = 102$  мкс, энергия разряда индуктивной цепи  $W_p = 487$  мкДж.

Указанные диапазоны работы возможных искробезопасных блоков питания и защиты для светодиодных светильников необходимо оценить с точки зрения научно обоснованной методики выбора предельных параметров искробезопасного освещения.

**Формулирование цели статьи.** Разработать научно обоснованную методику определения параметров (количество светильников и их суммарная электрическая нагрузка, мощность и напряжение ИБП, ко-

личество ИБП, допустимая длительность существования искрового разряда, сечение и длина питающего кабеля) системы стационарного и локального освещения участка шахтной проходки длиной 100 м.

**Изложение основного материала статьи.** Основным фактором, который способствует развитию процесса горения и взрыва взрывоопасной среды является воспламеняющая способность электрической искры, появляющейся при коммутации электросети с реактивными элементами. Благодаря тому, что физическая природа искрового разряда и воспламенения связана с протеканием большого количества физико-химических процессов [7], определение критериев воспламенения является весьма сложной и актуальной задачей. В общем случае требуется исследование уравнений переходных процессов в электрических системах, приводящих к возникновению искровых разрядов. Необходимо смоделировать возникновение и поведение искрового разряда и распространение поджигающего фронта разряда. И, наконец, - исследовать распространение пламени в самой среде с учетом ее физико-химических свойств. Решению этих задач посвящены работы [6, 7], что использовано в данной статье при определении минимальной воспламеняющей энергии разряда в функции его продолжительности.

Величина энергии в разряде для простой индуктивной цепи с учетом допущения о линейном характере убывания тока может быть определена по уравнению В.С. Кравченко [8]:

$$W_p = (I - I_1) \cdot (U + 2I_1 R) \cdot T_p / 6 + L \cdot (I^2 - I_1^2) / 2, \quad (1)$$

где  $W_p$  – энергия в разряде;  $I$  – ток в цепи перед размыканием;  $I_1$  – ток обрыва дуги;  $U$  – напряжение источника питания;  $R$ ,  $L$  – параметры электрической цепи.

Ток обрыва дуги  $I_1$  – неизвестная величина, и способ ее определения может быть различным. Он зависит от материала контактов и параметров разрядной цепи. В некоторых случаях ток обрыва может быть определен при анализе переходного процесса в размыкаемой цепи. В ГОСТ Р 51330.10-99 указано, что, если фактическое значение тока обрыва неизвестно, то может быть использовано значение минимального тока дугового разряда, определяющее физическую возможность существования разряда. В этом случае оценка искробезопасности цепи становится несколько более жесткой. Для контактной пары из кадмия и вольфрама минимальный ток дуги приблизительно равен 0,02 А.

В то же время согласно (1) энергия разряда максимальна при выполнении условия:

$$\frac{\partial W_p}{\partial I_1} = 0 \quad (2)$$

Необходимо выяснить, насколько это значение энергии отличается от принятого в ГОСТ Р 51330.10-99, а также от полученного согласно работе [8]. Для этого задаются параметры электрической цепи (табл. 1) и строится зависимость  $W_p(I_1)$  с учетом трех значений тока  $I_1$  ( $I_{11m}$ ,  $I_{12m}$ ,  $I_{13m}$ ), обеспечивающих максимум энергии  $W_p$  ( $W_{11m}$ ,  $W_{12m}$ ,  $W_{13m}$ ) – рис. 1. Выражение для тока  $I_{11m}$  получено согласно работе [8],  $I_{12m}$  – по формуле (3),  $I_{13m}$  – в соответствии с предположением ГОСТ Р 51330.10-99.

$$I_{12m} = \frac{1}{2} \cdot T_p \frac{2RI - U}{3L + 2RT_p}, \text{ Дж} \quad (3)$$

Таблица 1 – Сравнение способов определения тока обрыва дуги  $I_1$  по энергетическим показателям разряда

| $U$<br>В | $L$ ,<br>мкГн | $R$ ,<br>Ом | $I$ ,<br>А | $I_{11m}$ ,<br>А | $I_{12m}$ ,<br>А | $I_{13m}$ ,<br>А | $W_{11m}$ ,<br>мДж | $W_{12m}$ ,<br>мДж | $W_{13m}$ ,<br>мДж | $T_p$ ,<br>мкс |
|----------|---------------|-------------|------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 24       | 100           | 20          | 3,3        | 0,606            | 0,994            | 0,829            | 0,975              | 1,003              | 0,829              | 20             |

Из полученной зависимости (рис. 2) следует, что ток обрыва дуги  $I_{12m}$ , взятый по максимальной величине энергии согласно (3), создает ее превышение по сравнению с током обрыва дуги  $I_{13m}$ , взятым по ГОСТ Р 51330.10-99, на 17%.

Подключение светодиодов во многих случаях осуществляется с помощью драйверов – источников постоянного тока. Напряжение на выходе драйвера устанавливается автоматически, в соответствии с числом светодиодов в цепочке (рис. 3). При необходимости подключить большое число светодиодов, можно соединять их в параллельные ветви, при этом в каждой ветви требуется токоограничивающий резистор.



Рис. 2 - Зависимость энергии в разряде  $W_p$  от тока обрыва дуги  $I_1$  с указанием различных вариантов его определения

Например, для светодиода с током потребления 20 мА и падением напряжения на нем 2,5 В потребуется последовательное соединение 4 светодиодов (суммарно 12 В:  $4 \cdot 2,5 = 10$  В и резистор с  $R_1 = (12 - 2,5 \cdot 4) / 0,02 = 100$  Ом). Тогда к блоку питания с выходным током 1,4 А можно подключить 70 параллельных линий, т.е.  $70 \cdot 4 = 280$  светодиодов. Общая мощность нагрузки составляет  $P_{12} = 70 \cdot 12 \cdot 0,02 = 16,8$  Вт.

Идентичный результат по освещенности, приблизительно с таким же количеством светодиодов, может быть получен при подключении 35 параллельных линий по 9 последовательных светодиодов в каждой, т.е.  $35 \cdot 9 = 315$  светодиодов (суммарно 24 В:  $9 \cdot 2,5 = 22,5$  В и резистор с  $R_1 = (24 - 2,5 \cdot 9) / 0,02 = 75$  Ом), т.е. при той же мощности  $P_{24} = 35 \cdot 24 \cdot 0,02 = 16,8$  Вт блок питания может иметь выходной ток 0,7 А.

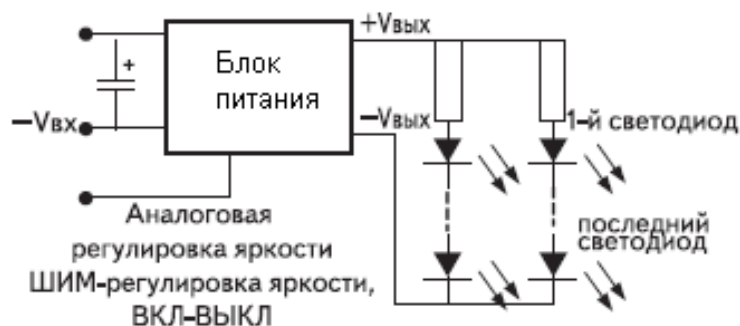


Рис. 3 - Схема подключения параллельных цепочек светодиодов к драйверу (блоку питания)

Влияние основных параметров электрической цепи и источника питания на уровень взрывобезопасности осветительной LED установки для заданных условий эксплуатации определяется из выражения (1) с учетом (3) по воспламеняющей способности искр, возникающих при коммутации электрических цепей ОУ с реактивными элементами. На допустимую суммарную мощность светильников LED влияют: напряжение источника питания  $U$ , ток в цепи нагрузки  $I$ , индуктивность питающей линии  $L$  и ее сопротивление  $R$  на участке длины  $DI$  (приблизительно LED принимается в качестве активной нагрузки), длительность разряда  $T_p$  (на основе данных об устройстве защите искробезопасного блока питания), которые в совокупности и определяют энергию искрового разряда.

Минимальная допустимая энергия воспламенения в зависимости от  $T_p$  для диапазона  $T_p < 44$  мкс может приниматься согласно выражению (4) из [7].

$$W_{\text{допк}} = 5,804 \cdot (T_k)^{-0,718} \cdot 10^{-3}, \text{ Дж} \quad (4)$$

Данные питающих кабелей приведены в табл. 2.

$$R_j = 0,007 \cdot DI + \frac{U_j}{I_j}, \quad (5)$$

$$L = 0,347 \cdot DI \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где  $j=1..7$ ,  $U_j=12 \cdot j$  – ряд напряжений источника питания;

$I_j = P/U_j$  – ряд токов источника питания.

Таблица 2 - Параметры 2-х жильного однофазного кабеля

| Сечение медного кабеля $F$ | Удельное сопротивление $r$ , Ом/км при 20° С | Индуктивность $L$ , мкГн/м |
|----------------------------|--|----------------------------|
| 1,5 мм <sup>2</sup>        | 11,6   | 0,375                      |
| 2,5 мм <sup>2</sup>        | 7  | 0,347                      |
| 4 мм <sup>2</sup>          | 4,37   | 0,321                      |

Пример построения зависимостей  $W_p$  (ее максимум соответствует  $W_{12m}$ ),  $W_{\text{допк}}(U, T_p)$  при параметрах электрической цепи  $F=2,5$  мм<sup>2</sup>,  $DI=100$  м,  $P=97$  Вт,  $L$  и  $R$  – согласно выражений (5) и (6),  $k=1..20$ ,  $T_k=2k$  показан на рис. 4.

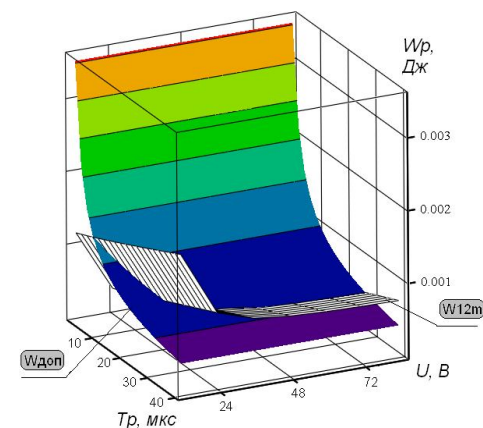


Рис 4 - Зависимости величины максимума энергии разряда ( $W_{12m}$ ) и минимальной допустимой энергии воспламенения ( $W_{\text{доп}}$ ) от напряжением источника питания ( $U$ ) и длительность разряда ( $T_p$ ) для технологической среды метановоздушная смесь

Потеря напряжения в линии постоянного тока определяется по (7):

$$\Delta U_j = 2 \cdot I_j \cdot 0,007 \cdot DI, \quad (7)$$

Т.о. допустимое множество  $U, T_p$  находится в области, где соблюдается условие  $W_{\text{доп}} - W_{12m} \geq 0$  (например, данные рис. 5).

|    | 2                      | 3                      | 4                      | 5                      | 6                      |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | 3,528·10 <sup>-3</sup> | 3,528·10 <sup>-3</sup> | 3,528·10 <sup>-3</sup> | 3,528·10 <sup>-3</sup> | 3,528·10 <sup>-3</sup> |
| 2  | 2,145·10 <sup>-3</sup> | 2,145·10 <sup>-3</sup> | 2,145·10 <sup>-3</sup> | 2,145·10 <sup>-3</sup> | 2,145·10 <sup>-3</sup> |
| 3  | 1,603·10 <sup>-3</sup> | 1,603·10 <sup>-3</sup> | 1,603·10 <sup>-3</sup> | 1,603·10 <sup>-3</sup> | 1,603·10 <sup>-3</sup> |
| 4  | 1,304·10 <sup>-3</sup> | 1,304·10 <sup>-3</sup> | 1,304·10 <sup>-3</sup> | 1,304·10 <sup>-3</sup> | 1,304·10 <sup>-3</sup> |
| 5  | 1,111·10 <sup>-3</sup> | 1,111·10 <sup>-3</sup> | 1,111·10 <sup>-3</sup> | 1,111·10 <sup>-3</sup> | 1,111·10 <sup>-3</sup> |
| 6  | 9,747·10 <sup>-4</sup> | 9,747·10 <sup>-4</sup> | 9,747·10 <sup>-4</sup> | 9,747·10 <sup>-4</sup> | 9,747·10 <sup>-4</sup> |
| 7  | 8,726·10 <sup>-4</sup> | 8,726·10 <sup>-4</sup> | 8,726·10 <sup>-4</sup> | 8,726·10 <sup>-4</sup> | 8,726·10 <sup>-4</sup> |
| 8  | 7,928·10 <sup>-4</sup> | 7,928·10 <sup>-4</sup> | 7,928·10 <sup>-4</sup> | 7,928·10 <sup>-4</sup> | 7,928·10 <sup>-4</sup> |
| 9  | 7,285·10 <sup>-4</sup> | 7,285·10 <sup>-4</sup> | 7,285·10 <sup>-4</sup> | 7,285·10 <sup>-4</sup> | 7,285·10 <sup>-4</sup> |
| 10 | 6,754·10 <sup>-4</sup> | 6,754·10 <sup>-4</sup> | 6,754·10 <sup>-4</sup> | 6,754·10 <sup>-4</sup> | 6,754·10 <sup>-4</sup> |
| 11 | 6,308·10 <sup>-4</sup> | 6,308·10 <sup>-4</sup> | 6,308·10 <sup>-4</sup> | 6,308·10 <sup>-4</sup> | 6,308·10 <sup>-4</sup> |
| 12 | 5,926·10 <sup>-4</sup> | 5,926·10 <sup>-4</sup> | 5,926·10 <sup>-4</sup> | 5,926·10 <sup>-4</sup> | 5,926·10 <sup>-4</sup> |
| 13 | 5,595·10 <sup>-4</sup> | 5,595·10 <sup>-4</sup> | 5,595·10 <sup>-4</sup> | 5,595·10 <sup>-4</sup> | 5,595·10 <sup>-4</sup> |
| 14 | 5,305·10 <sup>-4</sup> | 5,305·10 <sup>-4</sup> | 5,305·10 <sup>-4</sup> | 5,305·10 <sup>-4</sup> | 5,305·10 <sup>-4</sup> |
| 15 | 5,048·10 <sup>-4</sup> | 5,048·10 <sup>-4</sup> | 5,048·10 <sup>-4</sup> | 5,048·10 <sup>-4</sup> | 5,048·10 <sup>-4</sup> |
| 16 | 4,82·10 <sup>-4</sup>  | 4,82·10 <sup>-4</sup>  | 4,82·10 <sup>-4</sup>  | 4,82·10 <sup>-4</sup>  | 4,82·10 <sup>-4</sup>  |

Wдоп. Дж

|    | 1                      | 2                      | 3                      | 4                      | 5                      |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | 1,167·10 <sup>-3</sup> | 3,169·10 <sup>-4</sup> | 1,599·10 <sup>-4</sup> | 1,053·10 <sup>-4</sup> | 8,021·10 <sup>-5</sup> |
| 2  | 1,201·10 <sup>-3</sup> | 3,518·10 <sup>-4</sup> | 1,955·10 <sup>-4</sup> | 1,413·10 <sup>-4</sup> | 1,164·10 <sup>-4</sup> |
| 3  | 1,237·10 <sup>-3</sup> | 3,876·10 <sup>-4</sup> | 2,317·10 <sup>-4</sup> | 1,776·10 <sup>-4</sup> | 1,528·10 <sup>-4</sup> |
| 4  | 1,273·10 <sup>-3</sup> | 4,239·10 <sup>-4</sup> | 2,681·10 <sup>-4</sup> | 2,141·10 <sup>-4</sup> | 1,893·10 <sup>-4</sup> |
| 5  | 1,311·10 <sup>-3</sup> | 4,606·10 <sup>-4</sup> | 3,047·10 <sup>-4</sup> | 2,507·10 <sup>-4</sup> | 2,258·10 <sup>-4</sup> |
| 6  | 1,348·10 <sup>-3</sup> | 4,974·10 <sup>-4</sup> | 3,415·10 <sup>-4</sup> | 2,873·10 <sup>-4</sup> | 2,623·10 <sup>-4</sup> |
| 7  | 1,387·10 <sup>-3</sup> | 5,345·10 <sup>-4</sup> | 3,782·10 <sup>-4</sup> | 3,239·10 <sup>-4</sup> | 2,989·10 <sup>-4</sup> |
| 8  | 1,426·10 <sup>-3</sup> | 5,717·10 <sup>-4</sup> | 4,151·10 <sup>-4</sup> | 3,606·10 <sup>-4</sup> | 3,355·10 <sup>-4</sup> |
| 9  | 1,465·10 <sup>-3</sup> | 6,091·10 <sup>-4</sup> | 4,521·10 <sup>-4</sup> | 3,973·10 <sup>-4</sup> | 3,721·10 <sup>-4</sup> |
| 10 | 1,504·10 <sup>-3</sup> | 6,464·10 <sup>-4</sup> | 4,888·10 <sup>-4</sup> | 4,341·10 <sup>-4</sup> | 4,086·10 <sup>-4</sup> |
| 11 | 1,544·10 <sup>-3</sup> | 6,839·10 <sup>-4</sup> | 5,256·10 <sup>-4</sup> | 4,707·10 <sup>-4</sup> | 4,452·10 <sup>-4</sup> |
| 12 | 1,584·10 <sup>-3</sup> | 7,214·10 <sup>-4</sup> | 5,627·10 <sup>-4</sup> | 5,074·10 <sup>-4</sup> | 4,818·10 <sup>-4</sup> |
| 13 | 1,624·10 <sup>-3</sup> | 7,589·10 <sup>-4</sup> | 5,996·10 <sup>-4</sup> | 5,441·10 <sup>-4</sup> | 5,184·10 <sup>-4</sup> |
| 14 | 1,665·10 <sup>-3</sup> | 7,965·10 <sup>-4</sup> | 6,366·10 <sup>-4</sup> | 5,808·10 <sup>-4</sup> | 5,551·10 <sup>-4</sup> |
| 15 | 1,705·10 <sup>-3</sup> | 8,341·10 <sup>-4</sup> | 6,736·10 <sup>-4</sup> | 6,175·10 <sup>-4</sup> | 5,916·10 <sup>-4</sup> |
| 16 | 1,746·10 <sup>-3</sup> | 8,717·10 <sup>-4</sup> | 7,105·10 <sup>-4</sup> | 6,542·10 <sup>-4</sup> | 6,282·10 <sup>-4</sup> |

Wр. Дж

а

б

Рис 5 - Сравнение энергий: а –  $W_{доп}$ , б –  $W_{12m}$  в зависимости от длительности разряда (k) и напряжения (j)

Итоговые расчеты по изложенной методике позволили установить границы допустимой взрывозащищенной мощности светильников LED и уровни напряжений, токов цепи и сечения соединительного кабеля (см. табл. 3).

Таблица 3 – Допустимая взрывозащищенная мощность светильников LED на 100 м проходки с учетом ограничений:  $\Delta U < 10\%$ ,  $T_p > 26$  мкс

| Сечение медного провода F | Напряжение питания постоянного тока | Допустимая мощность светильников LED, Вт | $W_{12m}$ , Дж        | I, А | $\Delta U$ , % |
|---------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|------|----------------|
| 1,5 мм <sup>2</sup>       | 12 В                                | 6  | 3,41·10 <sup>-5</sup> | 0,5  | 9,5            |
|                           | 24 В                                | 25                                       | 1,43·10 <sup>-4</sup> | 1,04 | 9,9            |
|                           | 36 В                                | 56                                       | 3,2·10 <sup>-4</sup>  | 1,55 | 9,9            |
|                           | 48 В                                | 98                                       | 5,58·10 <sup>-4</sup> | 2,04 | 9,7            |
| 2,5 мм <sup>2</sup>       | 12 В                                | 10                                       | 6,08·10 <sup>-5</sup> | 0,83 | 9,7            |
|                           | 24 В                                | 41                                       | 2,5·10 <sup>-4</sup>  | 1,7  | 9,9            |
|                           | 36 В                                | 90                                       | 5,47·10 <sup>-4</sup> | 2,5  | 9,7            |
| 4 мм <sup>2</sup>         | 48 В                                | 97                                       | 5,44·10 <sup>-4</sup> | 2,02 | 5,8            |
|                           | 12 В                                | 16,4                                     | 1,09·10 <sup>-4</sup> | 1,36 | 9,9            |
|                           | 24 В                                | 65                                       | 4,33·10 <sup>-4</sup> | 2,7  | 9,8            |
|                           | 36 В                                | 92                                       | 5,51·10 <sup>-4</sup> | 2,55 | 6,2            |
|                           | 48 В                                | 100                                      | 5,56·10 <sup>-4</sup> | 2,08 | 3,7            |

Аналогичным образом, но уже при варьировании напряжения и длины кабеля при условии фиксированного  $T_p = 26$  мкс и  $F = 2,5$  мм<sup>2</sup>,  $P = 41$  Вт рассчитывается допустимое количество  $DI$ ,  $U$  (например, данные рис. 6, на котором  $ii = 1..200$ ,  $DI_{ii} = 0,5 \cdot ii$ ).

|    | 1                      | 2                      | 3                      | 4                      | 5                      | 6                      |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | 2,009·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     | 1,999·10 <sup>-4</sup> | 1,999·10 <sup>-4</sup> | 1,999·10 <sup>-4</sup> |
| 2  | 2,019·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     | 2·10 <sup>-4</sup>     | 1,999·10 <sup>-4</sup> |
| 3  | 2,029·10 <sup>-4</sup> | 2,006·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     | 2·10 <sup>-4</sup>     |
| 4  | 2,039·10 <sup>-4</sup> | 2,009·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     | 2·10 <sup>-4</sup>     |
| 5  | 2,05·10 <sup>-4</sup>  | 2,011·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     |
| 6  | 2,06·10 <sup>-4</sup>  | 2,014·10 <sup>-4</sup> | 2,006·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> | 2·10 <sup>-4</sup>     |
| 7  | 2,07·10 <sup>-4</sup>  | 2,017·10 <sup>-4</sup> | 2,007·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> |
| 8  | 2,08·10 <sup>-4</sup>  | 2,019·10 <sup>-4</sup> | 2,008·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> |
| 9  | 2,09·10 <sup>-4</sup>  | 2,022·10 <sup>-4</sup> | 2,009·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> | 2,001·10 <sup>-4</sup> |
| 10 | 2,1·10 <sup>-4</sup>   | 2,024·10 <sup>-4</sup> | 2,01·10 <sup>-4</sup>  | 2,005·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> |
| 11 | 2,111·10 <sup>-4</sup> | 2,027·10 <sup>-4</sup> | 2,011·10 <sup>-4</sup> | 2,006·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> |
| 12 | 2,121·10 <sup>-4</sup> | 2,029·10 <sup>-4</sup> | 2,012·10 <sup>-4</sup> | 2,006·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> |
| 13 | 2,131·10 <sup>-4</sup> | 2,032·10 <sup>-4</sup> | 2,013·10 <sup>-4</sup> | 2,007·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,002·10 <sup>-4</sup> |
| 14 | 2,141·10 <sup>-4</sup> | 2,034·10 <sup>-4</sup> | 2,015·10 <sup>-4</sup> | 2,008·10 <sup>-4</sup> | 2,004·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> |
| 15 | 2,151·10 <sup>-4</sup> | 2,037·10 <sup>-4</sup> | 2,016·10 <sup>-4</sup> | 2,008·10 <sup>-4</sup> | 2,005·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> |
| 16 | 2,161·10 <sup>-4</sup> | 2,039·10 <sup>-4</sup> | 2,017·10 <sup>-4</sup> | 2,009·10 <sup>-4</sup> | 2,005·10 <sup>-4</sup> | 2,003·10 <sup>-4</sup> |

Wр. Дж

Рис. 6 - Энергия ( $W_{12m}$ ) в зависимости от длины линии (ii) и напряжения (j)

**Выводы. 1.** Существенным недостатком существующих стационарных и локальных осветительных приборов на предприятиях с взрывоопасной атмосферой, является недостаточный уровень их взрывобезопасности. Стационарные осветительные приборы имеет ПВ исполнение, что требует отключать свет при возникновении аварийной ситуации.

**2.** Осветительная сеть на базе искробезопасных светодиодных (LED) светильников позволяет организовать освещение, в том числе и в аварийной ситуации.

**3.** По результатам анализа влияния основных параметров электрической цепи и источника питания на уровень взрывобезопасности осветительной LED установки для технологической среды метановоздушная смесь установлены допустимые по воспламеняющей способности искр, возникающих при коммутации электрических цепей осветительных установок множества пределов мощности и потерь напряжения в зависимости от напряжения источника питания, сечения и длины питающего кабеля.

**4.** Установлено, что во всех случаях предельная мощность нагрузки стремиться к величине 97..98 Вт. На эффективность снижения энергии разряда при переходе к повышенному напряжению питания



наибольшее влияние оказывают мощность нагрузки (уменьшение  $W_p$  на 52% при  $P=97$  Вт против 18% при  $P=16,8$  Вт в случае увеличения  $U$  с 12 до 24 В) и длина линии  $Dl$ .

**Список литературы:** 1. *Кашуба О.И.* Анализ причин травматизма на шахтах Украины / *О.И. Кашуба, Н.Б. Левкин, Е.А. Спиридонов, М.С. Ковчужный* // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. - Макеевка. - 2007. - С. 162-169. 2. *Айзенберг Ю.Б.* Справочная книга по светотехнике / *Ю.Б. Айзенберг и др.* - М.: Энергоиздат. 1995. - С. 335-346. 3. *Давыдов В.В.* Шахтное искробезопасное освещение. Светильники головные искробезопасные / *В.В. Давыдов* // Уголь, 2008. - № 1. - С. 47-50. 4. *Давыдов В.В., Литвинский В.М., Гутер Л.Р.* Создание шахтных стационарных осветительных приборов повышенной эффективности и безопасности / *В.В. Давыдов, В.М. Литвинский, Л.Р. Гутер* // Сборник трудов института Гипроуглеавтоматизация. - М.: 2000. - С. 16-29. 5. *Кормильцев П.В.* Система искробезопасного шахтного освещения // *П.В. Кормильцев, И.А. Бершадский* // Научные работы ДонНТУ. - Серия "Электротехника и энергетика". - Донецк: ДонНТУ, 2014. - Выпуск 1(16). - С.90-94. 6. *Бершадский И.А.* Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания / *И.А. Бершадский, Ал.А. Дубинский* // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. - Донецк, 2011. - С. 230 - 240. 7. *Бершадский И.А.* Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.26.01 - Донецк: 2014. - 343 с. - ДонНТУ. 8. *Абраменко И.Г.* Проблемы взрывобезопасности электрических кил осветительных установок / *И.Г. Абраменко, В. Ф. Рой, Н. Г. Бурма* // Светлотехника та електроенергетика. - 2011. - №1. - С. 60-64.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kashuba, O.I., N.B. Levkin, E.A. Spiridonov and M.S. Kovchuzhnyi. "Analiz prichin travmatizma na shahtah Ukrainyi." *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh i zdorovykh usloviy truda v ugolnykh shahtah.* Makeevka. 2007. 162-169. Print. 2. Ayzenberg, Yu.B. *Spravochnaya kniga po svetotekhnike.* Moscow: Energoizdat, 1995. Print. 3. Davydov, V.V. "Shahtnoe iskrobezopasnoe osveschenie. Svetilniki glavnyie iskrobezopasnyie." *Ugol*. No. 1. 2008. 47-50. 4. Davydov, V.V., V.M. Litstvinskiy and L.R. Guter. "Sozdanie shahtnykh statsionarnykh osvetitelnykh priborov povyishennoy effektivnosti i bezopasnosti" *Sbornik trudov instituta Giprougleavtomatizatsiya.* Moscow: 2000. Print. 5. Kormiltsev, P.V. and I.A. Bershadskiy. "Sistema iskrobezopasnogo shahtnogo osvescheniya." *Naukovy pratsi DonNTU. Seriya "Elektrotehnika I energetika"*. Donetsk. DonNTU. No 1(16). 2014. 90-94. Print. 6. Bershadskiy, I.A. and Al.A. Dubinskiy. "Testirovanie metoda beskamer-noy teplovy otseuki iskrobezopasnosti shemyi istochnika pitaniya." *Vzryvozaschisshchennoe elektrooborudovanie: Sb. nauchnykh trudov UkrNIIVE.* Donetsk. 2011. 230 - 240. Print. 7. Bershadskiy, I.A. "Razvitie nauchnykh osnov i metodov sozdaniya iskrobezopasnogo elektrooborudovaniya dlya povyisheniya bezopasnosti truda gornorabochih": *dis. na soisk. uchen. stepeni dokt. tehn. nauk: spets. 05.26.01.* Donetsk: DonNTU, 2014. 8. Abramenko, I.G., V.F. Roy, N.G. Burma. "Problemi vibuhobezpechnosti elektrichnykh kil osvitlyvalnykh ustanovok." *Svitlotekhnika ta elektroenergetika.* No. 1. 2011. 60-64. Print.

Поступила (received) 10.7.2014

УДК 621.311

**В.І. ВАСИЛЬЧЕНКО**, начальник управління ДП НЕК «Укренерго», Київ;  
**О. Г. ГРИБ**, д-р тех. наук, проф., завідувач кафедри Автоматизації енергосистем, НТУ «ХПІ»;  
**О. В. ЛЕЛЕКА**, провідний інженер ДП НЕК «Укренерго», Київ;  
**Д. А. ГАПОН**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;  
**О. В. САПРИКА**, д-р тех. наук, проф., ХНУ Міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків;  
**Т.С. ІЕРУСАЛІМОВА**, асистент, НТУ «ХПІ».

### ЦИФРОВА ПІДСТАНЦЯ ЯК ЛОКАЛЬНИЙ РІВЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянута цифрова підстанція як локальний рівень автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії. Автоматизована система комерційного обліку електричної енергії на цифровій підстанції енерго-постачальних підприємств можна прийняти як отримання достовірного балансу електроенергії. Робота енергетичної галузі в умовах функціонування енергоринку висуває підвищені вимоги до системи обліку, а саме, до рівня її автоматизації, точності, надійності і цілісності. Впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії на цифровій підстанції, дозволяє перейти до тарифів реального часу, отримання достовірного балансу виробництва, розподілу і споживання електричної потужності або енергії та оцінка показників якості електричної енергії.

**Ключові слова:** електроенергія, підстанція, потужність, вимірювання, лічильник, контроль, автоматизація

**Вступ.** Автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), що встановлюється на енергетичних об'єктах для автоматизованого контролю та обліку електроенергії і потужності, в тому числі з метою вимірювань активної та реактивної електроенергії та потужності, відносяться до вимірювальних систем, в загальному випадку представляє собою сукупність функціонально об'єднаних масштабних вимірювальних перетворювачів (вимірювальні трансформатори струму і напруги), інтегруючих приладів (лічильники електроенергії з імпульсним та/або цифровим інтерфейсом), концентраторів або пристроїв збору даних, пристроїв збору та передачі даних, центральних обчислювальних пристроїв та інших технічних засобів, розміщених у

© В. І. Васильченко, О. Г. Грив, О. В. Лелека, Д. А. Гапон, О. В. Саприка, Т. С. Іерусалімова, 2014

різних точках контрольованого енергооб'єкту і з'єднаних між собою каналами та/або лініями зв'язку. АСКОЕ є багатоканальними вимірювальними системами, що виробляють в автоматичному режимі в повному обсязі або частково виконання вимірювальних та обчислювальних операцій [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Вчені та практики вже давно обговорюють переваги і недоліки ієрархічних і децентралізованих АСУ. Очевидно, що державні інтереси найбільш повною мірою можуть бути забезпечені впровадженням загальнодержавної АСКОЕ. Проте в даний час в Україні немає достатньо потужних економічно і технічно компаній, які б вирішили цю задачу. Залучення до цього проекту іноземних компаній, наприклад Landis & Gyr або Ельстер Метроніка, може привести до руйнування численних вітчизняних виробників приладів обліку та АСКОЕ, а також до втрати, певною мірою, контролю над інформаційними потоками. Побудова локальних АСКОЕ цілком під силу українським підприємствам. У цьому процесі слід відзначити три групи виробників. До першої групи належать підприємства, які вже давно займаються виробництвом приладів обліку. Вони будують АСКОЕ з обладнання власного виробництва. До другої групи належать підприємства, які уклали ліцензійні договори із закордонними фірмами або / і є спільними компаніями. Третя група, найчисленніша, складається з фірм, які використовують обладнання інших фірм для комплектації АСКОЕ. Основним самостійним продуктом таких фірм є прикладне програмне забезпечення АСКОЕ. Саме представники цих фірм виступають за побудову децентралізованих АСКОЕ з використанням цифрових підстанцій, які найбільшою мірою відповідають особливостям обліку електроенергії на підприємствах. У зв'язку з цим існує побоювання, що в недалекому майбутньому при побудові загальнодержавної АСКОЕ ці підприємства не зможуть бути інтегровані в загальну систему обліку.

**Мета статті.** Впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії на цифровій підстанції, що дозволяє перехід до тарифів реального часу, отримання достовірного балансу виробництва і розподілу і споживання електричної потужності або енергії та оцінка показників якості електричної енергії.

**Постановка проблеми.** Вирішення проблеми балансу електроенергії на цифровій підстанції, що можливе тільки при удосконаленні системи обліку [2].

**Матеріали досліджень.** Як критерій ефективності АСКОЕ на цифровій підстанції енерго-постачальних підприємства можна прийняти

як отримання достовірного балансу електроенергії. Робота енергетичної галузі в умовах функціонування енергоринку висуває підвищені вимоги до системи обліку, а саме, до рівня її автоматизації, точності, надійності і цілісності. Точність і достовірність системи обліку, в першу чергу, визначається засобами застосовуваної інформаційно-вимірювальної техніки, а також принципами її використання. Основними показниками, які характеризують ефективність використання інформаційно-вимірювальної техніки в системі обліку, є [3]:

- Точність представлення вимірювальної інформації;
- Достовірність представлення вимірювальної інформації. На додаток до класичного підходу і стосовно до даного об'єкту процес отримання достовірної інформації повинен бути автоматизований і може варіюватися від реєстрації даних з лічильників електроенергії протягом всього часу обліку до повністю автоматизованого процесу реєстрації цих даних з їх повним дублюванням і обов'язковою верифікацією;

- Одночасність представлення вимірювальної інформації. Під одночасністю представлення вимірювальної інформації мається на увазі синхронність виконання вимірювань в точках обліку, порушення якої призводить до виникнення похибки розсинхронізації, яка впливає на результати вимірювання.

Зазначені показники визначаються в системі обліку принципами організації вимірювань, якістю систем обліку і зв'язку.

Система обліку, яка задовольняє цим вимогам, дозволяє вирішувати головні завдання:

- Забезпечення точної, достовірної та надійною інформацією комерційних розрахунків на ринку електроенергії;
- Постійний контроль виконання договірних зобов'язань між суб'єктами ринку електроенергії;
- Аналіз та контроль внутрішнього балансу суб'єктів енергоринку.

Слід зазначити, що в даний час є велика кількість АСКОЕ різного масштабу, накопичений значний досвід їх експлуатації, тому для виявлення переваг та недоліків АСКОЕ, а також тенденцій їх розвитку, доцільно розглянути найбільш типові з них.

**Результати досліджень.** Була розроблена спеціальна методологія аналізу, за допомогою якої проведено аналіз стану систем обліку електроспоживання електричної енергії в Україні. Результати аналізу дозволили зробити висновки щодо рівня технічних, економічних хара-

ктеристик наявних систем обліку електроспоживання, а також одержати інформацію щодо рівня їх метрологічного забезпечення.

За допомогою ефективних технічних та економічних критеріїв з використанням результатів аналізу та урахуванням діючих обмежень, в тому числі й ресурсних (метрологічних), було обгрунтовано вибір стратегії розробки та впровадження АСКОЕ.

Обрана стратегія полягала у створенні системи автоматизованого обліку з мінімальними витратами, оптимальної за складом та максимальної надійності, яка б задовольняла потребам ОЕС України під час її експлуатації.

Стратегія базується за такими основними принципами:

- мінімальна достатність;
- системність;
- оптимальність;
- використання світового досвіду створення автоматизованих систем;

систем;

- урахування особливостей економіки України;
- урахування випереджаючого розвитку автоматизованих систем.

систем.

Коротко суть цих принципів полягає у наступному:

а) принцип мінімальної достатності полягає у тому, що в умовах обмежених матеріальних та інших ресурсів, стислих термінів створення було визначено: оптимальну структуру системи обліку; трансформатори струму та напруги, лічильники електроенергії, які підлягали першочерговій заміні; розроблення необхідних методик та приладів, на які спирається в роботі система;

б) принцип системності полягає у тому, що АСКОЕ передбачає наявність зв'язку із іншими системами контролю та системами електропостачання, що дозволяє реалізувати ряд додаткових функціональних можливостей, тобто використати системні властивості;

в) принцип оптимальності полягає в забезпеченні необхідної кількості інформації при мінімальних фінансових затратах;

г) використання світового досвіду створення автоматизованих систем проявилось у перегляді принципів автоматизації обліку електричної енергії, шляхів забезпечення єдності функціонування систем в рамках окремих ЕС, ОЕС України, а також сусідніх держав;

д) урахування особливостей економіки України полягає в концентрації зусиль для першочергового створення системи обліку, здат-

ної вирішувати технічні та економічні задачі, важливі для енергетики та економіки України;

е) принцип випереджаючого розвитку автоматизованих систем полягає в тому, що за рахунок використання при створенні АСКОЕ, новітніх технологій, технічних та методичних рішень, а також сучасних високоточних методів будуть досягнуті технічні та інформаційні характеристики автоматизованих систем на рівні відповідних систем розвинених країн. Реалізація цього принципу створює запас за точністю та швидкістю, який може бути використаний без додаткових витрат при створенні «високих технологій», проведенні сучасних досліджень, тобто в тих галузях науки і техніки, де виникає потреба у виконанні обліку електроенергії.

**Висновки.** Впровадження розробленої АСКОЕ з використанням цифрових підстанцій дозволить більш досконало вирішувати поставлені задачі та підвищити ефективність роботи енергетичних систем.

**Список літератури:** 1. Сокол Е.И., Гриб О.Г., Жаркин А.Ф. и др., Автоматизированные системы контроля и учета электрической энергии. – Харьков: 2014г. – 488с. 2. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (Аналоговые и цифровые). Изд. пятое. – Киев.: Высшая школа, 1986. – 504 с. 3. Черемисин М.М., Зубко В.М. Автоматизация объектов управления электроснабжения. – Харьков: “Факт”, 2005. – 192 с.

**Bibliography(translation):** 1. Sokol E., Gryb O., Zharkin A. *Automated control systems and accounting of electricity*. Kharkov 2014. 2. Ornatsky P. *Automatic measurement and instrumentation (analog and digital)*. Kiev: High School 1986. 3. Cheremisin N., Zubco V., *Automation facilities management supply*. Kharkov. Fact, 2005..

*Поступила (received) 25.10.2014*

**В.И. ВАСИЛЬЧЕНКО**, начальник управления ДП НЭК «Укр-энерго», Киев;  
**Ю.Ф. ТЕСИК**, д-р техн. наук, Институт электродинамики НАН Украины, Киев;  
**О.Г. ГРИБ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**А.В. САПРЫКА**, д-р техн. наук, проф., ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, Харьков;  
**Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА**, ассистент, НТУ «ХПИ».

### МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ УЧЕТА И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Решение проблемы метрологического обеспечения средств коммерческого учета и качества электрической энергии является необходимым при построении и эксплуатации автоматизированных систем. Значительное количество технических средств учета требует обязательной поверки для того чтобы они не выходили из класса точности. Современное состояние электроэнергетической отрасли ставит перед всеми участниками оптового рынка Украины необходимость обеспечения количественных и качественных показателей основного товара - электрической энергии. Успешное решение этой задачи направлено на обеспечение безотказной эксплуатации электротехнического оборудования, приборов, сложной бытовой техники, безаварийное протекания технологических процессов у потребителей, а также способствовать процессу энергосбережения.

**Ключевые слова:** метрология, качество, электроэнергия, контроль, учет, поверка, погрешность, счетчик, анализатор.

**Вступление.** Современное состояние электроэнергетической отрасли ставит перед всеми участниками оптового рынка Украины необходимость обеспечения количественных и качественных показателей основного товара - электрической энергии. Успешное решение этой задачи направлено на обеспечение безотказной эксплуатации электротехнического оборудования, приборов, сложной бытовой техники, безаварийное протекания технологических процессов у потребителей, а также способствовать процессу энергосбережения. Создание метрологического обеспечения учета и контроля показателей качества электроэнергии (ПКЭ) является важной составляющей этого процесса.

**Анализ последних исследований и литературы.** В настоящее время на энергетическом рынке широко представлены электронные счетчики электрической энергии различных фирм. Анализ перечня счетчиков электрической энергии, которые внесены в государственный

реестр средств измерительной техники, допущенных к использованию на основании результатов Государственных испытаний, показывает, что из 116 наименований приборов 65 составляют электронные счетчики. Для того, чтобы оценить возможности того или иного электронного счетчика, обратимся к документу "Межгосударственный стандарт. Счетчики электрической энергии переменного тока электронные. Счетчики должны быть изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 22261-94. Анализаторы качества электрической энергии выпускаются отдельно от электронных счетчиков. На сегодняшний день на энергетическом рынке представлено значительное количество измерителей качества электрической энергии.

**Цель статьи.** Является разработка метрологического обеспечения средств коммерческого учета и качества электрической энергии.

**Постановка проблемы.** В настоящее время актуальной проблемой является непрерывный контроль потребления электроэнергии и показателей качества электрической энергии. Это обусловлено тем, что эти измерители ставятся на границе балансовой принадлежности и они должны всегда находиться в классе точности, поэтому необходимо метрологическое обеспечение этих технических средств контроля электрической энергии.

**Материалы исследований.** На основе разработанных методов воспроизведения параметров электрической сети создано уникальную рабочую меру нормирования ПКЭ, представленную на рис.1. Ее метрологические характеристики приведены в таблице 1.[1-2].



Рис. 1– Рабочая мера параметров качества электроэнергии У4330 / 1

Таблица 1 – Метрологические характеристики рабочей меры ПКЭ

| № п/п | Перечень технических характеристик метрологической установки                               | Значение технических характеристик |
|-------|--|------------------------------------|
| 1.    | Абсолютная погрешность воспроизведения ПКЭ не превышает, %                                 | 0,05                               |
| 2.    | При воспроизведении отклонения напряжения, коэффициентов несимметрии и неуравновешенности: | 0-20                               |
|       | - диапазон измерения выходных параметров, %  |                                    |
|       | - дискретность установки параметров, %   | 0,05                               |
|       | - фазовый угол, эл. град.  | 0-360                              |
| 3.    | При воспроизведении гармоник:  |                                    |
|       | - номера гармоник  | 1-40                               |
|       | - амплитуда гармоник, % от УН  | 1-50                               |
|       | - дискретность установки амплитуды, %  | 0,05                               |
|       | - фазовый угол, эл.град.   | 0-360                              |
| 4.    | При воспроизведении колебаний напряжений:  |                                    |
|       | - скорость изменения, % за с   | 0,25; 0,5; 1; 2; 4                 |
|       | - размах изменения напряжения, %   | 1;2;4;8                            |
|       | - средняя частота, 1/мин.  | 40                                 |
|       | - шаг дискретизации по времени, с  | 0,02                               |
| 5.    | При воспроизведении колебаний частоты:   |                                    |
|       | - скорость изменения, Гц / с   | 0,1; 0,2; 0,4; 0,8                 |
|       | - размах, Гц   | 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0     |
|       | - шаг дискретизации по времени, с  | 0,02                               |
| 6.    | Значения исходных номинальных напряжений, В  | 380/220; 100/57,7                  |
| 7.    | Значения исходных номинальных токов, А   | 5; 1                               |

**Результаты исследований.** Метрологическая аттестация уникальной рабочей меры по нормированию параметров качества электрической энергии СТИ-1, позволило создать мобильную метрологическую установку для поверки средств измерения параметров качества электроэнергии, изображенную на рис. 2. Ее технические характеристики приведены в таблице 2 [3].

Счетчики «ЕТ» разработаны и внедрены в производство СП «ЗАО «Елвин», которые широко используются в электрических сетях для контроля качества и учета электроэнергии.



Рис. 2 – Мобильная метрологическая установка для поверки средств измерения показателей качества электрической энергии



Рис. 3— Счетчик трехфазный электронный многофункциональный типа «ЕТ»

Таблица 2 – Технические характеристики мобильной метрологической установки

| № п/п | Перечень технических характеристик метрологической установки | Значение технических |
|-------|--|----------------------|
| 1     | Диапазон регулирования фазных напряжений, В                  | От 40 до 150         |
| 2     | Диапазон регулирования фазных токов, А                       | От 0,001 до          |
| 3     | Мощность в одном канале напряжения, ВА                       | не меньше 30         |
| 4     | Мощность в одном канале тока, ВА                             | не меньше 10         |
| 5     | Дискретность задания напряжений, %                           | не больше 0,2        |
| 6     | Дискретность задания токов, %                                | не больше 0,2        |
| 7     | Основная погрешность задачи синусоидальных напряжений, %     | не больше 0,5        |
| 8     | Основная погрешность задачи синусоидальных то-               | не больше 0,5        |
| 9     | Основная погрешность задания мощности, %                     | не больше 1,0        |
| 10    | Диапазон задания рабочих частот по напряжению и току, Гц     | от 45,0 до 65,0      |

Продолжение таблицы 2.

|    |   |                       |
|----|---|-----------------------|
| 11 | Дискретность задания рабочих частот по напряжению и току, Hz            | не больше 0,05        |
| 12 | Диапазон рабочих углов сдвига фаз между напряжениями, градусов          | 0±180                 |
| 13 | Основная погрешность задания частоты, %                                 | 0,05                  |
| 14 | Диапазон рабочих углов сдвига фаз между напряжениями и токами, градусов | 0±180                 |
| 15 | Дискретность задания углов сдвига фаз, градусов                         | не больше ±0,1        |
| 16 | Коэффициент нелинейных искажений выходных напряжений и токов, %         | не больше 2           |
| 17 | Коэффициент несимметрии трехфазной системы напряжений, %                | не больше 1           |
| 18 | Долговременная нестабильность, %/мин.                                   | не больше 1,0         |
| 19 | Потребляемая мощность, ВА   | не больше 350         |
| 20 | Размеры кейса трехфазного источника (hхlхd), мм х мм х мм               | не больше 170х500х350 |
| 21 | Размеры кейса рабочего эталона (hхlхd), мм х мм х мм                    | не больше 100х350х350 |
| 22 | Масса кейса трехфазного источника, кг                                   | не больше 12          |
| 23 | Масса кейса рабочего эталона, кг  | не больше 7           |



Рис. 4 – Многофункциональный электросчетчик прямого включения типа «ЕТ»

Функциональные возможности счетчиков могут расширяться за счет модулей, кроме того, наличие микропроцессора позволяет за счет применения новых программ управления реализовывать новые сервисные функции. В связи с этим перечень технических характеристик электронных счетчиков может быть различным.

**Выводы.** Разработка метрологического обеспечения средств коммерческого учета и качества электрической энергии позволяет определить метрологические характеристики как анализаторов, так и счетчиков электрической энергии. Портативная установка позволяет проводить поверку непосредственно у потребителей электрической энергии.

**Список литературы:** 1. Гриб О.Г., Васильченко В.І. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії / під редакцією Гриба О. Г. Харків: ПП «ранок – НТ», 2012. – 516 с. 2. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (Аналоговые и цифровые). Изд. пятое. – Киев.: Вища школа, 1986. 504с 3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.

**Bibliography(translation):** 1. Gryb O., Vasilchko V. *Automated accounting and energy quality* Kharkov: PE "morning - NT", 2012. 2. Ornatsky P. *Automatic measurement and instrumentation ( analog and digital)*. Kiev: High School. 1986. 3. GOST 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Norms of quality of electric energy in power supply systems for General use. - Minsk.: IPC Publishing standards. - 1998. – 30 P.

*Поступила (received) 23.11.2014*

УДК 621.311

**О.Г. ГРИБ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП»;  
**С.Ю. ШЕВЧЕНКО**, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХП»;  
**Н.С. БЕЛОВ**, соискатель НТУ «ХП»;  
**Д.А. ГАПОН**, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХП»;  
**Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА**, ассистент, НТУ «ХП».

### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Проведено исследование автоматизированной системы контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии. В настоящее время актуальной проблемой является непрерывный контроль перенапряжений и качество электрической энергии. Это обусловлено тем, что при низком качестве электрической энергии срок службы ограничителей перенапряжения снижается. Постоянный мониторинг позволит прогнозировать выход из строя ограничителей перенапряжений. Решение проблемы оптимизации производства, снабжения и потребления электрической энергии возможно только при усовершенствовании системы учета. Целями внедрения автоматизированной системы учета электроэнергии являются переход к тарифам реального времени, получение достоверного баланса производства распределения и потребления электрической мощности или энергии, а также оценка показателей качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** система, перенапряжение, контроль, качество, электроэнергия, ограничитель.

**Вступление.** Объективная необходимость создания АСКУЭ была очевидна и производителям и потребителям электрической энергии уже давно.

Исследования ученых советского времени в области энергетики, электротехники, электроники, метрологии и системотехники позволили создать и внедрить в производство микропроцессорные системы учета электрической энергии. Однако в силу разных причин, и прежде всего экономических, они не получили широкого распространения.

На сегодняшний день существует довольно много современных систем учёта, различных как по масштабам, составу оборудования, функциональным возможностям и по классу точности, так и по цене. Но для того, чтобы понять тенденции развития систем учета электроэнергии, рассмотрение следует начать с первых промышленных образцов АСКУЭ, произведенных в бывшем Союзе. К ним относятся ком -

© О. Г. Гриб, С. Ю. Шевченко, Н. С. Белов, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, 2014.

плекс технических средств (КТС) ЦТ5000 и системы типа ИИСЭ.

**Анализ последних исследований и литературы.** АСКУЭ, устанавливаемые на энергообъектах для автоматизированного контроля и учета электроэнергии и мощности, в том числе с целью измерений активной и реактивной электроэнергии и мощности, относятся к измерительным системам, в общем случае представляющим собой совокупность функционально объединенных масштабных измерительных преобразователей (измерительные трансформаторы тока и напряжения), интегрирующих приборов (счетчики электроэнергии с импульсным и/или цифровым интерфейсом), концентраторов или устройств сбора данных (далее УСД), устройств сбора и передачи данных (далее УСПД), центральных вычислительных устройств и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого энергообъекта и соединенных между собой каналами и/или линиями связи.

**Цель статьи.** Является разработка автоматизированной системы контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии.

**Постановка проблемы.** В настоящее время актуальной проблемой является непрерывный контроль перенапряжений и качество электрической энергии. Это обусловлено тем, что при низком качестве электрической энергии срок службы ограничителей перенапряжения снижается. Постоянный мониторинг позволит прогнозировать выход из строя ограничителей перенапряжений.

**Материалы исследований.** Вид и значение напряжения на выводах варистора определяют характер тока, протекающего через него. Исходя из этого на рисунке 1 представлена структурная схема автоматизированной системы контроля перенапряжений с одновременным мониторингом качества электрической энергии. Такое построение позволяет осуществлять диагностику работы ограничителей перенапряжений от равней перенапряжения и качества электрической энергии [2].

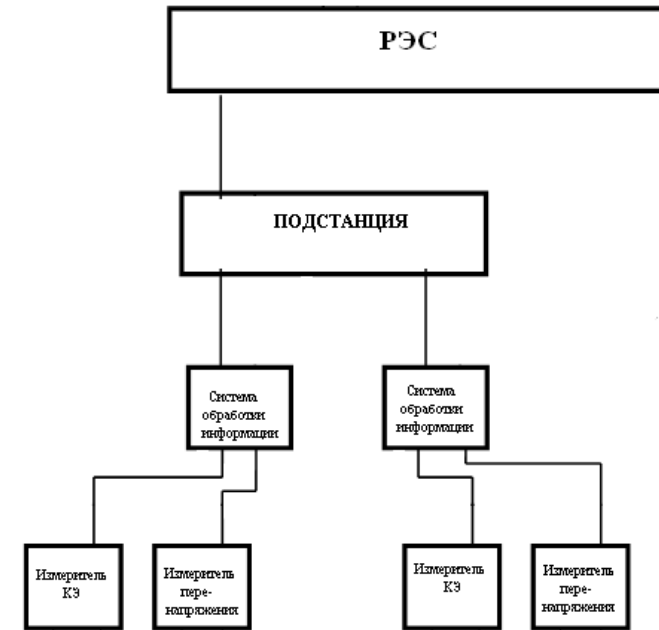


Рис. 1 - Структурная схема автоматизированной системы контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии

На рис. 1 представлена структурная схема двухуровневой автоматизированной системы, в которой первый уровень это подстанция, а второй это районные электрические сети, где на диспетчерское управление поступает информация с отдельных подстанций о состоянии работоспособности ограничителей перенапряжений. Кроме того, важным фактором эксплуатации является диагностика состояния ограничителей перенапряжения в функции качества электрической энергии. Такое построение позволяет снизить уровень аварийности а подстанциях связанных с выходом из строя ограничителей перенапряжений и тем самым защитить электрооборудование.

**Результаты исследований.** Анализ качества электрической энергии по различным отраслям промышленности, в которых на подстанциях используются ограничители перенапряжений приведены в табл. 1.



Представлены итоговые показатели соответствия ПКЭ требованиям исследуемых характерных потребителей.

Таблица 1 - Соответствие ПКЭ требованиям ГОСТ 13109-97[3] для исследуемых потребителей

| № п/п | Категория характерных потребителей | Количество точек контроля КЭ |                                       |                         |                                |   |
|-------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|
|       |                                    | Всего (N)                    | Без нарушения допустимых значений ПКЭ | КЭ соответствует нормам | КЭ не соответствует нормам (X) | Доля точек с неприемлемой КЭ (X/N·100), % |
| 1     | Металлургия                        | 16                           | 0                                     | 6                       | 10                             | 63  |
| 2     | Машиностроение                     | 5                            | 0                                     | 3                       | 2                              | 40  |
| 3     | Железная дорога                    | 2                            | 0                                     | 0                       | 2                              | 100                                       |
| 4     | Химическая промышленность          | 6                            | 0                                     | 1                       | 5                              | 83  |
| 5     | Облэнерго                          | 5                            | 2                                     | 5                       | 0                              | 0   |
| 6     | Генерация                          | 4                            | 0                                     | 2                       | 2                              | 50  |
| 7     | Межгосударственный переток         | 3                            | 0                                     | 3                       | 0                              | 0   |
|       | ВСЕГО                              | 41                           | 2                                     | 20                      | 21                             | 51  |

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что:

- для всех категорий зафиксированы нарушения;
- хуже качество на границе с железной дорогой;
- лучшее качество на границе с другими государствами и облэнерго.

48 ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098)

Анализ полученных результатов (см. табл. 1) позволяет отметить следующее:

1. В 51% точек измерения КЭ не соответствует нормам ГОСТ 13109-97[3], большая часть нарушений связана с не синусоидальностью кривой напряжения.
2. Для всех категорий потребителей зафиксированы нарушения допустимых значений ПКЭ.
3. Худшее КЭ зафиксировано на границе с железной дорогой.
4. Лучшее КЭ зафиксировано на границе с Россией и облэнерго.

По отдельным показателям КЭ анализ дает:

- По несинусоидальности кривой напряжения наихудшая ситуация на границе с железной дорогой. Зафиксированы нарушения по коэффициенту искажения синусоидальности формы кривой напряжения и коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения по следующим номерам гармоник (2, 3, 5, 6, 7, 9,10, 11,13, 14, 15,16, 17, 19, 21, 23, 24, 27, 33, 39). Также зафиксированы нарушения по высшим гармоникам во всех точках контроля, относящихся к металлургии, машиностроению, химической промышленности, генерации и межгосударственных перетокам. Ситуация по КЭ на границе с облэнерго лучше, где нарушения нормально-допустимых значений зафиксированы только в части точек контроля.

- По уровню напряжения следует отметить, что, хотя установленное отклонение напряжения на шинах ПС НЭК не нормировано, но зафиксированы провалы напряжения для более 60 % потребителей.

- По несимметрии напряжения зафиксированы нарушения на границе с железной дорогой (по нулевой последовательности) и облэнерго (по нулевой и обратной последовательностям).

**Выводы.** Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электроэнергии, позволяет фиксацию нарушений допустимых значений ПКЭ и информирования оперативного персонала об этих нарушениях, а также ведения архивов учета параметров качества электроэнергии и их корреляцию с выходом из строя ограничителей перенапряжения.

**Список литературы:** 1. *Орнатский П.П.* Автоматические измерения и приборы (Аналоговые и цифровые). Изд. пятое. – Киев.: Вища школа, 1986. 504с. 2. *Черемісін М.М., Зубко В.М.* Автоматизація обліку та управління електроспоживанням. Харків: “Факт”, 2005. – 192с. 3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098)

49

**Bibliography(translation):** 1. Ornatsky P. Automatic measurement and instrumentation ( analog and digital) . Ed. the fifth. - Kiev .: High School , 1986 – 504s. 2. Cheremisin N., Zubco V., Automation facilities management supply. - Kharkiv : "Fact" , 2005 – 192s. 3. GOST 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Norms of quality of electric energy in power supply systems for General use. - Minsk.: IPC Publishing standards. - 1998. – 30 P.

*Поступила (received) 25.10.2014*

УДК 621.315.2

*А.Г. КЕССАЕВ*, аспирант НТУ «ХПИ»

### **АНАЛИЗ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ПОМЕХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ КАБЕЛЕЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

На основе проведенных измерений уровня частичных разрядов в силовых кабельных линиях выполнен анализ влияния внутренних и внешних помех на полученные результаты. Показано, что учет особенностей освещения лаборатории, степени ее экранированности, а также качества заземления измерительной аппаратуры приводит к повышению точности определения ЧР.

**Ключевые слова:** частичные разряды, экранирование, рабочее освещение, заземление.

**Введение.** Проводя какие-либо измерения, будь то электростатические, магнитостатические или электромагнитные параметры объекта исследования, мы сталкиваемся с проблемой помехозащищенности, как измерительной цепи, так и самого образца. Эффективным методом снижения уровня электромагнитного излучения является экранирование их источников. В соответствии с типом проводимого эксперимента, различают следующие способы экранирования: электростатическое, магнитостатическое и электромагнитное.

Электростатическое и магнитостатическое экранирование основаны на замыкании экраном (обладающим в первом случае высокой электропроводностью, а во втором – магнитопроводностью) соответственно электрического и магнитного полей.

Электростатическое экранирование по существу сводится к замыканию электростатического поля на поверхность металлического экрана и отводу электрических зарядов на землю (на корпус прибора). Заземление электростатического экрана является необходимым элементом при реализации электростатического экранирования.

Применение металлических экранов позволяет полностью устранить влияние электростатического поля. При использовании диэлектрических экранов, плотно прилегающих к экранируемому элементу, можно ослабить поле источника наводки в  $\epsilon$  раз, где  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала экрана.

Экранирование высокочастотного магнитного поля основано на использовании магнитной индукции, создающей в экране переменные индукционные вихревые токи (токи Фуко). Магнитное поле этих токов

© А. Г. Кессаев. 2014

внутри экрана будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами - в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным внутри экрана и усиленным вне его. Вихревые токи в экране распределяются неравномерно по его сечению (толщине). Это вызвано явлением поверхностного эффекта. Благодаря поверхностному эффекту плотность вихревых токов и напряжённость переменного магнитного поля по мере углубления в металл падают по экспоненциальному закону.

Эффективность магнитного экранирования зависит от частоты и электрических свойств материала экрана. Чем ниже частота, тем слабее действует экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одного и того же экранирующего эффекта. Для высоких частот, начиная с диапазона средних волн, экран из любого металла толщиной 0,5-1,5 мм действует весьма эффективно. При выборе толщины и материала экрана следует учитывать механическую прочность, жёсткость, стойкость против коррозии, удобство стыковки отдельных деталей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобство пайки, сварки и пр.

На высоких частотах применяется исключительно электромагнитное экранирование. Действие электромагнитного экрана основано на том, что высокочастотное электромагнитное поле ослабляется им же созданным (благодаря образующимся в толще экрана вихревым токам) полем обратного направления.

**Цель статьи** – обоснование использования защитных электромагнитных экранов при проведении высокочастотных измерений на примере диагностики кабелей по характеристикам частичных разрядов.

Для оценки эффективности экранирования электрической или магнитной составляющей электромагнитного поля вводят понятие коэффициента экранирования (ослабления):

$$A_E = 20 \lg(E_0 / E_A), \quad (1)$$

$$A_H = 20 \lg(H_0 / H_A), \quad (2)$$

где  $A_E$  - коэффициент экранирования (ослабления) по электрической составляющей электромагнитного поля, дБ;

$A_H$  - коэффициент экранирования (ослабления) по магнитной составляющей электромагнитного поля, дБ;

$E_0$  - напряжённость электрической составляющей электромагнитного поля в точке измерения в отсутствие экрана, В/м;

$E_A$  - напряжённость электрической составляющей электромагнитного поля в точке измерения при наличии экрана, В/м;

$H_0$  - напряжённость магнитной составляющей электромагнитного поля в точке измерения в отсутствие экрана, А/м;

$H_A$  - напряжённость электрической составляющей электромагнитного поля в точке измерения при наличии экрана, А/м.

**Материалы экранов.** Металлические материалы (сталь, медь, алюминий, цинк, латунь), применяемые для экранирования, изготавливаются в виде листов, сеток и фольги. Все эти материалы удовлетворяют требованию устойчивости против коррозии при использовании соответствующих защитных покрытий.

Теория и практика показывают, что с точки зрения стоимости материала и простоты изготовления преимущества на стороне экранированного помещения из листовой стали.

Наиболее технологичными являются конструкции экранов из стали, так как при их изготовлении и монтаже можно широко использовать сварку или пайку. Металлические листы должны быть между собой электрически соединены по всему периметру. Шов электросварки или пайки должен быть непрерывным, с тем чтобы получить цельносварную конструкцию экрана. Толщина стали выбирается исходя из назначения конструкции экрана и условий его сборки, а также из возможности обеспечения сплошных сварных швов при изготовлении.

Экраны из стали обеспечивают ослабление электромагнитного излучения более чем на 100 дБ (см. табл. 1).

Сетчатые экраны проще в изготовлении, удобны для сборки и эксплуатации. Для защиты от коррозии сетки целесообразно покрывать антикоррозийным лаком. К недостаткам сетчатых экранов следует отнести невысокую механическую прочность и меньшую эффективность экранирования по сравнению с листовыми.

Для сетчатых экранов пригодна любая конструкция шва, обеспечивающая хороший электрический контакт между соседними полотнищами сетки не реже чем через 10-15 мм. Для этой цели может применяться пайка или точечная сварка.

Экран, изготовленный из лужёной низкоуглеродистой стальной сетки с ячейкой 2,5-3 мм, даёт ослабление порядка 55-60 дБ, а из такой же двойной (с расстоянием между наружной и внутренней сетками 100 мм) около 90 дБ. Экран, изготовленный из одинарной медной сетки с ячейкой 2,5 мм, имеет ослабление порядка 65-70 дБ.

Экраны, изготавливаемые из фольги, имеют толщину 0,01-0,05 мм. Монтаж экранов из фольги достаточно прост, крепление фольги к основе экрана проводится чаще всего с помощью клея.

Материалы-диэлектрики также используются в качестве основы для создания экранов

Таблица 1 - Предельно достижимые величины ослабления электромагнитных излучений для различных типов экранирующих помещений

| Тип конструкции экранированного помещения  | Степень экранирования, дБ |
|--|---------------------------|
| Одиночный экран из сетки; одиночная экранированная дверь, оборудованная зажимными устройствами; внутренние рольставни на окно; специальные электрические фильтры; экранирующие фильтры для притока и вытяжки (вентиляционные).   | 40                        |
| Одиночный экран из металлизированной ткани; одиночная экранированная дверь, оборудованная зажимными устройствами; экранированное окно с экранированным стеклом, внутренние рольставни на окно; специальные электрические фильтры; экранирующие фильтры для притока и вытяжки (вентиляционные). | 60                        |
| Двойной экран из сетки или металлизированной ткани; двойная экранированная дверь-тамбуром и зажимными устройствами конструкция; специальные электрические фильтры; экранирующие фильтры для притока и вытяжки (вентиляционные).  | 80                        |
| Сплошной стальной экран; пневматическая экранированная дверь; специальные электрические фильтры; экранирующие фильтры для притока и вытяжки (вентиляционные).  | 100                       |

В обычных (неэкранированных) помещениях основной экранирующий эффект обеспечивают железобетонные стены домов (табл. 2).

Как правило, степень экранирования обычных помещений невысока вследствие наличия в них окон, дверей и вентиляционных отверстий, поэтому их экранированию необходимо уделять первостепенное внимание (см. табл. 2).

Таблица 2 - Степень экранирующего действия различных типов зданий

| Тип здания | Степень экранирования, дБ |         |          |
|------------|---------------------------|---------|----------|
|            | 100 МГц                   | 500 МГц | 1000 МГц |
|            |                           |         |          |

Продолжение таблицы 2

| Оконный проём 30 % от площади стены   |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|
| Кирпичное здание с толщиной стен 1,5 кирпича  | 13-15 | 15-17 | 16-19 |
| Железобетонное здание с ячейкой арматуры 15 x15 см и толщиной стен 160 мм               | 20-25 | 18-19 | 15-17 |
| Оконный проём 30 % от площади стены, закрытый металлической решёткой с ячейкой 5 x 5 см |       |       |       |
| Кирпичное здание с толщиной стен 1,5 кирпича  | 17-19 | 20-22 | 22-25 |
| Железобетонное здание с ячейкой арматуры 15 x15 см и толщиной стен 160 мм               | 28-32 | 23-27 | 20-25 |

**Требования к экранированным помещениям.** Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) является наиболее широкой областью применения экранированных помещений.

**Экранированное помещение** - это экранированное или имеющее металлические внутренние поверхности помещение, сконструированное специально для отделения внутренней электромагнитной обстановки от внешней в целях предотвращения ухудшения качества функционирования ТС при воздействии внешних полей и ослабления электромагнитных излучений от ТС во внешнее пространство (ГОСТ Р 51317.4.3-99). Параметры помех, в зависимости от электромагнитной обстановки, могут изменяться в достаточно широких пределах. Возможные диапазоны электромагнитных помех приведены в таблице 3.

**В зависимости от эффективности экранирования (рис.1) и конструктивного исполнения экранированные камеры (ЭК) подразделяют на три класса в соответствии с табл. 4.**

Таблица 3 – Возможные диапазоны параметров помех

| Параметр                               | Значение                           |
|--|------------------------------------|
| Частота, Гц                            | 0 – 10 <sup>10</sup>               |
| Максимальное значение напряжения, В    | 10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>6</sup> |
| Скорость изменения напряжения, В/с     | 0 – 10 <sup>12</sup>               |
| Напряженность электрического поля, В/м | 0 – 10 <sup>3</sup>                |
| Максимальное значение тока, А          | 10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>5</sup> |
| Длительность импульса, с               | 10 <sup>-8</sup> – 10              |
| Энергия импульса, Дж                   | 10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>7</sup> |

Таблица 4 - Классификация экранированных камер

| Классы экранированных камер      | I класс         | II класс                      | III класс          |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|
| Эффективность экранирования*, дБ | Свыше 80 до 120 | Свыше 30 до 80                | До 30 включительно |
| Конструктивное исполнение        | Неразборная     | Неразборная, сборно-разборная |                    |

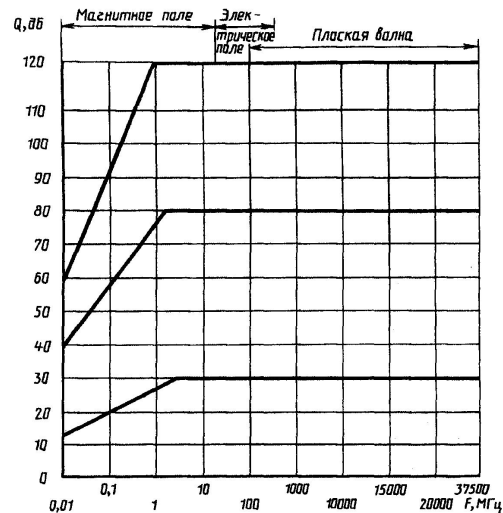


Рис. 1. - Зависимость эффективности экранирования ЭК от частоты

**Рабочее освещение.** В качестве источника рабочего освещения в экранированных камерах необходимо применять лампы накаливания. Допускается применять люминесцентные лампы, если уровень создаваемых ими электромагнитных помех на порядок ниже чувствительности технических средств и испытательной аппаратуры, расположенных в ЭК.

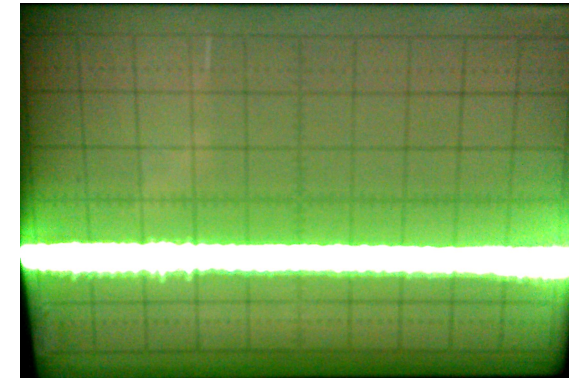
Не допускается применять лампы типа ДРЛ (дуговая, ртутная, люминесцентная) и ДРИ (дуговая, ртутная с излучающими добавками).

В ЭК должно быть предусмотрено аварийное освещение.

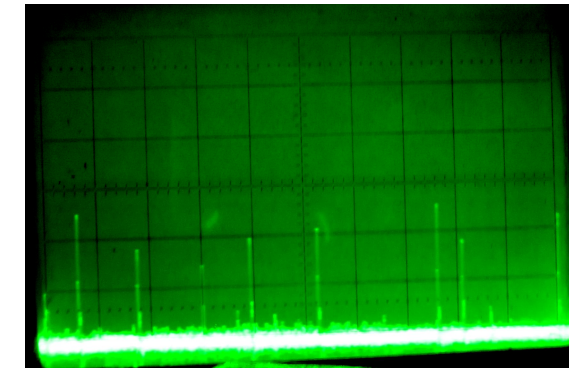
**Влияние рабочего освещения на проведение измерений ЧР.**

При проведении испытаний не всегда есть возможность использовать

экран либо ЭК. В таких случаях рекомендуется уменьшать длину защитного заземления измерительной аппаратуры, так как оно может служить «антенной», и любое возмущение электромагнитного поля будет приниматься как сигнал измерения. Такими источниками помех могут служить любые газоразрядные лампы (смотри рис.2).



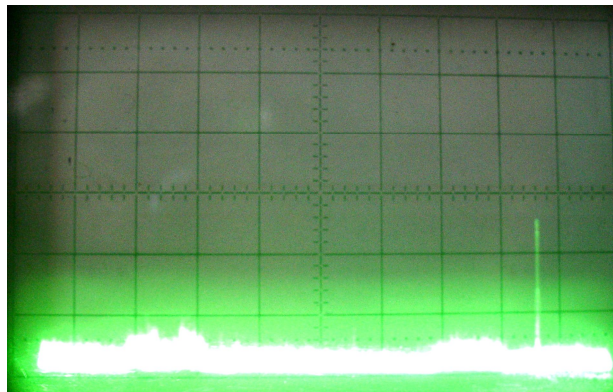
а



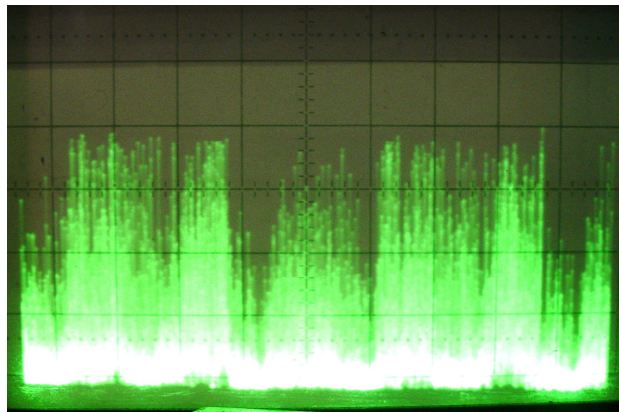
б

Рис.2 – Фото оциллограммы шумов схемы: а – отключенном основном оборудовании и осветительных люминесцентных ламп типа ДРЛ; б – при включенных лампах типа ДРЛ. Цена делений: по горизонтали 2 мс/дел; по вертикали 2 В/дел, что соответствует 2 нКл/дел (При общем усилении 89 дБ: 20 дБ (предварительный усилитель) + 100 дБ (основной усилитель) – (1+2+4+16+8) дБ (ослабление) = 89 дБ.

Важно отметить, что время проводимого испытания прямо пропорционально чувствительности схемы измерения (рис. 3).



*a*



*б*

Рис.3 – Фото осциллограммы шумов схемы: *a* – до начала работы *б* – после. Цена делений: по горизонтали 2 мс/дел; по вертикали 1 В/дел, что соответствует 1 пКл/дел (При общем усилении 77 дБ: 20 дБ (предварительный усилитель) + 80 дБ (основной усилитель) – (1+2+4+16) дБ (ослабление) = 77 дБ.

В то же время, при использовании длинной заземлительной цепочки (имеется в виду, что приборы подключены одним контуром) или при плохом качестве экранирования высокочастотных усилителей имеют место «наводки», которые могут возникать от рабочего освещения. Так, проводя измерения уровня ЧР в кабельной линии при включенных

лампах дневного света, мы получаем «мнимые» частичные разряды (рис.4).

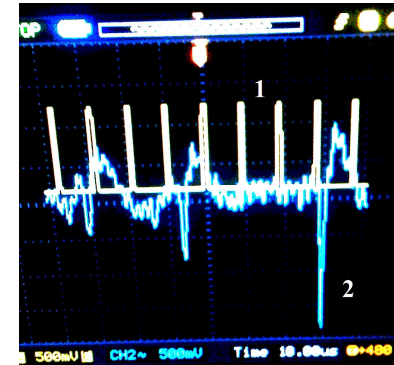


Рис. 4 – Осциллограмма поданных прямоугольных импульсов (1) и результатов измерения с включенными лампами типа ДРЛ (2)

Как видим, амплитуда полученного результирующего сигнала превышает вводимый практически в два раза, что существенно осложняет оценку ЧР испытуемого образца. В то же время, заземляя измерительную аппаратуру наименьшим контуром и применяя в качестве осветительных приборов лампы накаливания, получаем меньшие флуктуации результирующего сигнала (3, рис. 5), возникающие большей частью от работы самих элементов измерительной цепи.

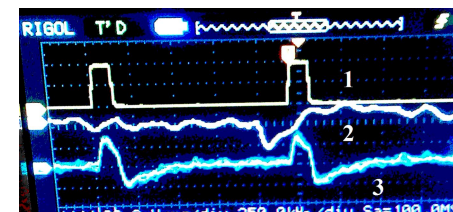


Рис. 5 – Результаты измерения ЧР при максимально уменьшенных внешних и внутренних помехах. 1 – вводимый прямоугольный импульс; 2 – полученный сигнал ЧР; 3 – результирующий сигнал

**Выводы.** Таким образом, отсутствие экранированного помещения осложняет проведение исследований электростатического, магни-

тостатического и электромагнитного полей. Также, некачественное заземление или большая длина контуров заземления измерительной аппаратуры способствует получению некорректного результата измерения. Повешения точности эксперимента по обнаружению ЧР кабельной линии можно добиться путем использования одинаковых материалов и сечений заземляющих элементов и ламп накаливания.

**Список литературы:** 1. ГОСТ 30373 – 95 Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические требования и методы испытаний. 2. 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. 3. ГОСТ Р 51318.15 - 99 (СИСР 15- 96). Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогичного оборудования. Нормы и методы испытаний. Срок введения 01.01.2001 г. Взамен ГОСТ 21177 - 82. 4. Стандарт МЭК 60270. Методы высоковольтных испытаний. Измерение частичных разрядов. Издание третье, 2000 г. – 55 с. 5. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. / Г. С. Кучинский - Л.: Энергия. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 224 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. GOST 30373 – 95 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Oborudovanie dlja ispytanij. Kamery jekranirovannye. Klassy, osnovnye parametry, tehniceskije trebovanija i metody ispytanij. 2. GOST R 51317.6.2 - 99 (MEKK 61000 – 6 - 2 - 99). Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Ustojchivost' k jelektromagnitnym pomехам tehniceskikh sredstv, primenjaemyh v promyshlennyh zonah. Trebovanija i metody ispytanij. 3. GOST R 51318.15 - 99 (SISPR 15- 96). Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Radiopomehi industrial'nye ot jelektricheskogo svetovogo i analogichnogo oborudovanija. Normy i metody ispytanij. Srok vvedenija 01.01.2001 g. Vzamen GOST 21177 - 82. 4. Standart MEKK 60270. Metody vysokovol'nyh ispytanij. Izmerenie chastichnyh razrjadov. Izdanie tret'e, 2000 g. – 55 s. 5. Kuchinskij G.S. Chastichnye razrjady v vysokovol'nyh konstrukcijah. Leningrad: Jenergija. 1979.

*Поступила (received) 26.11.2014*

УДК 621.315

**КИМ ЕН ДАР**, д-р тех.наук, проф. УИПА, Славянск;  
**Д.Г. КАРЮК**, директор по производству, «Славэнергопром»,  
Славянск;

## ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОХОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Основной причиной выхода со строя проходных изоляторов с полимерной изоляцией класса 35 кВ является электрическое старение, обусловленное высоким электрическим полем. На основе результатов аналитического исследования и численных решений уравнения Лапласа для комплексной проводимости обоснованы рекомендации по выравниванию электрического поля изолятора. Сформулированы оптимальные соотношения основных параметров конструкции изолятора с учетом характеристик применяемых диэлектрических материалов. Приведена количественная оценка краевого эффекта заземленного фланца, даны практически реализуемые пути снижения такого эффекта: увеличение радиуса закругления краев фланца и нанесение слабопроводящего покрытия на ограниченном участке внешней поверхности опорной трубы.

**Ключевые слова:** проходной высоковольтный изолятор, полимерная изоляция, напряженность электрического поля, краевой эффект

**Введение.** Опыт создания и эксплуатации проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией показал в целом преимущества, присущие изоляционным конструкциям с защитным покрытием из кремнийорганических эластомеров. Это, прежде всего, высокая устойчивость к загрязнению, простота их обслуживания, а также относительно низкая себестоимость, поскольку отсутствует дорогостоящий и при этом хрупкий фарфоровый элемент. Вместе с тем на некоторых электропредприятиях были отмечены ранние отказы изоляторов класса 35 кВ по причине электрического пробоя.



Рис. 1 – Следы электрических разрядов

Обследование поврежденных изоляторов, а также лабораторными исследованиями было установлено, что имеет место электрическое старение изоляции на самом напряженном промежутке изоляции: токопровод – фланец, что обусловлено протеканием частичных разрядов (рис. 1).

В этих условиях, как известно [1], срок службы изоляции оценивается степенной функцией от максимальной напряженности электрического поля в диэлектрике:

$$\tau = AE^{-n}$$

где  $n = 5 \div 7$  при переменном токе промышленной частоты.

Поэтому, при прочих равных технологических факторах, которые так или иначе могут повлиять на электрическую прочность, очень важно, чтобы конструкция изолятора обеспечивала оптимальное распределение поля в наиболее уязвимом участке изоляции.

**Основной материал.** На рис.2 приведен общий вид полимерного проходного изолятора с цилиндрическим токопроводом. Изоляционное тело, охватывающее концентрически токопровод, выполняется из двух составляющих: из механически прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, из кремнийорганической резины. С целью исключения воздушных полостей резиной целиком заполняется пространство между токопроводом и опорной втулкой. Ею покрывают внешнюю поверхность втулки, и таким образом создается монолитная изоляция между потенциальным токопроводом и заземляемым фланцем.

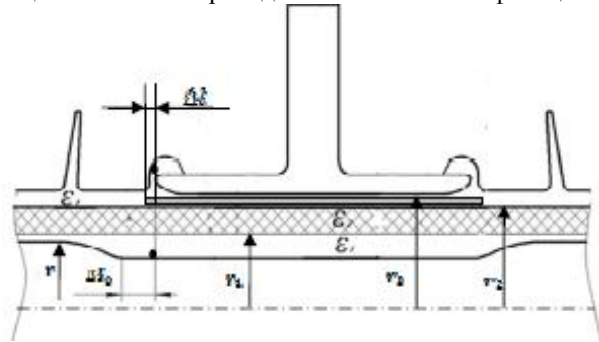


Рис. 2 – Общий вид проходного изолятора

Ранее было показано [1, 2], что для оценки максимальной напряженности поля в серединной области изолятора, на поверхности токо-

провода напротив фланца, достаточно воспользоваться уравнением поля цилиндрического конденсатора:

$$E_{m,\tau} < E_{m,\zeta} = \frac{U}{r_0} \cdot \frac{1}{\left( \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (1)$$

С учетом  $\varepsilon_1 = 3$

$$E_{m,\tau} \approx \frac{U}{r_0} \cdot \frac{1}{r_0 \left[ \ln \frac{r_3}{r_0} + \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \quad (2)$$

Из приведенных формул вытекает, что на распределение электрического поля в многослойном изоляционном промежутке токопровод – фланец, существенное влияние оказывают диэлектрические характеристики составных элементов изоляции  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и соотношение их толщин  $r_1$ ,  $r_2$ . Кроме того максимальные значения напряженностей электрического поля, что имеет место на поверхностях токопровода и фланца, также зависят от взаимного расположения и их конфигурации.

Диэлектрическая проницаемость используемых на сегодня резин  $\varepsilon_1$  заметно меньше, чем  $\varepsilon_2$  стеклопластиковой изоляции, поэтому вторая слагаемая в знаменателе (2) всегда имеет отрицательное значение. Следовательно, чем меньше это значение, тем меньше окажется максимальная напряженность поля у поверхности токопровода, т.е., можно записать следующее условие минимума  $E_{m,\tau}$ :

$$E_{m,\tau} \rightarrow \min, \text{если} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \rightarrow 0 \quad (3)$$

Из соотношения (3) можно видеть, что для снижения поля у токопровода необходимо применять изоляционные материалы с близкими диэлектрическими проницаемостями или же по возможности уменьшить толщину опорной трубы:

$$\left( 1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \sim \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\Delta r}{r_1} \rightarrow 0 \quad (4)$$

где:  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ;  $\Delta r = r_2 - r_1$

Для инженерной практики удобнее пользоваться условием, учитывая общим изоляционное расстояние между электродами  $\Delta R$ :

$$\frac{\Delta r}{\Delta R} < \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (5)$$



Правомерность соотношения (5) была подтверждена численными методами электростатического поля с комплексной проводимостью исследуемой области для реальных проходных изоляторов на классы напряжения 10-35 кВ. На рис. 3 приведен пример распределения радиальной напряженности поля в изоляции в поперечном направлении (см. рис. 3), начиная от токопровода *m.a* и заканчивая торца фланца изолятора с полусферическим профилем *m.b*. При расчетах были приняты следующие параметры высоковольтного проходного изолятора с номинальным напряжением 35 кВ:

Таблица 1 – Параметры высоковольтного проходного изолятора

| Напряжение | Материал  |  |   | Примечание                             |
|------------|---|--|---|--|
|            | Резина  | Стеклопластик  | Воздух  |  |
| $U=25$ кВ  | $\varepsilon_1=2,5;$<br>$\sigma_1=1 \cdot 10^{-13}$ | $\varepsilon_2=4 \div 8;$<br>$\sigma_2=1 \cdot 10^{-12}$ | $\varepsilon_3=1;$<br>$\sigma_3=1 \cdot 10^{-16}$ | $\sigma$ - удельная проводимость, См/м |

График распределения поля наглядно иллюстрирует явление вытеснения поля из объема опорной трубки в сторону резиновых оболочек (см. область  $\varepsilon_2$ ). Из рис. 3 (кривая 1) также видно, что максимальная напряженность поля у торца фланца  $E_{m,\phi}$  намного превосходит поле у токопровода, что обусловлено краевым эффектом.

Как известно, краевой эффект удается существенно смягчить увеличивая радиус кривизны, в данном случае, торцевой части электрода. Количественная оценка сравниваемых полей представлена на рис. 4 в виде распределений напряженностей вдоль наиболее электрически нагруженных поверхностей краев электрода [2].

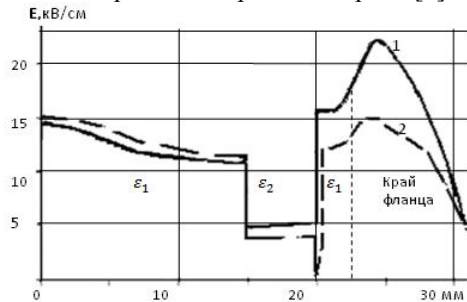


Рис. 3 – Распределение напряженности поля в промежутке *m, a – m, b*

Значения напряженности поля на этом рисунке приведены в относительных единицах, относительно наибольшей напряженности на по-

верхности края фланца с измененным профилем (зависимость 2), что сделано для того чтобы наглядно представить уровень возможного выравнивания поля. Как можно заключить по рис. 4, посредством оптимизации формы краев фланца по образцу электрода Роговского [3] удастся уменьшить напряженности поля ниже наибольшей напряженности поля на поверхности токопровода:

$$E_{m,\phi} \leq E_{m,\tau} \quad (6)$$

Для последующего снижения напряженности поля можно пойти по пути простого увеличения изоляционного промежутка между электродами.

Очевидно, чем больше общий промежуток  $\Delta R$  между токопроводом и фланцем, тем ниже в среднем напряженность поля в этом промежутке, что согласуется приведенным критерием оптимальности радиальных параметров изолятора (5).

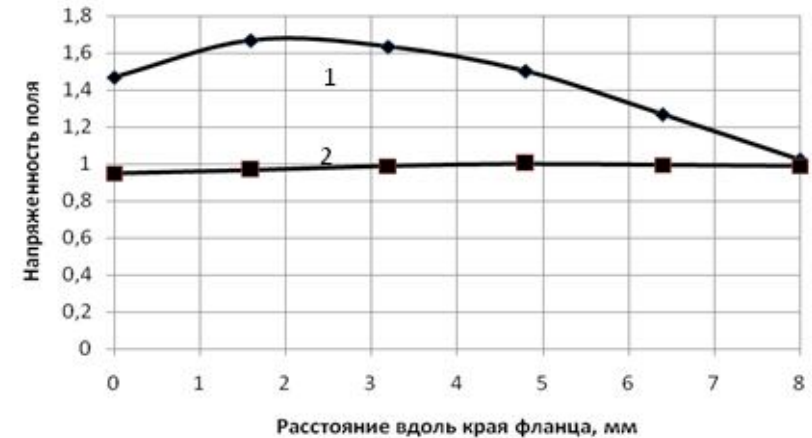


Рис. 4- Распределение напряженности поля вдоль поверхности краев фланца: 1- до оптимизации; 2- после оптимизации фланца

Для того чтобы по возможности сохранить жесткость конструкции целесообразнее увеличить общий диаметр токопровода, оставляя при этом исходный диаметр только на участке наибольшей напряженности электрического поля, соответствующей проточкой токопровода, как это показано на рис. 2. При этом минимальная длина проточки должна быть скоординирована с ее глубиной или же общим изоляционным расстоянием  $\Delta R$  следующим образом (рис.5):

$$(0,7 \div 0,8) < \frac{\Delta l}{\Delta R} \quad (7)$$

где  $\Delta l$  - параметр, характеризующий длину проточки (см. рис. 1).

В качестве другого способа выравнивания напряженности поля в области торца фланца может быть предложено применение экранирующих обкладок, как таковое предусмотрено в высоковольтных вводах с бумажно – масляной изоляцией конденсаторного типа [2]. Технология изготовления проходных полимерных изоляторов не позволяет изолирующее тело вести более двух обкладок в виде тонких проводящих покрытий на внутренней и внешней поверхностях опорного элемента.

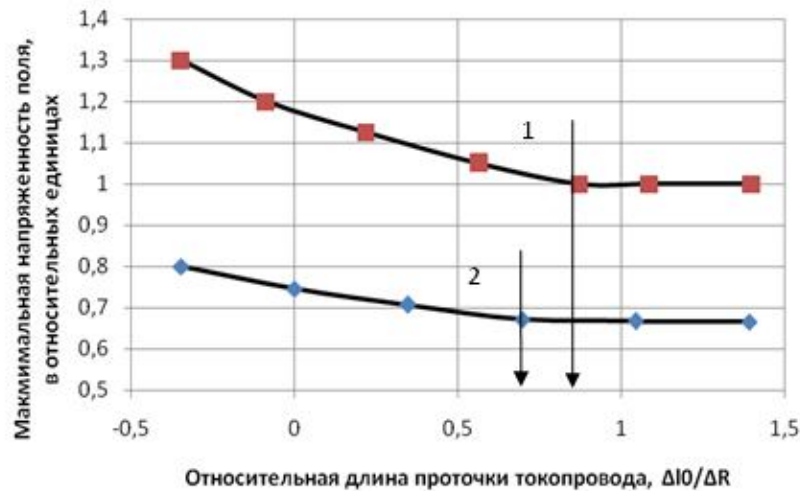


Рис. 5 - Влияние длины заточки токопровода на максимальную напряженность поля на поверхности фланца: 1- до оптимизации; 2- после оптимизации фланца

Расчеты показывают, что для снижения напряженности поля у торца фланца до уровня напряженности на поверхности токопровода (6) можно ограничиться только одной экранирующей обкладкой на внешней стороне стеклопластикового диэлектрика. Как отмечалось выше (см. рис. 3), стеклопластик нагружен электрически значительно слабее, чем резиновая изоляция и этим обстоятельством объясняется неэффективность второй выравнивающей обкладки. Более того технически непросто установить создать на внутренней поверхности опорной втулки экранирующий элемент.

Качественно эффект выравнивания поля проводящим элементом можно оценить соотношением разностей потенциалов промежутков токопровод – обкладка,  $\Delta\varphi_{0,2}$  и обкладка – фланец,  $\Delta\varphi_{2,3}$ , иными словами, соотношением емкостей этих промежутков  $C_{0,2}$  и  $C_{2,3}$ :

$$\frac{\Delta\varphi_{2,3}}{\Delta\varphi_{0,2}} = \frac{C_{0,2}}{C_{2,3}} \rightarrow \min \quad (8)$$

При заданных диэлектрических характеристиках емкость цилиндрического конденсатора зависит от толщины изоляционной прослойки и от длины электродов: чем тоньше изоляция и чем длиннее электроды, тем больше емкость. Очевидно, величина емкости промежутка токопровод – обкладка  $C_{0,2}$  пропорционально возрастает с увеличением длины проводящей обкладки, в тоже время емкость  $C_{2,3}$  промежутка обкладка – фланец практически ограничивается осевой длиной фланца. Действительно, расчеты показали, что наибольший эффект выравнивания поля достигается в том случае, если длина экрана примерно равна длине фланца.

На рис. 6 представлены зависимости максимальной напряженности поля на поверхности торца фланца (кривая 1) и напряженности у края проводящей обкладки (кривая 2) от параметра, определяющего протяженность этой обкладки относительно фланца.

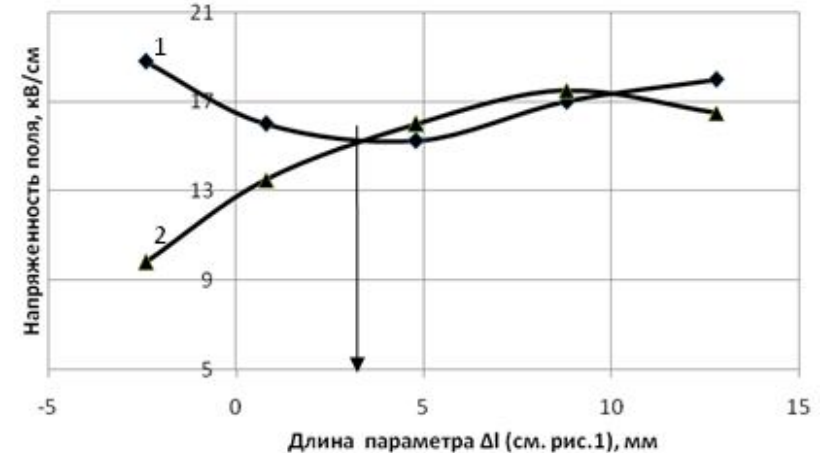


Рис. 6 - Зависимости максимальных напряженностей поля: 1-на поверхности фланца; 2- на краю экрана от взаимного их расположения

Необходимо предостеречь, что введение проводящего элемента может привести к образованию очагов повышенной электрической напряженности в теле изоляции, поэтому во избежание такого явления целесообразно наносить демпфирующие кольцевые покрытия на краях экрана из слабо проводящей резины ( $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ См/м}$ ).

В настоящее время в производстве больше габаритных изоляционных конструкции применяются двухкомпонентные эластомеры, LSR - жидкие силиконовые резины. Низкая вязкость сырья из жидких резин позволяет при относительно невысоком избыточном давлении добиться полной герметизации узких зазоров между токопроводом, опорным элементом и фланцем, минимизировать образование воздушных щелей в изоляции, на поверхностях составных элементов изолятора. Кроме того, как показывает опыт, с применением жидкой резины просто решается задача однооперационной заливки резиновых оболочек, что минимизирует попадание загрязнений в технологических стыках при многоразовой заливке.

**Выводы:** Рекомендации по оптимизации внутреннего электрического поля:

- предпочтительно выбирать материалы изоляции: резины и опорной трубы с близкими диэлектрическими характеристиками, а соотношения толщин составляющих изоляцию элементов определять в обратной зависимости от их диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ;
- края фланца выполнить с увеличенным радиусом кривизны, придавая им форму электрода Роговского;
- по возможности увеличить изоляционный промежуток между токопроводом и фланцем, используя токопровод с меньшим диаметром на участке, охватываемом фланцем;
- предусмотреть экранирующую обкладку нанесением проводящего покрытия на наружной поверхности опорного изоляционного элемента на противоположном от фланца участке с осевой длиной, близкой длине фланца; по краям обкладки нанести слабо проводящее покрытие;
- минимизировать технологические факторы, которые могут внести инородные включения в изоляции, в том числе, воздушные прослойки, особенно, в промежутке фланец – токопровод. В этой связи предпочтительнее использовать в качестве герметизирующего элемента и защитной оболочки диэлектрические материалы с низкой вязкостью в исходном состоянии.

**Список литературы:** 1. Техника высоких напряжений. Под ред. М.В. Костенко. – М.: «Высшая школа», - 1973. – 528 с. 2. Ким Е.Д., Назаренко А.В., Карюк Д.Г. Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией // Вестник ХГПУ «ХПИ». - 2013. - Выпуск 17. - с. 93-99. 3. Патент RU(11)2423765(13)C1(51). Способ подбора профиля поверхности электродов для высоковольтных разрядников. Юрьев А.Л.,(RU), Николаев Д.П.,(RU), Эльяш С.Л. – 2006. [www.freepatent.ru/patents/2423765](http://www.freepatent.ru/patents/2423765)

**Bibliography ((transliterated):** 1. *Kostenko M. V.* Tehnika vysokih naprjazhenij. Moscow. Vysshaja shkola. 1973. 2. Kim E. D. Nazarenko. A. V. Karjuk D. G. *Issledovanie elektricheskogo polja vysokovol'nogo prohodnogo izoljatora s polimernoj izoljaciej* Vestnik HGPU HPI. No 17. 2013. 93-99. 3. Patent RU(11)2423765(13)C1(51). Sposob podbora profilja poverhnosti jelektrodov dlja razrjadnikov. 2006.

**А.С. КОБОЗЕВ**, канд. техн. наук, Харьков;  
**И.И. СМЛЯНСКИЙ**, канд. техн. наук, Харьков;  
**А.В. ЗАРАТУЙКО**, инженер. НТУ ХПИ

### ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ПРИ ЧАСТЫХ ПУСКАХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ ОБМОТОК В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье рассмотрена возможность построения системы защиты от перегрузки асинхронных двигателей (АД), работающих в повторно-кратковременном режиме, на основе использования в качестве термодатчиков их собственных обмоток. Для этого предложено при каждом пуске, до начала разворота, измерять суммарную мгновенную мощность трех фаз двигателя. Показано, что анализ соотношения максимума и минимума мгновенной трехфазной мощности в начальный момент пуска, позволяет получить однозначную информацию об изменении активного сопротивления обмоток, обусловленного нагревом, и определить температуру перегрева двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, тепловая защита, контроль температуры

**Введение.** Наиболее известны «интегральные» защиты электродвигателей (ЭД) от токов перегрузки ( $I_L$ ), в которых защитная время-токовая характеристика формируется с использованием «интегральной» уставки  $Q_L = I_L^2 t_L$ , где  $I_L^2$  - квадрат величины тока перегрузки, а  $t_L$  - время срабатывания защиты при перегрузке. Алгоритм работы защиты предусматривает после срабатывания «интегральной» защиты задержку времени повторного включения  $t_{зпв}$ , величина которой выбирается из условия охлаждения ЭД до регламентируемого значения. Тем самым «интегральная» защита обеспечивает косвенный контроль за температурным режимом ЭД.

Однако «интегральная» уставка ЭД, работающего в повторно-кратковременном режиме при частых пусках замедляет работу технологического оборудования и снижает его производительность. Поэтому, в защитных устройствах от токов перегрузки ЭД, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы, передовые фирмы исключают «интегральные» уставки, заменяя их временными уставками.

**Анализ литературы.** Временная уставка, величина которой не  
 © А.С. Кобозев, И. И. Смилянский, А. В. Заратуйко. 2014

велика ( $10 \div 30$ )с, существенно снижает время существования тока перегрузки, и тем самым позволяет значительно быстрее произвести повторное включение ЭД. Примером такого защитного устройства ЭД от токов перегрузки являются реле перегрузки по току LR97 D и LT47 фирмы «Schneider-electric» – [1]. В каталоге на реле LR97D и LT47 указывается, что они разработаны для наиболее полного обеспечения защиты электродвигателей именно в повторно-кратковременном режиме и обеспечивают быстрое обнаружение перегрузки по сравнению с устройствами тепловой защиты на основе «интегральной уставки»  $Q_L$ . Это значит, что «временные» защиты более динамичные, чем «интегральные» и поэтому их применение повышает производительность технологического оборудования.

Но следует учитывать, что исключение «интегральных» уставок исключает и возможность косвенного контроля температуры ЭД. Поэтому в случае достаточно агрессивного режима частых пусков ЭД (без снижения нагрузки на механизм), нагрев обмоток ЭД может оказаться выше допустимого. Это значит, что динамичная «временная» защита не может быть эффективной без использования альтернативных косвенному «интегральному» способов контроля температуры обмоток.

Поэтому передовые фирмы, рекомендуя динамичные «временные» защиты для повторно-кратковременного режима, предлагают и свои ЭД, в которых уже встроены термисторы, которые обеспечивают непосредственный контроль температуры статорной обмотки ЭД. Так, например, фирма «ABB» предлагает электродвигатели типа CM-MSE, CM-MSS и CM-MSN с встроенными термисторами и их защиту соответствующими реле перегрузки - E16DU – E1250DU [2].

Одним из недостатков такого способа контроля температуры является определённая ограниченность его применения – он может применяться только для защиты тех ЭД, у которых в обмотки уже встроены термисторы.

Для защиты ЭД без встроенных в них термисторов необходим другой способ контроля температурного режима, при этом, наиболее привлекательным является использование самих обмоток ЭД в качестве термодатчиков.

Один из таких способов [3] предусматривает контроль температуры путём измерения сопротивления статорной обмотки электродвигателя  $R_{\sigma}$  специальным устройством, которое подключается к обмотке ЭД перед каждым его пуском. Этот способ измерения активного сопротивления обмотки ЭД имеет достаточно серьёзные недостатки, обусловленные повышенными габаритами и стоимостью защитного уст-

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098) 71

ройства, а также снижением динамичности работы технологического оборудования.

Кроме того, измерение температуры статорной обмотки ЭД не всегда правильно отражают температурный режим обеих обмоток, т.к. в некоторых случаях (для мощных ЭД) критичными по нагреву являются не статорные, а роторные обмотки. Поэтому более предпочтительной следует считать комплексную оценку температурного режима обеих обмоток.

**Цель работы** – разработка нового способа определения температуры асинхронного электродвигателя в момент пуска.

**Основная часть.** Указанную комплексную оценку температуры обеих обмоток ЭД может дать способ, в котором при каждом очередном пуске будет определяться текущее приведенное активное сопротивление схемы замещения ЭД. Вполне очевидно, что для этого необходимо выбрать такой контролируемый параметр процесса пуска ЭД, изменение которого было бы *достаточно значимым* при увеличении температуры обмоток и, соответственно, их активного сопротивления –  $R_{ЭД}$ .

Таким параметром процесса пуска ЭД, как будет обосновано ниже, может быть *величина мгновенной мощности*, а точнее – *соотношение двух значений мгновенной мощности, зафиксированных в первый период изменения пускового тока*.

Зависимости изменения во времени мгновенных мощностей в фазах  $p_{(a,b,c)}(t)$  в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи, описываются следующими выражениями:

$$p_A(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi) \cdot [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi)e^{-t/\tau}] \quad (1)$$

$$p_B(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi + 2\pi/3) \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi + 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi + 2\pi/3)e^{-t/\tau} \right] \quad (2)$$

$$p_C(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi - 2\pi/3) \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi - 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi - 2\pi/3)e^{-t/\tau} \right] \quad (3)$$

где:  $U$  и  $I$  - соответственно, действующие значения фазных напряжения и тока,  $\tau$  - электромагнитная постоянная времени цепи,  $\psi$  - начальная фаза возникновения возмущения цепи,  $\varphi$  - аргумент коэффициента мощности фазы заторможенного двигателя, связанный с  $\tau$ , с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью обмотки  $L$  заторможенного двигателя следующим соотношением:

$$\varphi = \operatorname{tg}(\omega \tau) = \operatorname{tg}(\omega L / R) \quad (4)$$

Как следует из выражений (1)-(3) мгновенные значения фазных мощностей  $p_{j(a,b,c)}$  в переходной период изменения тока возмущения определяются (кроме легко контролируемых значений  $U$  и  $I$ ) значениями как  $\tau$ , так и угла  $\psi$ . А это значит, что извлечь информацию о текущем значении  $\tau$  обмоток ЭД по мгновенным значениям мощности в фазе невозможно. Но такую информацию можно извлечь, если анализировать *суммарную для всех трех фаз мгновенную мощность*.

Легко показать, что в симметричной трехфазной системе суммарная мгновенная мощность в переходном режиме не зависит от момента времени возникновения тока возмущения (от случайной величины угла  $\psi$ ), а определяться только значениями  $U$ ,  $I$  и  $\tau$ .

Опуская все простые, но довольно громоздкие промежуточные преобразования, приведем конечное выражение для суммарной мгновенной мощности 3-х фаз в переходном режиме –  $Sp_3(t)$ :

$$Sp_3(t) = 3U \cdot I \left[ \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right] \quad (5)$$

Выражение (5) получено для случая определения мощности как суммы мощностей трёх фаз по методу трех ваттметров. Учитывая, что в существующих системах токовых защит электросетей и электродвигателей используются, как правило, всего 2 датчика тока, представляет интерес рассмотреть случай определения суммарной мгновенной мощности при измерении мощности по схеме двух ваттметров. В этом случае, например, при измерении токов в фазах А и С, выражение для суммарной мгновенной мощности трех фаз в переходном режиме будет определяться соотношением:

$$Sp_2(t) = u_{AB}(t)i_A(t) + u_{CB}(t)i_C(t), \quad (6)$$

где  $u_{AB}(t)$ ,  $u_{CB}(t)$  – мгновенные значения линейных напряжений, указанных фаз,  $i_A(t)$  и  $i_C(t)$  – фазные токи.

Для переходного режима пуска выражение для мгновенной суммарной мощности при измерении её по схеме 2-х ваттметров аналогично (5):

$$Sp_2(t) = \sqrt{3}U_{л} I \left[ \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) e^{-t/\tau} \right], \quad (7)$$

где  $U_{л}$  – линейное напряжение.

Анализ выражений (5) и (7) показывает, что характер изменения функции  $Sp(t)$  в начале переходного процесса имеет вид затухающих

колебаний относительно установившегося значения. На рис. 1 в качестве примера, приведены построенные по выражению (5) зависимости  $Sp(t)$  для двух значений  $\tau$  - для  $\tau = 10$  мс и  $\tau = 15$  мс. Как видно из приведенных графиков, величины «размаха» изменения мгновенной суммарной мощности от своего максимального значения  $Sp_{max}$  к минимальному значению  $Sp_{min}$  при двух значениях  $\tau$  существенно разнятся. Так, величина «размаха» экстремальных значений при  $\tau = 15$  мс получается, примерно, в 2 раза больше, чем аналогичный «размах» экстремальных значений суммарной мощности для  $\tau = 10$  мс. Это значит, что анализ экстремальных значений суммарной мгновенной мощности  $Sp_{max}$  и  $Sp_{min}$  позволяет достаточно быстро и точно оценивать текущее значения постоянной времени обмоток ЭД ( $\tau_{\text{од}}$ ), а по степени изменения величины  $\tau_{\text{од}}$  при нагреве можно определять и температуру обмоток.

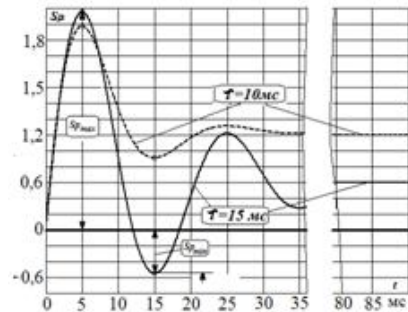


Рис. 1 – Суммарная мгновенная мощность трех фаз в момент пуска АД

Необходимо отметить следующую особенность функции  $Sp(t)$ , которая позволяет значительно упростить алгоритм анализа её экстремальных значений, а, в конечном счете, и температурного режима ЭД. Как показал анализ функции  $Sp(t)$ , максимальные значения  $Sp_{max}$  всегда, возникают спустя 5 мс, а минимальные значения  $Sp_{min}$  спустя 15 мс после возникновения тока возмущения цепи (в частности пуска ЭД) независимо от величины постоянной времени  $\tau$ . Это позволяет при определении «величины» размаха экстремальных значений суммарных мгновенных мощностей при пуске ЭД просто измерить мгновенные значения мощности в указанные выше моменты времени.

Наиболее информативным параметром, характеризующим «размах» функции  $Sp(t)$  при разных значениях  $\tau$ , является отношение разности экстремальных значений мощности к их сумме:

$$K_p = \frac{Sp_{max} - Sp_{min}}{Sp_{max} + Sp_{min}} \quad (8)$$

С учетом того, что значения  $Sp_{max}$  достигаются через 5 мс, а значения  $Sp_{min}$  через 15 мс после момента пуска ЭД, выражение (8) может быть представлено как:

$$K_p = \frac{Sp_5 - Sp_{15}}{Sp_5 + Sp_{15}} \quad (9)$$

На рис. 2 приведена зависимость  $\tau = f(K_p)$  из которой следует, что значения  $\tau$  существенно зависят от величины коэффициента  $K_p$ .

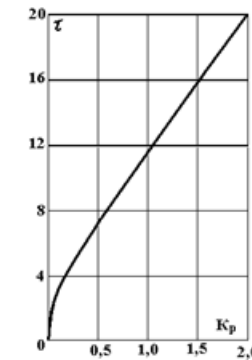


Рис. 2 – Зависимость  $\tau = f(K_p)$

Если величину  $\tau$  при окружающей температуре принять равной  $\tau_{\text{ок}} = 15,6$  мс (что соответствует значению  $\cos\varphi = 0,2$ ), то при увеличении температуры на  $125^\circ\text{C}$  активное сопротивление обмоток увеличится в 1,5 раза. Соответственно в 1,5 раза уменьшится постоянная времени  $\tau_{125} = \tau_{\text{ок}}/1,5 = 10,4$  мс, но при этом, как следует из графика рис.2, значение коэффициента  $K_p$  изменится в 1,7 раза. Это свидетельствует о том, что коэффициент  $K_p$ , действительно, может быть надёжным критерием изменения постоянной времени  $\tau$  обмоток ЭД при их нагревании, а значит и их температуры.

Следует отметить, что только благодаря скорости определению величины постоянной времени обмоток ЭД - всего через 15 мс после пуска, когда ротор ещё остается неподвижным, при реализации предлагаемого способа контроля температуры по величине активного со-

противления исключается труднопредсказуемое влияние на величину этого сопротивления факта вращения ротора.

Алгоритм определения текущей температуры обмоток ЭД при частых пусках путем анализа суммарных мгновенных значений мощностей достаточно прост. Независимо от выбранной схемы измерения - измерение по схеме трех или по схеме «двух ваттметров», значения суммарной мощности всегда определяется через 5 и 15 мс после начала пуска ЭД

В качестве примера, на рис.3 приведена блок-схема алгоритма определения текущей температуры обмоток ЭД при измерении мощности по схеме «двух ваттметров».

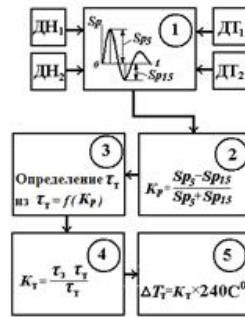


Рис. 3 – Алгоритм вычисления температуры обмоток ЭД

1. В модуле 1 из поступающих от датчиков тока (ДТ) и датчиков напряжения (ДН) из дискретных значений токов и напряжений в моменты времени спустя 5 и 15 мс после начала пуска определяют мгновенные значения суммарных мощностей, соответственно,  $Sp_5$  и  $Sp_{15}$ .

2. В модуле 2 определяют значения коэффициента соотношения суммарных мгновенных значений из выражения

$$K_p = \frac{Sp_5 - Sp_{15}}{Sp_5 + Sp_{15}}$$

3. В модуле 3 по найденному значению коэффициента  $K_p$  определяют текущее значение постоянной времени обмоток  $\tau_t$  из табличной зависимости  $\tau = f(K_p)$ , полученной из анализа выражения (7).

4. В модуле 4 определяют коэффициент изменения текущего значения постоянной времени обмоток из выражения  $K_\tau = (\tau_3 - \tau_t) / \tau_t$ , где  $\tau_3$  – заданное значение постоянной времени (для температуры окружающей среды).

76 ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098)

5. В модуле 5 определяют текущее приращение температуры обмоток  $\Delta T_t$  из выражения  $\Delta T_t = K_\tau \times 240 C^0$ .

В заключение заметим, что в некоторых случаях может оказаться более целесообразным строить алгоритм защиты, по критерию формулы (8), использующей максимальное и минимальное значения мгновенной мощности. Несмотря на более сложное осуществление такого алгоритма, он позволяет устранить погрешности, вызванные разбросом моментов подачи сигнала на пуск двигателя и действительным началом переходного процесса. Особенно это чувствительно для точности определения момента максимума, наступающего всего через – 5 мс.

#### Выводы:

1. Предложен способ использования обмоток асинхронных электродвигателей в качестве термодатчиков для контроля их температуры при каждом очередном пуске ЭД. Оценка изменения температуры обмоток при реализации указанного способа производится по критерию, сформированному из двух значений суммарной мгновенной мощности трех фаз, зафиксированных, соответственно, в моменты времени через 5 и 15 мс после пуска ЭД ( $Sp_5$  и  $Sp_{15}$ ).

2. Полученные результаты подтверждают возможность использование обмоток в качестве термодатчиков, что позволяет обеспечить эффективную динамическую «временную» защиту тех ЭД, которые не имеют встроенных в их статорные обмотки термисторов и работают в режиме частых пусков (угольные комбайны, лифты и т.д.)

**Список литературы:** 1 - Пускорегулирующая аппаратура TeSys / Каталог Schneider Electric. – 2007. – 567с. 2.- Низковольтное оборудование АВВ. Контактный, реле управления, аппараты защиты электродвигателей / Технический каталог АВВ. – 2010. – 366 с. 3 - Пат. № 2227354 Российской Федерации МПК H02H5/04, H02H7/06 «Способ тепловой защиты двигателя и устройство для его осуществления» / Г.А. Бугаев, Е.Ю. Ерохин, А.Н. Леонтьев, М.А. Шамис. – № 2002108251/092002108251/09. Заявлено 01.04.2002; Опубл. 20.04.2004.

**Bibliographi (transliterated)** 1. Puskoreguliruyuschaya apparatura TeSys Katalog Schneider Electric. 2007. 567. 2.- Nizkovoltnoe oborudovanie ABB. Kontaktnyy, rele upravleniya, apparaty zaschityi elektrodvigatelay. Tehnicheskyy katalog ABB. – 2010. 3 – Pat № 2227354 Rossiyskoy federatsii MPK H02H5/04, H02H7/06 «Sposob teplovooy zaschityi dvigatelya i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya» / G.A. Bugaev, E.Yu. Erohin, A.N. Leontev, M.A. Shamis. – № 2002108251/092002108251/09. Zayavleno 01.04.2002; Opubl. 20.04.2004.

Поступила (received) 12.11.14

**А.П. ЛАЗУРЕНКО**, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»,  
**Н.М. КРУГОЛ**, студент, НТУ «ХПИ»

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУППОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМАМИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КПД В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Статья посвящена одному из путей решения проблемы повышения энергоэффективности теплофикационных объектов и тепловых электрических станций. Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ дает значительную экономию электроэнергии, что увеличивает полезный отпуск электроэнергии в энергосистему. Данный способ применим к центробежным механизмам с близкими режимами изменения производительности. Также этот способ может быть использован на блочных КЭС. Полученные результаты подтверждают существенный технико-экономический эффект

**Ключевые слова:** ТЭЦ, собственные нужды, преобразователь частоты, центробежные машины

**Постановка проблемы.** Режимы работы блочных электростанций определяются суточным графиком нагрузки энергосистемы. При этом во время ночных минимумов нагрузки необходимо осуществлять разгрузку энергоблоков. Для разгрузки турбоагрегатов имеются следующие способы: снижение нагрузки до минимальной, останов с последующим пуском, перевод в моторный режим, а для разгрузки парового котла применяется снижение нагрузки до технического минимума, останов с последующим пуском, работа в режиме полиблока, режим вывода котла в горячий резерв [1]. Все эти режимы сопровождаются работой основных механизмов собственных нужд в ненормальных режимах по производительности, что сопровождается дополнительными потерями электроэнергии при использовании неэкономичных способов их регулирования.

Для ТЭЦ с поперечными связями по пару характерен режим работы по тепловому графику нагрузки, при котором в летний период большинство ТЭЦ работают на минимально-допустимых параметрах основного тепломеханического оборудования, что также приводит к неэффективному использованию механизмов собственных нужд (СН) и, как следствие, уменьшению КПД станции.

**Материалы исследований.** Основными механизмами собственных нужд электростанции являются центробежные машины, которые

потребляют мощность пропорционально кубической степени частоты их вращения, поэтому одним из основных методов снижения потерь электрической энергии на электростанциях может быть использование частотного привода.

В работе [2] предложено на ТЭЦ с поперечными связями использование метода группового регулирования производительности механизмов собственных нужд. При этом данный способ также может быть использован и на блочных электростанциях, участвующих в покрытии полупиковой части графика нагрузки энергосистемы, с турбоагрегатами мощностью до 300 МВт.

По типу рабочих характеристик механизмы СН могут быть разделены на три группы. К первой группе относятся: вентиляторы, дымососы и насосы центробежного типа. Во вторую группу входят: вентиляторы дымососы и насосы осевого типа. К третьей группе относятся: среднеходные, молотковые и шарошаровые мельницы, а также мельницы-вентиляторы. Метод группового регулирования производительности механизмов СН лучше всего применим к первой группе оборудования.

На рисунке 1 представленный характерный график нагрузки для ТЭЦ с поперечными связями в летний период (на примере Харьковской ТЭЦ3). В этот период работает по блочной схеме один котел паропроизводительностью 120 т/час и одна турбина Р-24.

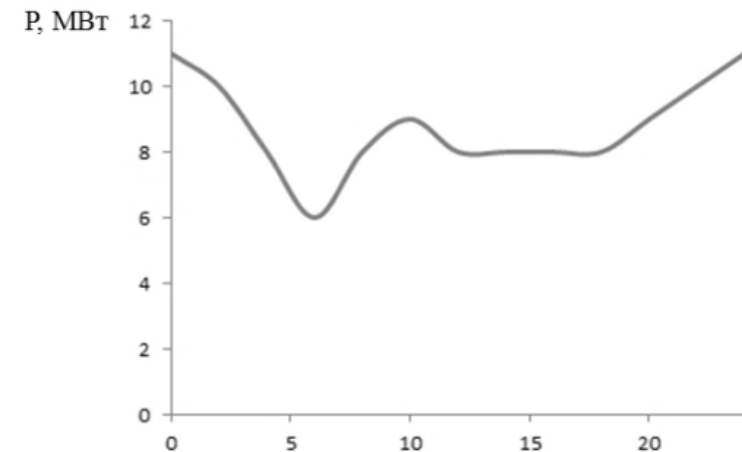


Рис. 1 – Суточный график работы ТЭЦ по тепловому графику нагрузки



В таблице 1 представлена режимная карта котла с нагрузкой основных агрегатов тяго-дутьевой системы котла. По режимным картам котла и турбоагрегата был проанализирован расход электрической энергии на механизмы тяго-дутьевой системы котла при данном графике нагрузки ТЭЦ.

Таблица 1 – Режимная карта энергетического парового котла

| Параметр   | Значение |       |         |       |
|--|----------|-------|---------|-------|
|  | 70       | 90    | 104     | 120   |
| Паропроизводительность, т/час                                | 70       | 90    | 104     | 120   |
| Давление воздуха после воздухонагревателя, кг/м <sup>2</sup> | 2        | 15    | 20      | 50    |
| Разряжение в топке котла, кг/м <sup>2</sup>                  | 1        | 1     | 1,5     | 1,5   |
| Нагрузка на ВГД (А/Б), А                                     | 13/0     | 14/0  | 15/0    | 16/16 |
| Нагрузка на дымососе (А/Б), А                                | 27,5/0   | 26/22 | 24/24,5 | 25/25 |

Как известно мощность центробежных механизмов при частотном регулировании можно описать следующей формулой [3]:

$$P = A_2 n^2 Q - B_2 n Q^2 + D_2 n^2,$$

где коэффициенты равны:

$$A_2 = \frac{P_1 - P_0 + B_2 n Q_1^2}{n^2 Q_1},$$

$$B_2 = \frac{(P_2 - P_0) Q_1 - (P_1 - P_2) Q_2}{n Q_1 Q_2 (Q_1 - Q_2)},$$

$$D_2 = \frac{P_0}{n_{НОМ}^2},$$

где  $n$  – частота вращения вала механизма, мин<sup>-1</sup>;

$n_{НОМ}$  – номинальная частота вращения механизма, мин<sup>-1</sup>;

$Q$  – подача (расход) механизмов СН, м<sup>3</sup>/ч ( $Q_1, Q_2$  – различные значения подачи);

$P$  – мощность, развиваемая механизмом, кВт ( $P_1, P_2$  – мощности при разных подачах);

$P_{НОМ}$  – номинальная мощность при номинальной подаче;

$P_0$  – мощность при закрытой задвижке (шибере).

При этом для каждого агрегата участвующего в групповом регулировании производительности была определена минимально-допустимая частота питающего напряжения. На преобразователь частоты, который питает группу двигателей, подается сигнал управления, задающий его частоту, пропорционально производительности в соответствии с графиком нагрузки. После этого точное регулирование производительности механизмов СН в небольшом диапазоне может осуществляться дросселированием.

По данной режимной карте был получен график потребления электроэнергии агрегатами котла (Рис. 2), при их питании от системы электроснабжения 50Гц, а используя законы подобия для центробежных машин, была построена зависимость потребляемой мощности при питании вентиляторов от частотного преобразователя.

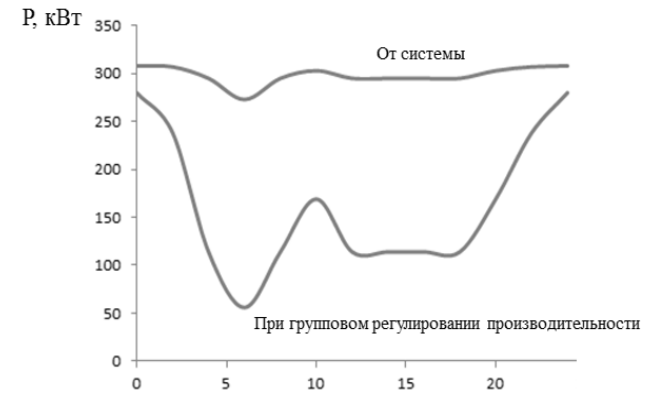


Рис. 2 – Потребление электроэнергии механизмами тяго-дутьевой системы котла

**Выводы.** Из представленного графика нагрузки видно, что использование метода группового регулирования производительности механизмов СН дает значительную экономию электроэнергии (площадь между кривыми), а это в свою очередь позволяет увеличить полезный отпуск электроэнергии в сеть при переменном графике нагрузки. Также в случае останова блока или перевода его в режим со скользящими параметрами, потребление электроэнергии на собственные нужды ТЭС уменьшается.

Использование схемы распределительного устройства СН с двумя системами шин, для ТЭЦ с поперечными связями по паре дает возможность использование одного преобразователя частоты для питания лю-

бого из двигателей 6кВ, что в свою очередь позволяет уменьшить капитальные вложения при модернизации действующих ТЭЦ.

**Список литературы:** 1. Тепловое оборудование и тепловые сети/ Г.В.Арсеньев, В.П.Белосов, А.А.Дронченко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 400с. 2. А.П.Лазуренко, Н.М.Кругол – Анализ работы ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність енергоефективність. №59 (1032) 2013. – Харків НТУ «ХПІ», с.79-84 3. Георгиади В.Х. – Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд (часть 1) – М. НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 80с.; ил. [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик», вып.4(52)] 4. Электрическая часть электростанций/ С.В.Усов, Б.Н.Михаев, А.К.Череповец и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616с.

**Bibliography (transliterated):** 1. G.V.Arsen'ev, V.P.Belousov, A.A.Dronchenko *Teplovoe oborudovanie i teplovye seti*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1988. 2. A.P.Lazurenko, N.M.Krugol *Analiz raboty TJeC po teplovomu grafiku nagruzki v letnij period Visnik NTU «HPI»*. Serija: *Ener-getika: nadijnist' energoefektivnist'*. No 59. 2013. 79-84. Print. 3. Geor-giadi V.H. – *Povedenie jenergoblokov TJeS pri pereryvah jelektrosnabzhenija sobstvennyh nuzhd (chast' 1)* – Moscow. NTF «Jenergoprogress», 2003. 4. S.V.Usov, B.N.Mihaev, A.K.Cherepovec *Jelek-tricheskaja chast' jelektrostancij*. Leningrad: Jenergoatomizdat. 1987.

*Поступила (received) 11.11.2014*

УДК 621.311

**О.П. ЛАЗУРЕНКО** канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»;  
**Г.І. ЧЕРКАШИНА** ст. викл., НТУ «ХПІ»

## ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ РОБОЧОГО БАКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВОДОНАГРІВАЧА ЄМНІСНОГО ТИПУ

Електричні водонагрівачі є великим резервом в системах керування електричним навантаженням з метою оптимізацій режиму роботи систем електропостачання. В статті виконаний розрахунок щодо визначення об'єму робочого баку електричного водонагрівача ємнісного типу в умовах, коли включення установки відбувається один раз на добу у зоні «провалу» споживання енергосистеми та при цьому забезпечується добова потреба у гарячій воді споживачів.

**Ключові слова:** електричний водонагрівач, споживач-регулятор, вибірка, середньоквадратичне відхилення, дисперсія, довірча вірогідність, похибка, довірчий інтервал.

**Вступ** Останнім часом спостерігається стрімке зростання рівня споживання електричної енергії у побуті. Таким чином, енергосистема більше не може відноситися до побутових споживачів як до пасивної ланки у своєму складі, враховуючі той факт, що побут характеризується значною нерівномірністю споживання електричної енергії у часі.

У попередніх роботах було виконано класифікацію побутових електроприймачів у тому числі за можливістю керування ними[1]. Аналіз показав, що найбільш поширенішими серед побутових споживачів-регуляторів є електричні водонагрівачі ємнісного типу (ЕВН ЄТ)[2, 3, 4]. Оціночно, загальна встановлена потужність таких електроприймачів по Україні складає на кінець 2013 року 5500 МВт, що є істотною потужністю та резервом керування.

Отже, керування ЕВН ЄТ дає можливість сприймати побутових електроприймачів у якості активного учасника в керуванні режимами енергосистеми. Для отримання такої можливості необхідно визначити необхідні характеристики ЕВН ЄТ для експлуатації у таких умовах.

**Метою роботи** є визначення об'єму робочого бака ЕВН ЄТ для реалізації можливості управління ним.

**Матеріали дослідження.** Розрахунок об'єму робочого баку АЕВН проводимо за умови, що ЕВН ЄТ повинен забезпечити потреби в гарячому водопостачанні споживача, працюючи на нагрів один раз на добу у період «провалу» споживання енергосистеми.

Для визначення робочого об'єму бака були виконані вимірювання

© О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина, 2014

на основі яких була зібрана статистична інформація наведена на рис. 1.

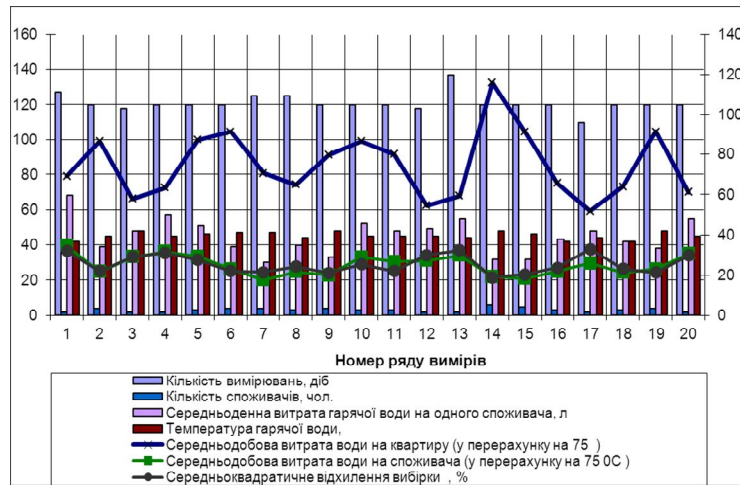


Рис. 1 – Дані вимірювань

Вимірювання проводилися у квартирах, обладнаних лічильниками гарячої води. Температура води вимірювалася інфрачервоним (безконтактним) термометром. Час проведення вимірів з жовтня по квітень.

З 20 об'єктів у яких проживало 63 людини була взята вибірка з 2420 окремих значень витрат. Після чого, було вираховано середньодобову витрату гарячої води на одну людину. Для однозначності даних витрату води було приведено до однієї температури – 75 °C, що відповідає температурі нагріву води у сучасних ЕВН ЄТ.

Розбіжність у 20 об'єктів складає 17,62 – 34,54 л. Середньоарифметичне цих значень – 26,08. Середньоквадратичне відхилення  $S = 4,23$  л. Приймаючи нормальний закон розподілення середніх значень, можна зробити висновок, що 90 % людей витрачають в середньому щоденно від 18,62 до 33,54 л гарячої води при температурі 75 °C.

Оскільки має місце відносно невелика вибірка, представляє (становить) інтерес вибір довірчого інтервалу для середнього значення витрати води при заданому значенні вірогідності. Середні значення усіх вибірок мають середньоквадратичне відхилення  $S$ , для яких, в свою чергу, можна знайти середньоквадратичне відхилення  $\sigma_m$ , яке при малій вибірці обчислюється за формулою

$$\sigma_m = \frac{S}{\sqrt{N-1}}$$

де  $N$  – загальна кількість вимірів,  $N=2420$ ;

Довірчий інтервал

$$\mu = M \pm t \sigma_m$$

де  $M$  – математичне сподівання;  $t$  – вірогідність помилки.

Якщо прийняти, що довірна вірогідність складає 95 %, то можна визначити діапазон, у якому розташоване фактичне середнє значення для кожного ряду вимірюваних величин, рис. 2.

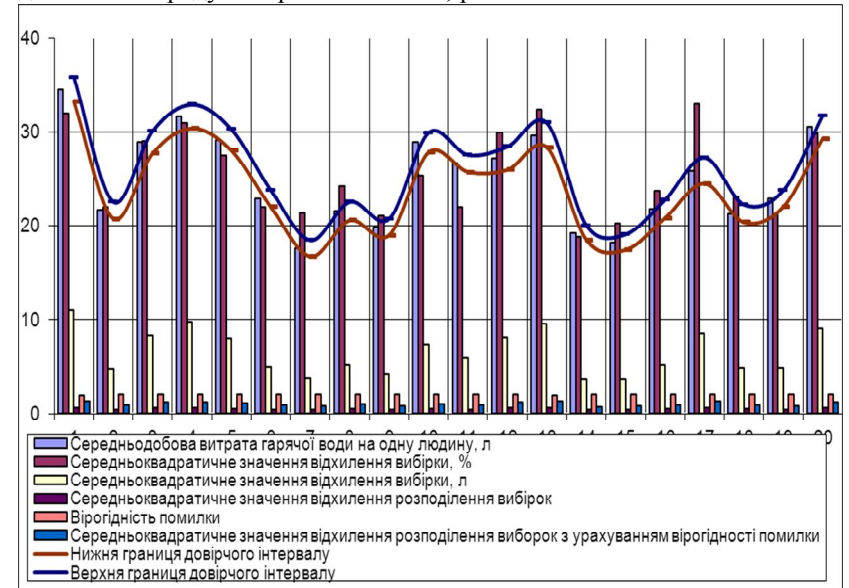


Рис. 2 – Довірчий інтервал для середньодобової витрати води

Довірчий інтервал для середнього значення споживання гарячої води на одну людину при довірчій вірогідності 0,95 складе  $\mu = 23,99 - 26,07$ .

Не дивлячись на те, що деякі розрахункові діапазони не попадають в довірчий інтервал, можна зробити висновок, що середня витрата гарячої води на одну людину на добу складає 23 – 26 л, при цьому 90 % людей витрачають 18 – 33 л на день і тільки 5 % – вище 35 л.

Для визначення об'єм робочого бака ЕВН ЄТ за основи прийнята середньодобова витрата води 35 л на людину.

Середнє значення кожного ряду вимірів можна розглядати як суму випадкових змінних величин, окремі значення яких нормально розташовуються біля  $M$ .

Оскільки для дослідження величин розбіжності є тільки 20 рядів, кожний з яких включає порівняно малі вибірки, то пряме порівняння показаних у рис. 2 середньоквадратичних відхилень з теоретичними значеннями неможливе. Однак по окремим значенням вибірок кожного ряду можна визначити довірчий інтервал для середньоквадратичних відхилень усієї сукупності  $\sigma_m$ . Величину  $\sigma_m$  можна обчислити приблизно, користуючись відповідними значеннями  $S$ .

$$\sigma_m = \frac{S}{\sqrt{2N}}$$

де  $N$  – кількість вимірів у відповідному ряді (рис. 3, 4).

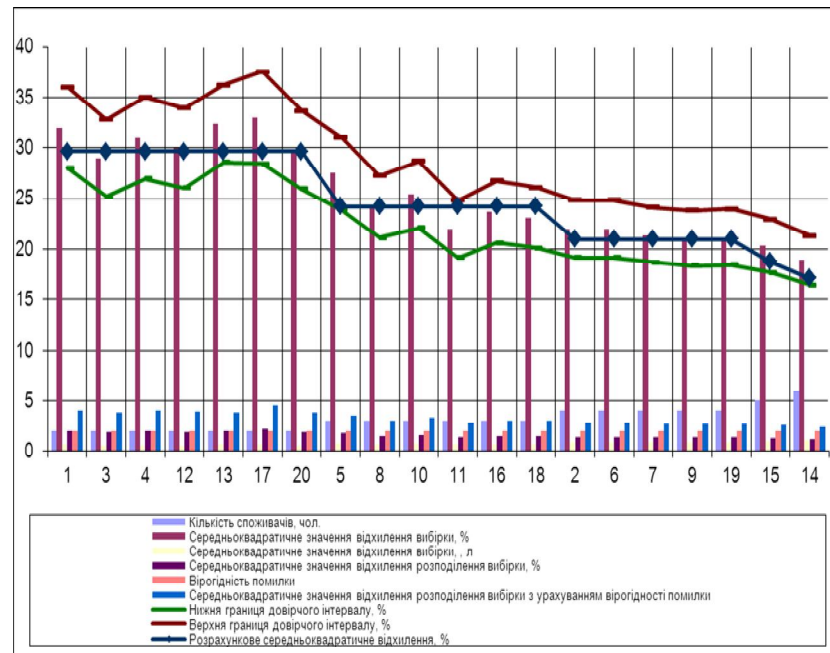


Рис. 3 – Середньоквадратичне відхилення та його довірчий інтервал

Виходячи з закону розподілення параметра  $t$  можна визначити вірогідність попадання у діапазон довірчого інтервалу.

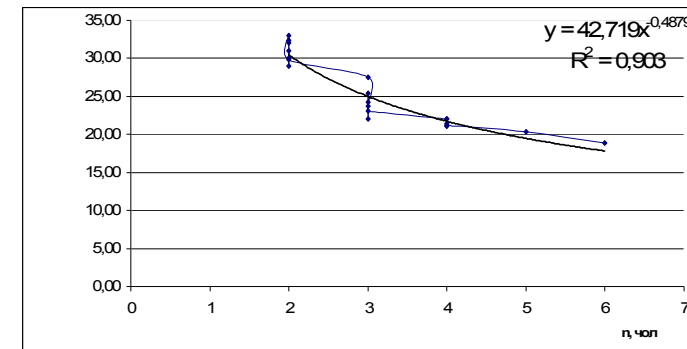


Рис.4 – Залежність середньоарифметичного довірчого інтервалу середньоквадратичних відхилень окремих об'єктів від кількості людей, які обслуговуються 1-м ЕВН ЄТ

На рис. 3 та рис. 4 показані довірчі інтервали для середньоквадратичних відхилень сукупності  $n$  (де  $n$  – кількість людей на 1 ЕВН ЄТ). Як з'ясувалося, усі значення  $\sigma$  попадають у даний інтервал з вірогідністю 0,95.

Відносна розбіжність сумарної витрати зменшується зі зростанням  $n$ . Таким чином, можна припустити, що об'єм ЕВН ЄТ зменшується зі зростанням  $n$ . Виходячи з цього, можна статистичним методом знайти значення яке визначає розбіжність витрат води, використовуючи у якості міри будь-яке значення середньоквадратичного відхилення, якщо розподіл розбіжностей є нормальним. З теорії відомо, що залежність між величинами  $S_1, S_2 \dots S_x$  різних вибірок  $N_1, N_2 \dots N_x$  описується виразом  $\frac{S_1}{\sqrt{N_1}}, \frac{S_2}{\sqrt{N_2}} \dots \frac{S_x}{\sqrt{N_x}}$ . Передбачається, що функція витрати

гарячої води для кожної окремої людини представляє собою нормальний розподіл з середнім значенням  $\mu_x$  та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_x$ .

Розглядається середня функція розподілення для окремої людини з середнім значенням  $\mu$  та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  за умови, що  $\mu$  та  $\sigma$  є середніми значеннями для  $\mu_x$  та  $\sigma_x$ . Додавання двох середніх функцій розподілення дає суму  $M_2 = 2M_1$ .

Однак додавання двох середньоквадратичних відхилень:

$$\sigma_2 = \sqrt{2}\sigma_1$$

Оскільки середньоквадратичне відхилення  $\sigma_x$  розбіжності витрат є функцією від кількості людей, які одночасно забезпечуються гарячою водою, то, обробивши результати вимірів, можна визначити функцію

$$\sigma_x = \sigma_{розр} = \frac{C}{\sqrt{n}}$$

де  $C$  – постійна, яка залежить від середньоквадратичних відхилень функції розподілення витрати гарячої води на одну людину ( $S$  рис. 3). Для того, щоб не враховувати розбіжність середніх значень, відхилення витрат виражені у процентах від середнього значення.

Методом найменших квадратів знаходимо  $C = 42,719\%$ , тобто середньоквадратичне відхилення розбіжності витрати води у розрахунку на одну людину складає  $42,719\%$  від найбільш вірогідного середнього значення. Кінцево  $\sigma_{розр} = \frac{42,719}{0,5\sqrt{n}}$ . Ця функція показана на рис. 1 і на-

звана кривою найвищої вірогідності. Розраховані на її основі теоретичні значення фактично забезпечуваної кількості осіб рис. 3.

При розгляді функцій розподілення добового споживання гарячої води від одного ЕВН ЄТ даного об'єму виявляється, що для будь-якого значення витрати виявляється певна частота. В діапазоні між  $(\mu - \sigma)$  та  $(\mu + \sigma)$  розташовуються  $68\%$  усіх заміряних витрат, в діапазоні між  $(\mu - 2\sigma)$  та  $(\mu + 2\sigma)$  вже  $95,5\%$ . Інакше, враховуючи симетричність розподілення частот відносно середнього значення, можна стверджувати, що при нормальному законі розподілення  $84\%$  усіх витрат визначаються величиною  $(\mu + \sigma)$ ,  $97,7\%$  –  $(\mu + 2\sigma)$  і тільки  $2,3\%$  діапазоном, який перевищує  $(\mu + 2\sigma)$ .

Розрахована таким чином гранична умова може бути прийнята для визначення об'єму водонагрівача

$$V = (\mu + 2\sigma)$$

Оскільки при збільшенні розміру установки (при зростанні кількості обслуговуваних осіб) величина  $\sigma$  зменшується (рис. 1), то відносно зменшується також об'єм водонагрівача.

Вище було встановлено, що середнє значення витрати гарячої води для усієї сукупності складає  $21 - 23$  л та  $95\%$  людей витрачають менше  $35$  л.

Об'єм робочого бака ЕВН ЄТ

$$V = n \cdot 35 \left(1 + \frac{2\sigma_{розр}}{100}\right)$$

В результаті розрахунків одержані наступні об'єми ЕВН ЄТ

Таблиця 1 – Результати розрахунків

| Кількість споживачів | Розрахунковий об'єм ЕВН ЄТ, л | Стандартний об'єм ЕВН ЄТ, що випускається, л[6] |
|----------------------|-------------------------------|---|
| 2                    | 112,3                         | 100, 115, 117, 120                              |
| 3                    | 156,8                         | 150, 160  |
| 4                    | 199,8                         | 200   |
| 5                    | 241,9                         | 250   |
| 6                    | 283,2                         | 280, 295  |

**Висновок.** Таким чином, у роботі отримано вираз для визначення об'єму робочого баку ЕВН ЄТ для різної кількості обслуговуваних осіб однією установкою, що дає можливість включати у роботу електричний водонагрівач один раз на добу у зоні «провалу» енергосистеми та при цьому забезпечити добові потреби у гарячій воді споживачів.

**Список літератури:** 1. Лазуренко А.П., Лисичкина Д.С., Черкашина Г.И. Новый подход к классификации потребителей электрической энергии // Материали міжнародної науково-технічної конференції «Новітні технології в електроенергетиці». Харків: ХНАГХ, 2008.-97 с. 2. Артюх С.Ф., Лазуренко А.П., Черкашина Г.И. Технико-экономический эффект от выравнивания графика электрической нагрузки за счет бытовых потребителей-регуляторов // Материали міжнародної науково-практичної конференції «Современные научные достижения и их практическое применение (20-22 октября, 2014)». – К.: Знання України, 2014. – 131 [1] с.: іл., табл. – С. 7 – 15. 3. Малярченко В. А., Щербак И. Е., Колотило И.Д., Лысак Л.В. Возможности интеграции электроэнергии в системах горячего водоснабжения ЖКХ. / В. А. Малярченко, И. Е. Щербак, И. Д. Колотило, Лысак Л.В. // Энергосбережение: Энергетика: Энергоаудит. 2014. – № 3. – С. 53–57. 4. Малярченко В. А., И.Е. Нечмоглод, Щербак И. Е., Колотило И.Д. Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания// Світлотехніка та електроенергетика. 2011 – №4. – С. 61 – 66. 5. Математическая статистика: Учеб. для вузов / В.Б. Горянов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.; Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. -424 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. XVII). 6. Электронный ресурс [www.zakazik.ua/products/boiler/1501.html](http://www.zakazik.ua/products/boiler/1501.html)

**Bibliography (transliterated):** 1. Lazurenko A.P., Lisichkina D.S., Cherkashina G.I. *Novyy podhod k klassifikacii potrebitel'ej jelektricheskoy jenergii*. Materiali mizhnarodnoji naukovo-tehnicnoji konferenciji «Novitni tehnologii v elektroenergetici». Kharkiv: HNAGH, 2008.97 Print. 2. Artjuh S.F., Lazurenko A.P., Cherkashina G.I. *Tehniko-jekonomicheskij jeffekt ot vyravnivanija grafika jelektricheskoy nagruzki za schet bytovyh potrebitel'ej-reguljatorov* //

*Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye nauchnye dostizhenija i ih prakticheskoe primenenie (20-22 oktjabrja, 2014)».* – Kyiv. : Znannja Ukraïni, 2014. . 7 – 15. Print 3. Maljarenko V. A., Shherbak I. E., Kolotilo I.D., Lysak L.V. *Vozmozhnosti integracii jelektroenergii v sistemah garjachego vodosnabzhenija ZhKH. Jenergosberezhe-nie Jenergetika Jenergoaudit.* No 3. 2014. . 53–57. Print 4. Maljarenko V. A., I.E. Nechmoglod, Shherbak I. E., Kolotilo I.D. *Neravnomernost' grafika nagruzki jenergosistemy i sposoby ee vyravnivanija. Svitlo-tehnika ta elektroenergetika.* No. 4. 2011. 61 – 66. Print. 5. V.B. Gorjainov, I.V. Pavlov, G.M. Cvetkova *Matematicheskaja statistika: Ucheb. dlja vuzov Moscow.:* Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2001.

*Надійшла (received) 11.11.2014*

УДК 621.315

**С.Г. ЛОМОВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЛЕКТОРА МПТ (Часть 2)**

Экспериментально проверена возможность увеличения электрической прочности коллектора машин постоянного тока за счет применения в поверхностном слое межламельной изоляции композиционного диэлектрического материала с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости. Экспериментально доказано увеличение электрической прочности коллектора МПТ не менее чем на 25% при наличии в межламельном промежутке порошка BaTiO<sub>3</sub>

**Ключевые слова:** изоляция, коллектор машин постоянного тока.

**Введение.** Теоретический расчет повышения электрической прочности коллектора при применении в межламельной изоляции материалов с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости, представленной в первой части работы, строится на основе достаточно упрощенных моделей, что делает необходимым экспериментальное подтверждение полученных ранее теоретических результатов.

**Цель работы.** Целью второй части работы являются экспериментальные исследования электрической прочности машины МПТ при наличии в составе нежелезистой изоляции порошка BaTiO<sub>3</sub>

**Основной материал исследований.** Экспериментальные исследования электрической прочности коллектора проводились в два этапа: - предварительные исследования модели межламельного промежутка коллектора; - экспериментальные исследования стойкости к возникновению кругового огня на коллекторе тягового двигателя типа ЭД-112А.

Были изготовлены экспериментальные образцы, представляющие собой две коллекторные пластины и изоляционный промежуток, содержащий порошок BaTiO<sub>3</sub>.

Поверхность изоляционного промежутка находится на одном уровне с поверхностью коллекторных пластин и тщательно обработана. Ширина изоляционного промежутка откалибрована таким образом, что для всех образцов она находится в пределах 1,53...1,55 мм. Были выполнены образцы, содержащие 0; 0,5; 1; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60 объемных процентов BaTiO<sub>3</sub> в композиции. Размер

© С.Г. Ломов. 2014

зерен поликристаллического  $\text{BaTiO}_3$  после размолла на шаровой мельнице составлял 10...15 мкм. На этих образцах исследовалось влияние  $\text{BaTiO}_3$  на величину поверхностного пробивного напряжения.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

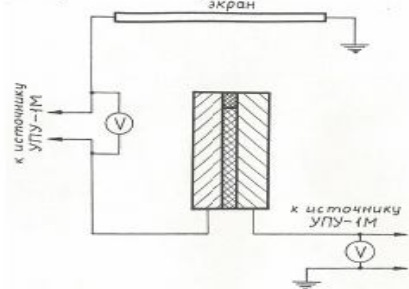


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки

Один источник типа УПУ-1М используется в качестве источника регулируемого постоянного напряжения для создания на одной из коллекторных пластин потенциала, отличного от нуля, то есть условия, при котором возникает эффект изменения направления вектора напряженности электрического поля на поверхности изоляционного промежутка. Экран с нулевым потенциалом иммитирует распределенную емкость над поверхностью изоляционного промежутка. В качестве источника пробивного напряжения использовался второй источник типа УПУ-1М. При нахождении поверхности изоляционного промежутка на одном уровне с рабочей поверхностью коллекторных пластин проще обеспечить равенство поверхностного сопротивления для всех образцов. Были изготовлены 19 образцов модели межламельного промежутка, на поверхности которых иммитировался слой загрязнения. Сопротивление этого слоя определялось методом амперметр-вольтметр на постоянном напряжении. Идентичность сопротивления для всех образцов обеспечивалась следующим образом. Испытуемая поверхность межламельного промежутка покрывалась тонким слоем смеси порошка графита с маслом, а затем эта поверхность (совместно с рабочей поверхностью коллекторных пластин) полировалась мелкой шлифовальной бумагой до определенных величин силы тока, фиксируемых микроамперметром типа М198/1 (предел измерения 1мкА). Таким образом удалось добиться величины сопротивления для всех образцов, лежащей в пределах  $5,2 \cdot 10^8 \dots 4,4 \cdot 10^8$  Ом. Вначале осуществлялся поверхностный пробой при переменном напряжении образцов с различным процентным содержанием  $\text{BaTiO}_3$ . Сложность изготовления большого

количества образцов заставила проводить пробой на одном образце для каждого процентного содержания  $\text{BaTiO}_3$ . Результаты этих исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пробой образцов межламельной изоляции коллектора МПТ

| Объемное процентное содержание $\text{BaTiO}_3$ , % | Поверхностное сопротивление изоляции $R \times 10^8$ , Ом | Пробивное напряжение, кВ |
|---|---|--------------------------|
| -   | 5,26  | 2,4                      |
| 0,5   | 4,54  | 2,8                      |
| 1   | 5,2   | 2,9                      |
| 5   | 5,13  | 3,0                      |
| 10  | 4,7   | 3,0                      |
| 20  | 4,76  | 3,0                      |
| 30  | 4,54  | 3,2                      |
| 40  | 4,4   | 3,3                      |
| 50  | 4,65  | 3,1                      |
| 60  | 4,9   | 2,4                      |

По результатам этой части исследований максимальное увеличение электрической прочности межламельного промежутка наступает при нахождении 30...40 объемных процентов  $\text{BaTiO}_3$  в изоляционной композиции поверхностного слоя. После этого для увеличения достоверности полученных результатов были изготовлены четыре образца, содержащие по 35%  $\text{BaTiO}_3$  и четыре образца без  $\text{BaTiO}_3$ . Были проведены аналогичные испытания, результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Пробой образцов межламельной изоляции коллектора МПТ.

| Объемное процентное содержание $\text{BaTiO}_3$ | Поверхностное сопротивление изоляции $R \times 10^8$ , Ом | Пробивное напряжение, кВ |                             |
|---|---|--------------------------|-----------------------------|
|   |   | для одного образца       | среднее для группы образцов |
| -   | 5,18  | 2,4                      | 2,35                        |
| -   | 4,54  | 2,3                      |                             |
| -   | 4,9   | 2,4                      |                             |
| -   | 5,0   | 2,3                      |                             |
| 35  | 4,48  | 3,4                      | 3,37                        |
| 35  | 4,65  | 3,2                      |                             |
| 35  | 5,26  | 3,2                      |                             |
| 35  | 4,76  | 3,7                      |                             |

По результатам первого этапа экспериментальных исследований на модели межламельного промежутка коллектора можно отметить следующее:

- наличие в составе межламельной изоляции  $\text{BaTiO}_3$  увеличивает напряжение поверхностного пробоя модели межламельного промежутка коллектора МПТ;
- увеличение пробивного напряжения на модели может свидетельствовать о повышении стойкости межламельного промежутка с титанатом бария реального коллектора к возникновению единичной вспышки между смежными пластинами при эксплуатации;
- максимальное увеличение электрической прочности модели межламельного промежутка происходит при 35...40 объемных процентах  $\text{BaTiO}_3$  и составило примерно 40% по сравнению с однородной изоляцией.

В реально эксплуатируемом коллекторе МПТ условия возникновения пробоя между смежными коллекторными пластинами отличаются от рассмотренных выше и полученные результаты необходимо дополнить результатами эксперимента на работающем двигателе. С этой целью был поставлен эксперимент на реальном серийном, напряженном в потенциальном отношении тяговом двигателе постоянного тока ЭД-112А. В ряде работ предлагается оценка стойкости коллектора МПТ к возникновению кругового огня методом разрядной установки, имитирующей единичные вспышки на коллекторе. В [1] впервые детально изложен метод и результаты экспериментального исследования возникновения кругового огня у работающего под нагрузкой тягового двигателя. В [2] доказана возможность проведения эксперимента с разрядной установкой в режиме холостого хода двигателя, что значительно упрощает эксперимент. Такой эксперимент на тяговом двигателе был проведен в два этапа:

1. Определение границы возникновения кругового огня на штатном коллекторе тягового тепловозного двигателя ЭД-112А. Здесь были использованы данные, приведенные в [2].

2. Определение границы возникновения кругового огня на том же коллекторе после введения в межламельную изоляцию на глубину 2...2,5 мм композиции с 35%  $\text{BaTiO}_3$ . Здесь, как и ранее для моделей межламельного промежутка, в качестве связующего использовалась эпоксидная смола.

В коллекторной камере (см. рис.2) было смонтировано устройство для перемещения электрода разрядной установки вдоль дуги коллектора. Конструкция и расчет разрядной установки приведены в [2].

Она дает возможность получать вспышки между электродом и коллекторной пластиной длительностью от 30 до 300 мкс. Максимальное межламельное напряжение для двигателя ЭД-112А находится на 29-ой коллекторной пластине по дуге коллектора между щеточными болтами.

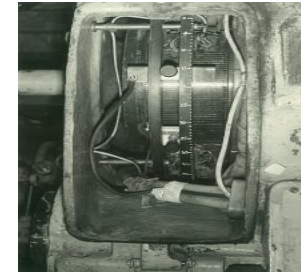


Рис. 2 – Коллекторная камера.

В таблице 3 приведены результаты экспериментального определения граничных условий вспышек и кругового огня на штатном коллекторе при холостом ходе двигателя ЭД-112А.

Таблица 3 – Электрическая прочность штатного коллектора тягового двигателя ЭД-112А

| U, В | I <sub>в</sub> , А | n, с <sup>-1</sup> | ΔU, В | τ <sub>и</sub> , мкс | Эффект от разряда. Разряд на 29 кол. пласт. |
|------|--------------------|--------------------|-------|----------------------|---|
| 1140 | 395                | 34,2               | 36,8  | 131                  | 4 разряда. Вспышек нет.                     |
| 1140 | 395                | 34,2               | 36,8  | 170                  | 2 разряда. 1 вспышка.                       |
| 1170 | 384                | 34,2               | 37,7  | 133                  | 1 разряд. Вспышек нет.                      |
| 1170 | 384                | 34,2               | 37,7  | 169                  | 4 разряда. 3 вспышки.                       |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 120                  | 4 разряда. 2 вспышки.                       |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 160                  | 7 разрядов. 3 вспышки.                      |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 194                  | 1 разряд. Вспышки нет.                      |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 205                  | 1 разряд. Круговой огонь. Чистка коллектора |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 118                  | 1 разряд. Есть вспышка.                     |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 160                  | 1 разряд. Круговой огонь. Чистка коллектора |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 119                  | 1 разряд. Есть вспышка.                     |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 155                  | 4 разряда. 1 вспышка.                       |
| 1200 | 375                | 37,1               | 39,2  | 190                  | 2 разряда. Круговой огонь. Чистка коллект.  |



В таблице 4 приведены результаты испытания на стойкость коллектора к возникновению кругового огня для двигателя, межламельный промежуток которого содержал дополнительный композиционный диэлектрический слой глубиной 2...2,5 мм с 35 объемными процентами  $\text{BaTiO}_3$ . Подобным образом препарировался тот же коллектор после испытаний, результаты которых представлены выше.

В таблицах 3 и 4 приняты следующие обозначения:  $U$  – напряжение питания двигателя;  $I_{\text{в}}$  – ток якоря двигателя;  $n$  – частота вращения двигателя;  $\Delta U$  – максимальное межламельное напряжение на коллекторе;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность одного разрядного импульса.

Таблица 4 – Электрическая прочность препарированного коллектора тягового двигателя ЭД-112А

| $U$ ,<br>В | $I_{\text{в}}$ ,<br>А | $n$ , с <sup>-1</sup> | $\Delta U$ ,<br>В | $\tau_{\text{и}}$ ,<br>мкс | Эффект от разряда. Количество разрядов 4 Разряд на 29-ой коллекторной пластине. |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|---|
| 1200       | 400                   | 34,2                  | 39,2              | 175                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1250       | 400                   | 34,2                  | 41,5              | 189                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1250       | 400                   | 34,2                  | 41,5              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1300       | 450                   | 34,2                  | 43,5              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1320       | 500                   | 34,2                  | 44,5              | 180                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1320       | 500                   | 34,2                  | 44,5              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1350       | 520                   | 34,2                  | 45,1              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1380       | 540                   | 34,2                  | 46,2              | 180                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1380       | 540                   | 34,2                  | 46,2              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1400       | 580                   | 34,2                  | 47,2              | 180                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1400       | 580                   | 34,2                  | 47,2              | 210                        | Вспышек и кругового огня нет.   |
| 1420       | 590                   | 34,2                  | 48,3              | 180                        | Одна вспышка.   |
| 1420       | 590                   | 34,2                  | 48,3              | 210                        | Две вспышки.  |
| 1430       | 595                   | 34,2                  | 49,2              | 180                        | Две вспышки.  |
| 1430       | 595                   | 34,2                  | 49,2              | 210                        | Две вспышки.  |
| 1440       | 600                   | 34,2                  | 50                | 180                        | Круговой огонь  |

**Выводы:** Применение в составе межламельной изоляции коллектора МПТ диэлектрического композиционного слоя, содержащего 35...40 объемных процентов  $\text{BaTiO}_3$ , позволит увеличить стойкость коллектора к возникновению кругового огня не менее, чем на 25% без изменения электромагнитных и геометрических параметров МПТ. Данный вывод также свидетельствует о возможности повышения питающего напряжения МПТ без уменьшения надежности работы щеточно-коллекторного узла.

**Список литературы:** 1. Каменецкий Б.Г. Условия возникновения кругового огня на коллекторе тягового электродвигателя. / А.Я. Егоро, Б.Г. Каменецкий // Электротехника. – 1967. – № 5. – С. 21-24. 2. Хануков Б.Г. Коммутационная и потенциальная устойчивость тяговых электродвигателей мощностью до 600 кВт. Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Харьков, 1980, 184с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kameheshkij B. G. Egro A. Ja. *Uclovija vznikovenija krugovogo ognja na kollektore tjavovogo dvigatelja*. Elektrotehnika. No. 5. 1967. 21-24. Print. 2. Hanykov. B. G. *Kommutacionnaja i potencialnaja ystoichivost' elektrodvigatelej moshnost'ju do 600 kWt*. Kharkov, 1980.

Поступила (received) 19.10..2013

*Л. І. ЛИСЕНКО*, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

*Д. О. ЛОГАЧОВА*, студент НТУ «ХПІ»

*А. І. РУДЬ*, студент НТУ «ХПІ»

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МЕДИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

У статті розглянуто декілька концептуальних проектів систем енергопостачання лікувального корпусу медичного комплексу з використанням сучасних енергоефективних технологій, які спрямовані на збереження первинних енергоресурсів. Проведено порівняльний аналіз цих проектів з точки зору економічної ефективності їх впровадження. Продемонстровано доцільність більш активної діяльності по реалізації енергозберігаючих проектів

**Ключові слова:** медичний комплекс, енергопостачання, нетрадиційні джерела енергії, енергозбереження, порівняльний аналіз, економічна ефективність.

**Вступ.** Значне зменшення використання природного газу, як основного джерела первинної енергії, в муніципальному секторі є недосяжною метою без масштабного впровадження енергоефективних технологій виробництва енергії. В теперішній час достатньо динамічно розвиваються такі напрямки сучасної енергетики, як когенераційні та тригенераційні системи, біоенергетичні установки, системи утилізації низкопотенційного природного та скидного тепла.

**Об'єктом дослідження** в даній роботі є перший стаціонар медичного комплексу, який представляє собою дво-, семи-, та дев'ятиповерхову будівлю опалювальним об'ємом 124212 м<sup>3</sup>, опалювальною площею 30039 м<sup>2</sup> і загальною кількістю 719 ліжко-місць. Енергопостачання медичного комплексу здійснюється централізовано від міських мереж. Річна кількість споживаної теплової та електричної енергії складає, відповідно, 8265,0 Гкал і 2124,0 тис. кВт·г, з яких лікувальний корпус споживає 4334,5 Гкал і 1266,17 тис. кВт·г., відповідно.

**Метою даної роботи** є проведення порівняльного аналізу декількох енергозберігаючих проектів, які спрямовані на збереження первинних енергоресурсів за рахунок використання сучасних енергоефективних технологій, і визначення доцільності децентралізації енергопостачання лікувального корпусу.

### Розрахунок параметрів системи енергопостачання медичного

© Л.І. Лисенко, Д. О. Логачова, А. І. Рудь. 2014

**комплексу.** Система електроспоживання складається з встановленої потужності медичного та допоміжного обладнання лікувального корпусу. Сумарна потужність електроприймачів з урахуванням коефіцієнта одночасності 0,8 та обладнання системи енергозабезпечення складає 1992,9 кВт.

Системи опалення і гарячого водопостачання (ГВП) лікувального корпусу підключені до системи централізованого теплопостачання (ЦТП). Проектні годинні витрати теплової енергії на опалення, підігрів вентиляюючого повітря та ГВП, розрахунок яких проведений за діючими ДСТУ, складають, відповідно, 2191,1 кВт·г, 1620,97 кВт·г і 278,93 кВт·г. Розрахункове навантаження на систему кондиціонування дорівнює 612,37 кВт.

В роботі розглянуто три альтернативні системи енергопостачання:

1 - тригенераційна система енергопостачання за допомогою когенераційної установки (КГУ) та абсорбційного чилера (АЧ);

2 - біоенергетична система теплопостачання за допомогою твердопаливного біокотла (БК) та абсорбційного чилера;

3 - теплонасосна система (ТНС) з використанням тепла повітря, що відходить, для підігріву води на ГВП за допомогою насосів повітря – вода та тепла ґрунту для опалення.

Для кожної з розглянутих систем енергопостачання розраховані обсяги споживання енергоресурсів та обсяги виробництва теплової та електричної (для КГУ) електроенергії і обрано устаткування. Всі системи призначені для цілорічного використання.

**Тригенераційна система енергопостачання.** Тригенерація відноситься до інноваційних енергозберігаючих технологій, які підвищують ефективність використання природного газу при виробництві електричної та теплової енергії. Комбінація КГУ, що виробляє електричну та теплову енергію з загальним ККД вище 90 %, і АЧ, який утилізує зайве тепло в літню пору для потреб кондиціонування, дозволяє зекономити до 40 % палива.

Принципова схема запропонованої системи енергопостачання лікувального корпусу, що розглядається, за допомогою когенераційної установки та абсорбційного чилера (КГУ+АЧ) зображена на рис. 1.

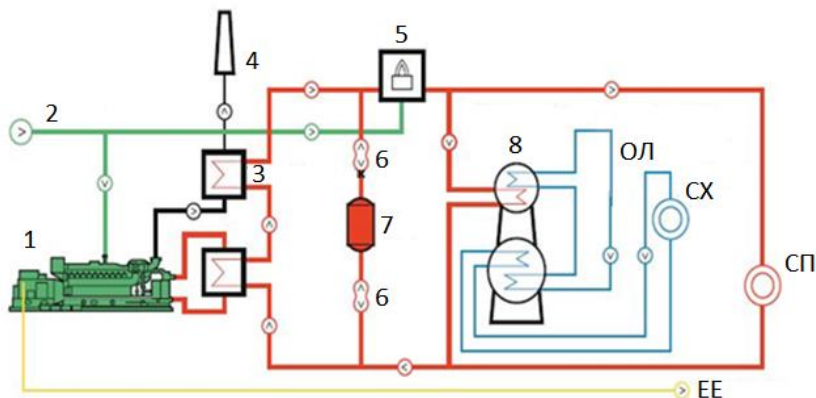


Рис. 1 – Принципова схема тригенераційної системи енергопостачання лікувального корпусу (КГУ+Ч): 1 – КГУ; 2 – паливо; 3 – теплообмінник; 4 – вихлопи; 5 – котел пікового навантаження; 6 – циркуляційний насос; 7 – буферна ємкість; 8 – абсорбційний чилер; СХ – споживач холоду; СП – споживач тепла; ЕЕ – електроенергія; ОЛ – охолоджуюча лінія

Запропонована схема енергопостачання на базі КГУ і АД дозволить покрити всі енерговитрати лікувального корпусу. Газопоршнева когенераційна установка TEDOM Quanto 2000 номінальною електричною потужністю 2000 кВт та тепловою – 2155 кВт повністю покриває теплове та електричне навантаження лікувального корпусу. В систему також входить проточний піковий електродкотел 25 кВт для можливого додаткового нагріву води в часи максимального споживання. Абсорбційний двоступеневий чилер YORK 12SC електричною потужністю 13,6 кВт та тепловою/холодильною потужністю 703/563 кВт, відповідно, який встановлюється в систему вентиляції, забезпечить кондиціювання корпусу в літню пору року, та підтримає систему опалення в зимову. Надлишок енергії можливо використовувати в цілях решти корпусів медичного комплексу, а також віддавати в загальну електричну мережу медичного комплексу.

**Біоенергетична система теплопостачання.** Біоенергетика стає стратегічним напрямом розвитку сектора відновлювальної енергетики в Україні, оскільки біомаса є найбільш перспективним паливом для заміщення природного газу та інших викопних первинних енергоресурсів в ЖКГ. Зараз сектор біоенергетики заміщує

1,67 млрд. м<sup>3</sup> газу на рік, а через декілька років ця кількість може зрости до 7,2 млрд. м<sup>3</sup> [1].

Принципова схема біоенергетичної системи теплопостачання лікувального корпусу за допомогою твердопаливного біокотла та абсорбційного чилера подано на рис. 2.

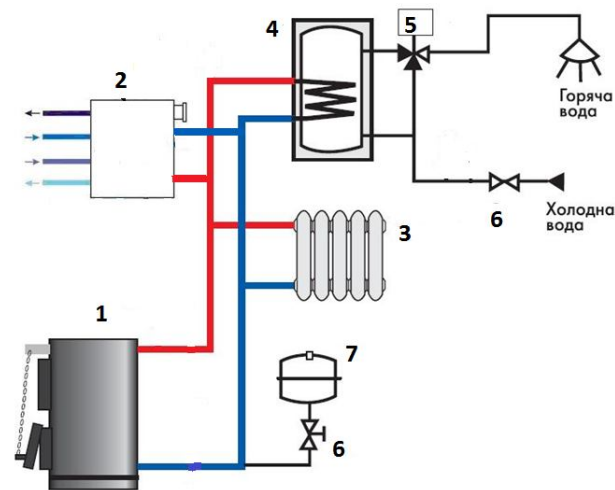


Рис. 2 – Принципова схема системи теплопостачання за допомогою твердопаливного біокотла та абсорбційного чилера (БК+Ч): 1 – твердопаливний біокотел; 2 – чилер; 3 – мереживий теплообмінник; 4 – буферна ємність; 5 - насосна група; 6 – вентилі; 7 – розширювальний бак

Твердопаливний піролізний котел ПОЖ ІНКА 3000 номінальною тепловою потужністю 3000 кВт з діапазоном регулювання 1500-3000 кВт ефективно забезпечить лікувальний корпус необхідною тепловою енергією. ККД котла складає 75%-85% і від нього можна працювати на гранулах і брикетах деревні, соломі, лушпинні соняшника та інших рослинної біомаси; витрати палива літом/зимовою складають 368/712 кг/год, відповідно. Двоступеневий АЧ YORK 12SC, інтегрований в систему вентиляції, додасть тепла в приміщення корпусу в опалювальний період та забезпечить прохолоду влітку.

В опалювальний період котел та чилер, працюючи на повну потужність, будуть повністю покривати потреби систем теплопостачання та вентиляції. В неопалювальний період тепла енергія необхідна тільки для системи ГВП та роботи чилера на систему

кондиціонування приміщень, тому в літній період загрузка котла буде зменшена на 50 %, що можна зробити згідно діапазону регулювання потужності установки. Надлишок теплової енергії в неопалювальний період можливо розподіляти в систему всього медичного корпусу.

**Теплонасосна система теплопостачання.** Теплонасосні системи все більш привертають увагу в Україні завдяки тому, що робота ТН забезпечує більш половини необхідної кількості теплової енергії безкоштовно. Крім того, ТН є електричним приладом і якоюсь мірою його можна віднести до електричних систем теплопостачання, що досить привабливо за наявності в Україні атомних електричних станцій.

Принципова схема теплонасосної системи теплопостачання лікувального корпусу з рекуператорами вентиляючого повітря приведена на рис. 3. У якості джерел первинного тепла застосовуються ґрунт та скидне повітря системи вентиляції.

Для опалення корпусу за допомогою теплонасосної системи запропоновано встановити три геотермальних теплових насоси GEOTERPLO ISWS 200ER2 S0/W50 тепловою потужністю 617,2 кВт та із споживаною електричною потужністю 199,1 кВт кожний. Первинний контур цих насосів укладається в 150 свердловин глибиною 100 м. Для надійного функціонування системи встановлено буферну ємкість GEOTERPLO TERM PUFFER VC VT об'ємом 3 м<sup>3</sup>. Гаряче водопостачання забезпечується за допомогою дев'яти теплових насосів «повітря–вода» GEOTERPLO DS 5051 із тепловою та споживаною електричною потужностями по 29,0 кВт та 9,9 кВт, відповідно. Джерелом тепла для них служить утилізоване за допомогою рекуператорів повітря з приміщень корпусу. В системі встановлено 18 рекуператорів TechnoClima RCF 1200 (по 2 на кожний поверх). Потужності рекуператорів становлять 56,4 кВт та 0,67 кВт, відповідно. Для системи ГВП запропоновано використати буферні ємкості GEOTERPLO TERM PUFFER VC VT об'ємами 1 м<sup>3</sup> на перший поверх та по 0,5 м<sup>3</sup> на 2 – 9 поверхи. Оскільки електрична потужність системи досить велика, для її підключення до електричної мережі встановлюється додаткове електричне обладнання.

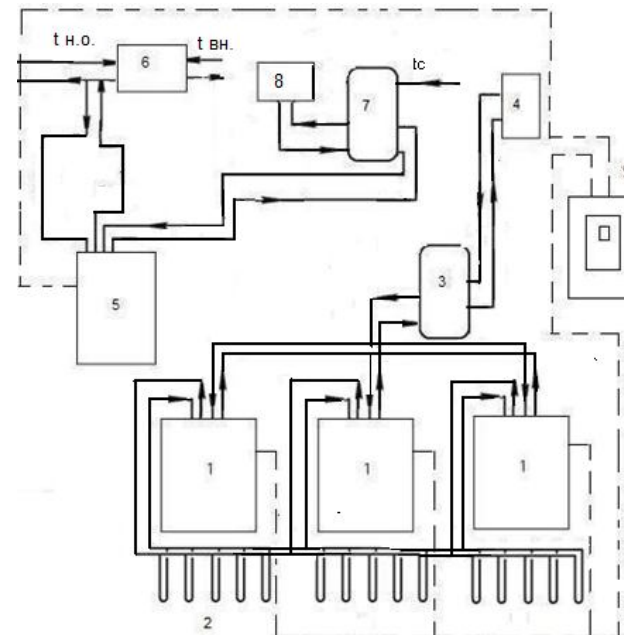


Рис. 3 - Принципова схема теплонасосної системи теплопостачання з рекуператорами повітря: 1 - ТН для системи опалення; 2 - геотермальні зонди; 3 - буферна ємкість для системи опалення; 4 - система опалення; 5 - ТН для системи ГВП; 6 - рекуператор повітря; 7 - буферна ємкість для системи ГВП; 8 - система ГВП; 9 - розподільний щит

#### Порівняльний аналіз економічної ефективності проєктів.

Аналіз запропонованих систем енергопостачання лікувального корпусу медичного комплексу за критеріями економічної ефективності було проведено за стандартною методикою оцінки енергозберігаючих проєктів (з обліком дисконтування та нарощення). Були визначені такі критерії економічної ефективності (з урахуванням дисконтування та нарощення), як термін окупності інвестицій; чистий дохід за рахунок економії енергоресурсів за весь період експлуатації енергозберігаючих заходів; індекс прибутковості інвестицій (відношення повного доходу до величини інвестицій), що характеризує відносну віддачу інвестиційного проєкту на вкладені кошти. Розрахунки проведені з урахуванням недавнього збільшення діючих тарифів на теплову [2] та електричну енергію [3], що додатково вплинуло на економічні

показники і продемонструвало доцільність більш активної діяльності по впровадженню енергоефективних технологій.

Критерії економічної ефективності відказу від централізованого тепlopостачання, пов'язаного з впровадженням енергозберігаючих проектів, зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Критерії економічної ефективності, пов'язані з впровадженням енергозберігаючих систем енергопостачання лікувального корпусу № 1

| Параметр   | КГУ+<br>Ч  | БК+Ч  | ТНС   |
|--|------------|-------|-------|
| Термін експлуатації $T_{сл}$ , роки  | 32         | 20    | 20    |
| Значення норми дисконту $r$  | 0,10 (10%) |       |       |
| Дохід за рахунок економії енергоресурсів $\Delta D$ , тис. грн./м <sup>2</sup> | 0,0556     | 0,14  | 0,708 |
| Величина капіталовкладень $\Delta K$ , тис. грн./м <sup>2</sup>                | 0,196      | 0,041 | 1,434 |
| Повний дисконтований дохід $DD_{Тсл}$ , тис. грн./м <sup>2</sup>               | 0,53       | 1,16  | 4,01  |
| Повний дохід при нарощенні $ND_{Тсл}$ , тис. грн./м <sup>2</sup>               | 11,19      | 7,78  | 26,97 |
| Чистий дисконтований дохід $ЧДД$ , тис. грн./м <sup>2</sup>                    | 0,334      | 1,115 | 2,43  |
| Чистий дохід при нарощенні $ЧНД$ , тис. грн./м <sup>2</sup>                    | 10,99      | 7,74  | 25,39 |
| Бездисконтний термін окупності $T_o$ , роки                                    | 3,525      | 0,302 | 3,36  |
| Термін окупності з урахуванням дисконтування $T_d$ , роки                      | 2,034      | 0,16  | 4,29  |
| Термін окупності інвестицій при нарощенні $T_n$ , роки                         | 3,168      | 0,312 | 3,04  |
| Індекс прибутковості інвестицій за умови дисконтування $ІД_d$                  | 2,70       | 28,18 | 2,54  |
| Індекс прибутковості інвестицій за умови нарощення $ІД_n$                      | 57,06      | 189,6 | 17,05 |

**Висновки.** В результаті проведеного порівняльного аналізу визначено, що найбільш економічною системою енергопостачання є комбінація твердопаливного біокотла для опалення та гарячого водопостачання з абсорбційним чилером для вентиляції та кондиціонування. Термін окупності такої енергозберігаючої системи складає декілька місяців, при цьому індекси прибутковості інвестицій значно більші, ніж для двох інших розроблених систем, що свідчить

про її велику привабливість та доцільність. Оцінка екологічного ефекту від впровадження такої системи показує, що можна зекономити 905,5 тис м<sup>3</sup> природного газу, що дозволить знизити викиди CO<sub>2</sub> на майже 2100 т.

**Список літератури:** 1. Розпорядження КМУ № 902-р від 1 жовтня 2014 р. «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року»; 2. Сайт компанії «Харківські теплові мережі» [Електрон. ресурс] – Режим доступу: URL: <http://www.hts.kharkov.ua>; 3. Сайт компанії «Харківобленерго» [Електрон. ресурс] – Режим доступу: URL: <http://www.oblenergo.kharkov.ua>.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ukrainian Ministry Cabinet Decree № 902-p of 01.10.2014 “On National Plan of Actions Towards Renewable Power Engineering till 2020” (In Ukrainian); 2. Site of Kharkiv Thermal Network Co, URL: <http://www.hts.kharkov.ua>; 3. Site of Kharkivoblenergo Co, URL: <http://www.oblenergo.kharkov.ua>.

*Надійшла до редколегії 17.11.2014*

**Г.И. МЕЛЬНИКОВ**, канд. тех. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**А.О. КОРОТКОВ**, асп. НТУ «ХПИ»;  
**А.В. СЕМИКОВ**, асп. НТУ «ХПИ»;

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА НА БАЗЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть. Выполнен синтез системы управления машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, позволяющей управлять моментом нагрузки ДВС независимо от скорости вала и реактивной мощности сети. Построена компьютерная модель всей системы. Проведено компьютерное моделирование испытаний ДВС в режимах, как поддержании постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, автономный инвертор напряжения, машина постоянного тока.

**Введение.** Современный испытательный стенд нагрузки двигателя внутреннего сгорания (ДВС) должен удовлетворять высоким требованиям, предъявляемым к управляемости, энергосбережению, в том числе обеспечивать инвариантность скорости и момента относительно друг друга при достаточно больших диапазонах регулирования, соответствующих режимам испытаний ДВС, и отдавать в сеть энергию, вырабатываемую ДВС.

**Цель статьи.** Построить систему управления и смоделировать работу нагрузочного стенда испытания двигателей внутреннего сгорания, а так же получить его энергетические показатели испытательного стенда.

**Основные материалы исследования.** Рассматриваемый в работе стенд выполнен на основе машины постоянного тока (МПТ), превращающей механическую энергию ДВС и нагружая его, в электрическую энергию, передаваемую в сеть с помощью автономного инвертора напряжения (АИН). Функциональная схема показана на рис. 1.

© Г.И. Мельников, А. О. Коротков, А. В. Семиков. 2014

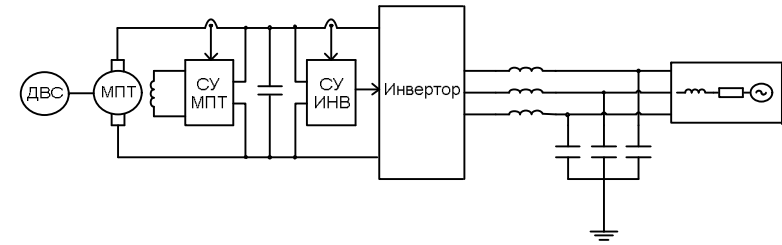


Рис 1 – Схема испытательного стенда на базе МПТ и АИН.

АИН, как и реверсивный тиристорный преобразователь (ТП), используемый в ряде нагрузочных комплексов, может передавать в промышленную сеть предприятия вырабатываемую ДВС энергию, что частично экономит средства и энергоресурсы, затраченные на испытания ДВС.

Достоинством АИН, перед РТП, является возможность независимого регулирования активной и реактивной мощностей, гармонического состава тока потребляемого или генерируемого преобразователем.

Вращающий момент нагрузки ДВС ( $M_{ДВС}$ ) определяется электромагнитным моментом двигателя ( $M_{Эл.М}$ ), механическими потерями ( $M_{тр}$ ) и динамическим моментом в соответствии с уравнением механического баланса.

$$M_{Эл.М} + M_{ДВС} - M_{тр} = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1)$$

Электромагнитный момент двигателя пропорционален произведению тока якоря ( $I_я$ ) и магнитного потока возбуждения ( $\Phi_в$ ).

$$M_{Эл.М} = k\Phi_в I_я; \quad (2)$$

Учитывая ограничение напряжения якоря сверху допустимым значением, определяемым изоляцией обмотки МПТ, и снизу минимальным напряжением, обеспечивающим возможность передачи энергии инвертором в сеть. Управление моментом МПТ осуществляется при поддержании постоянного напряжения якоря с изменением потока возбуждения.

Для этого синтезирована система управления подчиненного регулирования (СПР). Она включает в себя контур регулирования тока якоря, с подчиненным ему контуром регулирования потока возбуждения. В обоих контурах используется пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, настроенный на модульный оптимум.

В СПР внутренний контур управляет потоком возбуждения, рассчитывая напряжение питания ( $U_B$ ) обмотки возбуждения исходя из требуемого потока возбуждения ( $\Phi_B$ ) и уравнения цепи возбуждения. Компьютерная модель показана на рис. 2.

$$\Phi_B = f(I_B); \quad (3)$$

$$U_B = R_B I_B + L_B \frac{dI_B}{dt}; \quad (4)$$

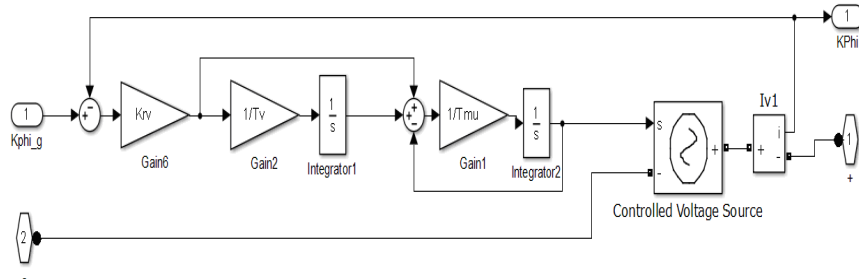


Рис 2 – Контур регулировки тока возбуждения МПТ.

Им управляет контур регулирования тока якоря ( $I_A$ ) рассчитывающий требуемый поток возбуждения ( $\Phi_B$ ) по скорости вращения якоря ( $\omega$ ) в соответствии с требуемым током якоря по уравнению якорной цепи.

$$E_A = k\Phi_B \omega; \quad (5)$$

$$U_A = E_A + R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt}; \quad (6)$$

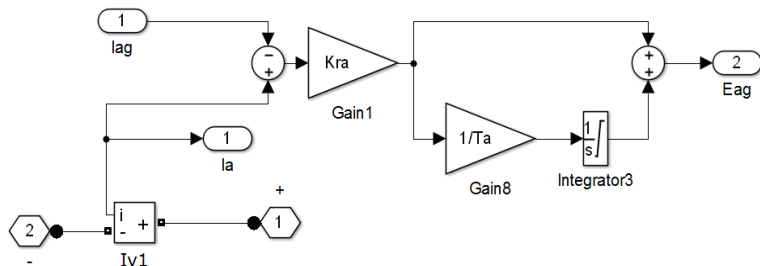


Рис 3 – Контур регулировки тока якоря МПТ.

Требуемый ток якоря ( $I_A$ ) рассчитывается по заданному моменту в соответствии с режимом испытания ДВС.

Напряжение якоря поддерживается регулированием тока преобразователя с помощью ПИ регулятора напряжения якоря с компенсацией тока якоря. Компьютерная модель показана на рис. 4.

$$I_A + I_{np} = \frac{1}{C} \frac{dU_A}{dt}; \quad (7)$$

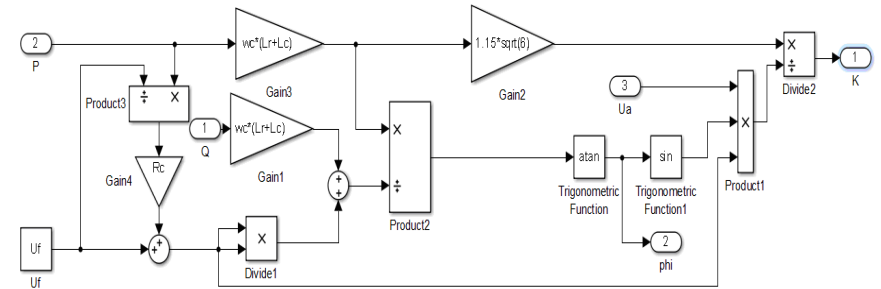


Рис 4 – регулятор напряжения якоря.

Ток преобразователя ( $I_{np}$ ) поддерживается на заданном уровне за счет регулирования активной мощности ( $P_{np}$ ) передаваемой в сеть.

$$P_{np} = I_{np, \text{жел}} \cdot U_A; \quad (8)$$

Рассчитанная активная мощность и требуемая реактивная мощность ( $Q$ ), определяемая условиями эксплуатации стенда, задаёт коэффициент модуляции преобразователя ( $K$ ) и угол опережения ( $\gamma$ ) напряжения относительно сети. Компьютерная модель показана на рисунке 5.

$$K = \frac{\omega_c LP \cdot 1,16\sqrt{6}}{U_\phi \cdot U_A \cdot \sin \gamma}; \quad (9)$$

$$\gamma = \arctg \frac{\omega_c LP}{U_\phi^2 - \omega LQ}; \quad (10)$$

где  $\omega_c$  – частота сети,  $L$  – индуктивность дросселей фильтра.

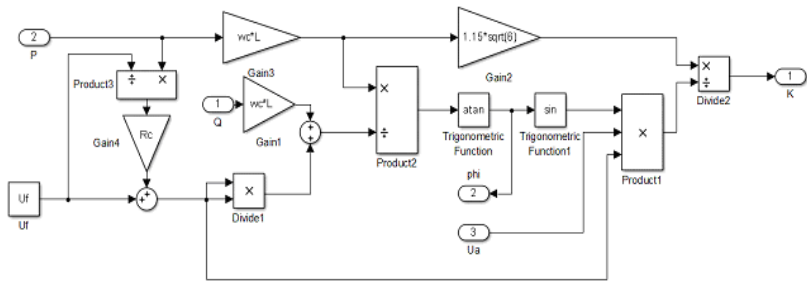


Рис 5 – Блок расчета параметров АИН.

В качестве модели АИН, показанной на рис 6, использованы имеющиеся в библиотеке SimPowerSystems программы Matlab блоки: PWM generator, Universal Bridge, Subsystem, генерирующий трехфазное синусоидальное напряжение по заданным коэффициенту модуляции, частоты, углу сдвига и текущего значения времени.

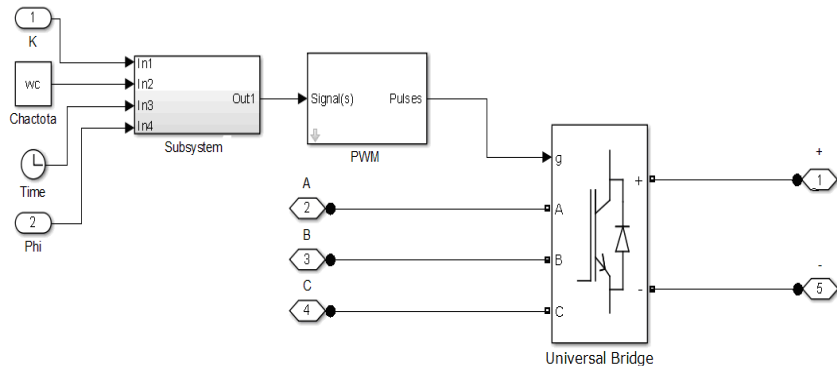


Рис. 6 – Схема АИН.

Подсистема Subsystem производит расчёт мгновенных значений фазных напряжений.

$$u_A = K_m U_m \sin(\omega t + \gamma); \quad (11)$$

$$u_B = K_m U_m \sin((\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \gamma); \quad (12)$$

$$u_C = K_m U_m \sin((\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \gamma); \quad (13)$$

Двигатель внутреннего сгорания в модели представлен в виде статической зависимости вращающего момента от положения заслонки и скорости вращения вала, взятой из модели gasoline engine, существующей в библиотеке Simulink программы Matlab.

Используя вышеуказанные математические зависимости, была синтезирована компьютерная модель стенда в библиотеке Simulink программы Matlab, показанная на рис 7.

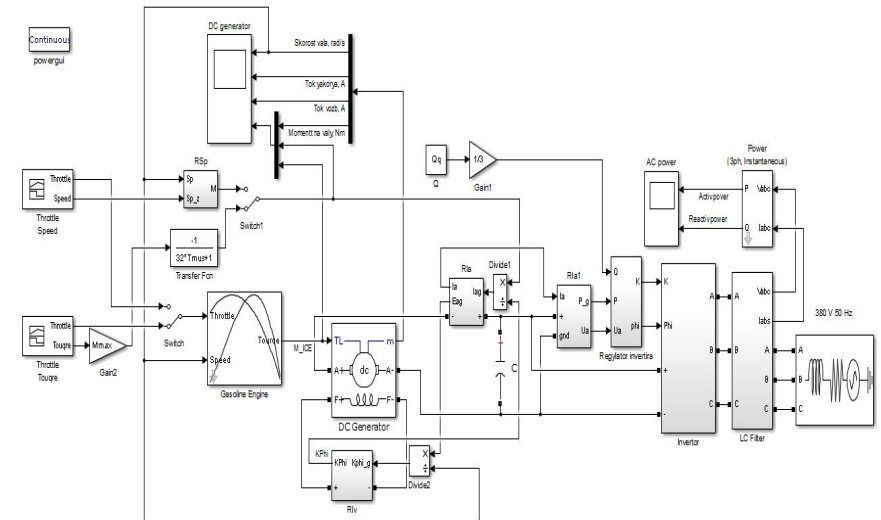


Рис 7 – Компьютерная модель испытательного стенда.

С целью проверки работоспособности синтезированной системы управления, установления диапазона регулирования и энергоэффективности стенда на разработанной компьютерной модели, было проведено два эксперимента:

- нагрузка ДВС моментом в соответствии с заданной временной зависимостью;
- отработка заданной тахограммы скорости вала;

Экспериментально моделирование производилось с ДВС номинальной мощностью 150 л.с. и машиной постоянного тока 100 кВт,



частота вращения вала при максимальном моменте составляет 5000 об/мин, максимальная частота 8000 об/мин.

В первом эксперименте испытываемый ДВС нагружался на 25, 50, 75, 100 % от номинального момента ДВС при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие временные зависимости скорости, ток якоря и ток возбуждения МПТ, показанные на рис.8, и мощностей механической, возбуждения и в звене постоянного тока показана на рис. 9, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 10, и фазных токов показанных на рис 11

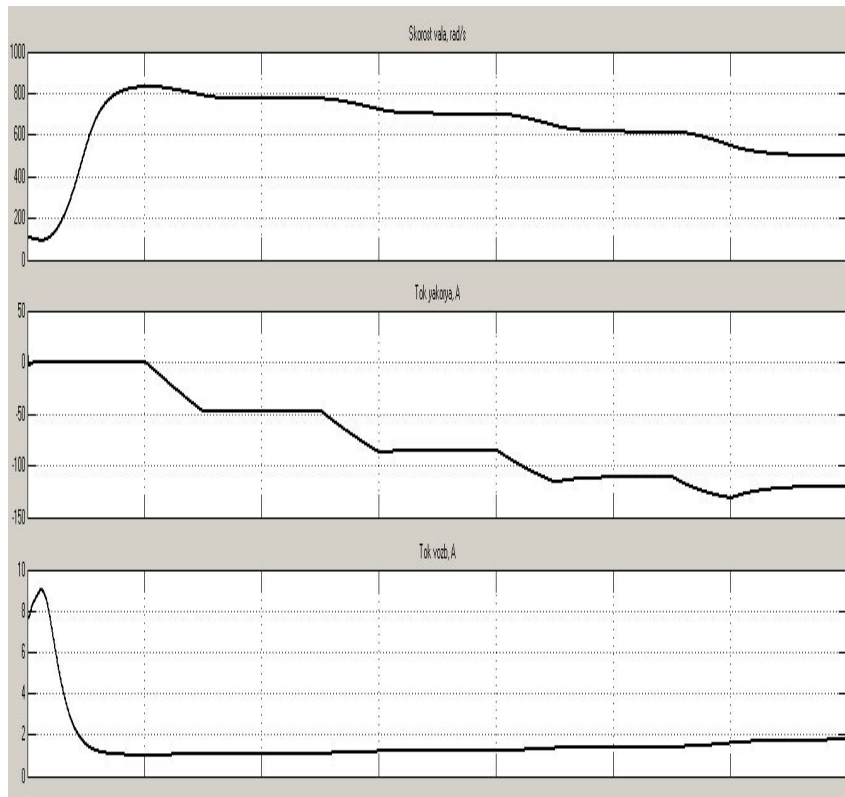


Рис 8 – Временны зависимости частоты вала, тока якоря и тока возбуждения МПТ в первом эксперименте.

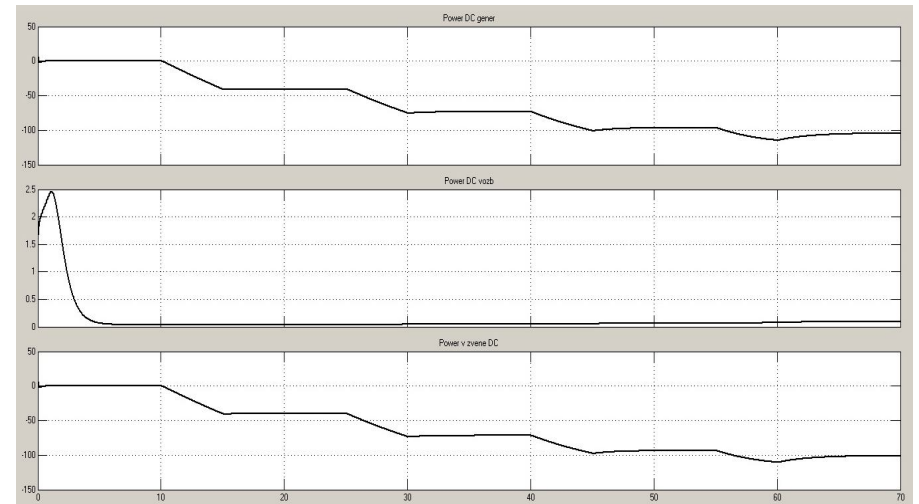


Рис 9 – График изменения механической мощности, мощности возбуждения и мощности в звене постоянного тока.

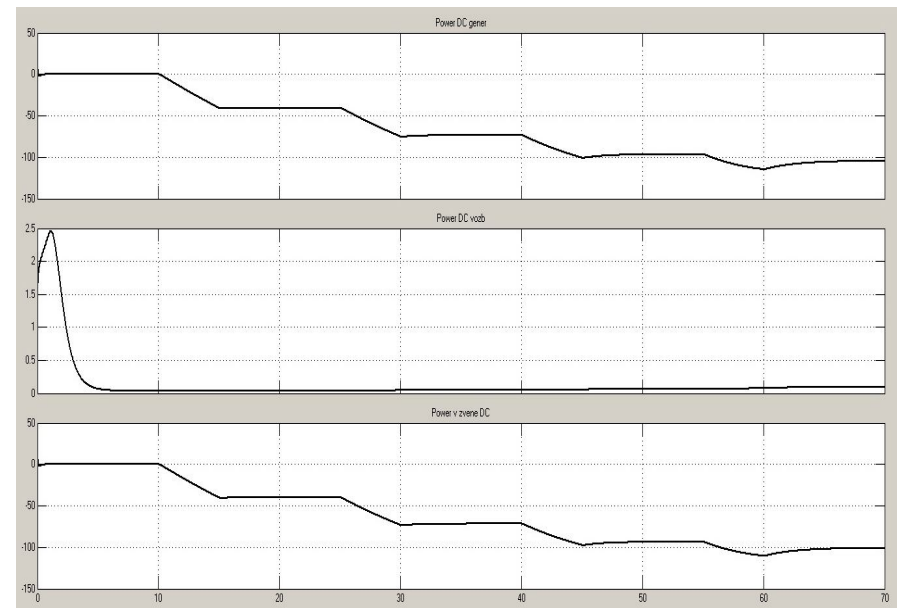


Рис 10 –График передаваемой активной и реактивной мощности

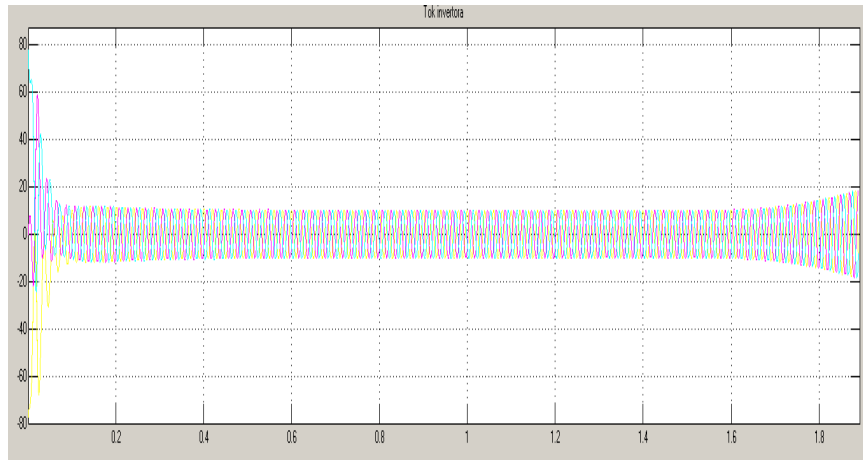


Рис 11 – График формы фазных токов.

Из графиков видно, что система обрабатывает заданную временную зависимость момента нагрузки ДВС при этом полученные значения мощности соответствуют ожидаемым результатам и внесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения мощностей в различных участках цепи в первом эксперименте.

| Момент ДВС, % | Механическая мощность, кВт | Мощность возбуждения МПТ, кВт | Мощность постоянного тока, кВт | Активная мощность сети, кВт | Реактивная мощность сеть, кВар |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 25            | 41.19                      | 0.03                          | 40.62                          | 40.38                       | 5.23                           |
| 50            | 75.15                      | 0.04                          | 73.29                          | 75.6                        | 4.94                           |
| 75            | 100.5                      | 0.05                          | 97.25                          | 96.15                       | 4.37                           |
| 100           | 110.8                      | 0.06                          | 106.8                          | 100.5                       | 4.07                           |

Во втором эксперименте испытываемый ДВС работал в диапазоне частот от 2000 до 5000 об/мин, при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие временные зависимости скорости, ток якоря и ток возбуждения МПТ, показанные на рис.12, и мощностей механической, возбуждения и в звене постоянно-

го тока показана на рис. 13, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 14.

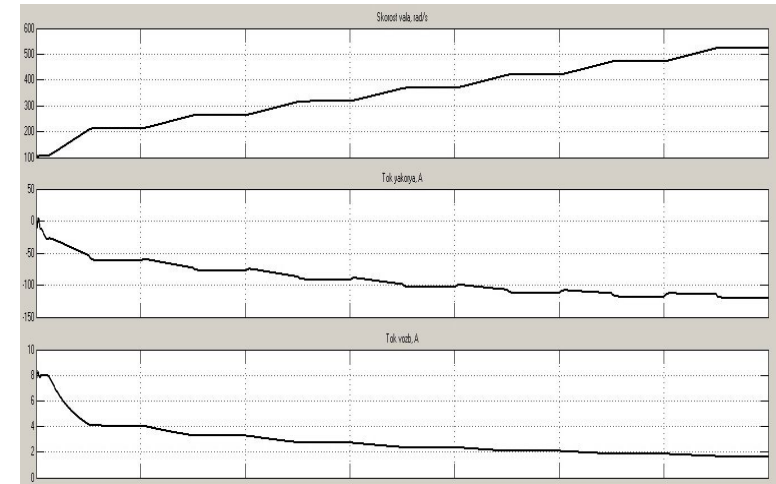


Рис 12 – Временны зависимости частоты вала, тока якоря и тока возбуждения МПТ во втором эксперименте.

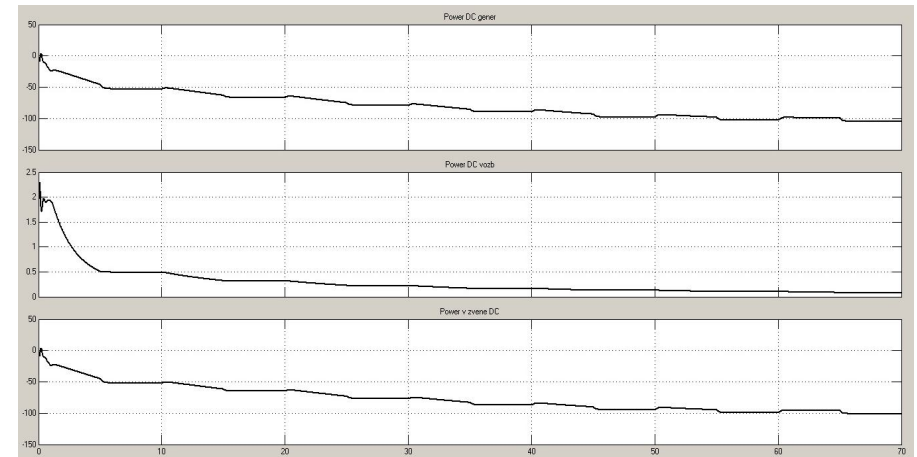


Рис 13 – График изменения механической мощности, мощности возбуждения и мощности в звене постоянного тока.

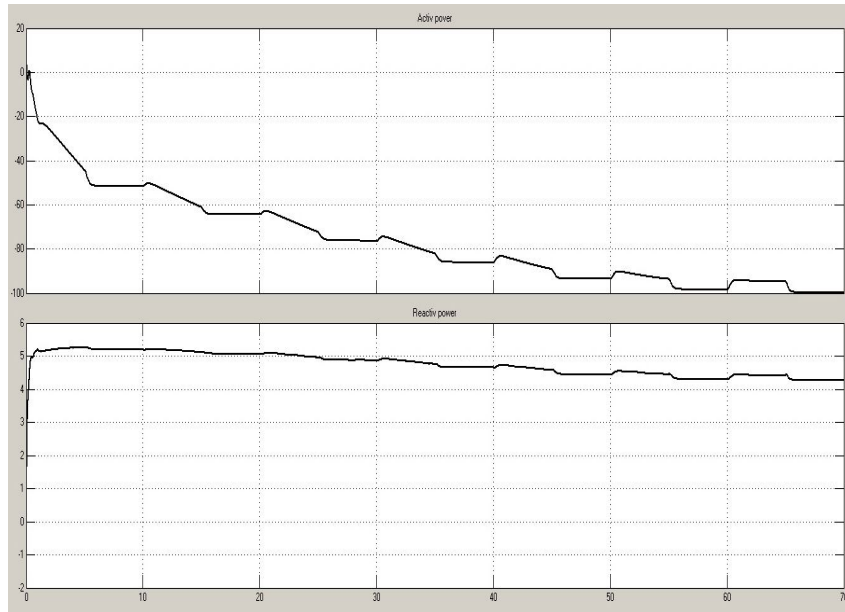


Рис 14 – График передаваемой активной и реактивной.

Из графиков видно что система обрабатывает заданную временную зависимость скоростей ДВС при этом полученные значения мощности соответствуют ожидаемым результатам и внесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения мощностей в различных участках цепи во втором эксперименте.

| Частота ДВС, об/мин | Механическая мощность, кВт | Мощность возбужденные МПТ, кВт | Мощность постоянного тока, кВт | Активная мощность сети, кВт | Реактивная мощность сеть, кВар |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 2000                | 52.19                      | 0.5                            | 50.62                          | 50.2                        | 5.12                           |
| 2500                | 70.24                      | 0.4                            | 68.29                          | 60.31                       | 5                              |
| 3000                | 81.57                      | 0.32                           | 79.25                          | 78.62                       | 4.89                           |
| 3500                | 91.82                      | 0.3                            | 86.81                          | 88.57                       | 4.68                           |
| 4000                | 99.17                      | 0.28                           | 95.14                          | 92.27                       | 4.5                            |
| 4500                | 100.12                     | 0.26                           | 99.56                          | 98.76                       | 4.3                            |
| 5000                | 100.33                     | 0.21                           | 100.15                         | 100                         | 4.22                           |

**Вывод.** Анализируя полученные результаты видно что система обрабатывает с достаточным быстродействием (порядка 0.1 с) задаваемые временные зависимости момента нагрузки и скорости ДВС, обеспечивая при этом отдачу энергии в сеть с относительно высоким КПД, около 90%.

Также моделирование подтверждают важное преимущество АИН, что форма тока вырабатываемая преобразователем имеет синусоидальную форму в отличие от случая использования ТП, а значение реактивной мощности возможно регулировать независимо от режима испытания ДВС.

Основным недостатком этого стенда, является использование МПТ, требующей обслуживания в отличие от машин переменного тока и значительно большую стоимость чем асинхронные машины, а также незначительно меньший КПД чем у машин переменного тока.

Поэтому в дальнейшем исследовании необходимо построить стенд на базе машины переменного тока и создать соответствующую математическую модель испытательного стенда. Также необходимо сравнить энергетические показатели этих стендов.

**Список литературы:** 1. Райков И.Я., Испытания двигателей внутреннего сгорания. И.Я. Райков. - Москва «Высшая школа» 1975 г. С 3-11 2. Тодарев В.В., Погуляев М.Н., Дорошенко И.В., Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники. / В.В. Тодарев, М.Н. Погуляев, И.В. Дорошенко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. -2007. -№4. – С.80-84. 3. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0 С.Г. Герман Галкин Санкт-Петербург «Люмена» 2006 г С 100-150

**Bibliography (transliterated):** 1. Raikov I.J., tests of internal combustion engines. - Moscow "High School" 1975 2 Todaro V.V., Pogulyaev M.N., Doroshenko I.V., saving electromechanical stands for testing of internal combustion engines and transmissions of agricultural machinery. Herald Gomel State. tehn. University No 4. 2007. 80-84. Print. 3 German Galkin S.G., Kompyutornoe modeling of semiconductor systems Matlab 6.0 St. Petersburg. Lumen 2006.

Поступила (received) 11.11.2014

**И.В. НИЖЕВСКИЙ**, ст. инж., ПАО «Укрэнергопроект», Харьков  
**В.И. НИЖЕВСКИЙ**, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПИ»,  
**С.К. БЕРЕЗКА**, канд. техн. наук., ст. преп., НТУ «ХПИ»,  
**О.Н. ХАЗАРОВ**, студент, НТУ «ХПИ»

### К РАСЧЕТУ ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО КРИВОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ УДАРА МОЛНИИ В ОПОРУ

Применяемая на практике кривая вероятности опасных параметров не позволяет выполнить точный численный расчет из-за неопределенных пределов интегрирования. Приведены результаты анализа и расчета вероятности перекрытия изоляции на опоре линии электропередачи напряжением 500 кВ. Показана необходимость при расчете вероятности использовать видоизмененную кривую вероятности опасных параметров. Это позволяет рассчитать вероятность перекрытия линейной изоляции.

**Ключевые слова:** анализ, расчет, вероятность, перекрытие изоляции, кривая вероятности опасных параметров

**Введение.** Несмотря на значительные успехи в области молниезащиты, исследования продолжают. Это связано с необходимостью дальнейшего повышения уровня молниезащиты, снижения риска отказов оборудования и развития аварий по причине несовершенства молниезащиты и неточности методов ее расчета.

Согласно литературным источникам [1-4], необходимо отметить следующее. Амплитуда токов первых компонентов отрицательных молний, соответствующих 50%-ной вероятности, составляет 30 кА, а последующих компонентов – только 13 кА. Для первых компонентов отрицательных молний 50%-ное значение максимальной крутизны фронта тока молнии составляет 13 кА/мкс, а для последующих компонентов – 30 кА/мкс.

При оценочных расчетах можно использовать усредненные распределения тока молнии и крутизны его фронта для отрицательных нисходящих от облака молний без учета различия первого и последующих компонентов. В этом случае статистические распределения можно аппроксимировать экспоненциальными функциями

$$P(I_M) = \exp(-0.4I_M), \quad (1)$$

$$P(a) = \exp(-0.8a), \quad (2)$$

где  $P(I_M)$  и  $P(a)$  – вероятности того, что соответственно ток молнии и крутизна его фронта будут равны или превысят данные значения.

Между амплитудой и крутизной фронта тока молнии имеется слабая положительная корреляционная связь: большим токам соответствует большая крутизна. Однако данных пока недостаточно, поэтому принято считать  $I_M$  и  $a$  независимыми случайными величинами. В этом случае при малых значениях вероятностей

$$P(I_M, a) = P(I_M) + P(a). \quad (3)$$

**Целью** настоящей работы является уточнение метода расчета вероятности перекрытия линейной изоляции.

**Основные результаты.** Исследование возможности уточненного метода расчета вероятности перекрытия линейной изоляции выполнено на примере гирлянды из двадцати двух изоляторов типа П-8,5, которая применяется для линий электропередачи номинальным напряжением 500 кВ. Возможность обратного перекрытия при прямом ударе молнии в опору оценивается путем построения кривой опасных параметров, которая определяет область опасных сочетаний амплитуды и крутизны токов молний, приводящих к перекрытию изоляции. Оценку вероятности перекрытия изоляции линии производят путем сопоставления изменения во времени напряжения на изоляции с ее вольт-секундной характеристикой. Поэтому, прежде всего, необходимо определить вольт-секундную характеристику данной гирлянды по уравнению

$$U(t) = A \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}} \quad (4)$$

где  $t$  – время, мкс;  $A$  и  $T_0$  – постоянные, значения которых находят подстановкой в (4) испытательных напряжений полным и срезанным импульсами соответственно при  $t=10$  мкс и  $t=2$  мкс. Для рассматриваемой гирлянды испытательное напряжение полным импульсом составляет  $U_{из}^+(t)=2310$  кВ, а испытательное напряжение срезанным импульсом составляет  $U_{из}^+(t)=3080$  кВ. В результате расчетов по уравнению (4) получаем вольт-секундную характеристику, которая представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Табл. 1 – Вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов 22хПФ-120 с защитной арматурой для положительной полярности

| $t$           | мкс | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 20   |
|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| $U_{из}^+(t)$ | кВ  | 3080 | 2630 | 2460 | 2370 | 2310 | 2200 |

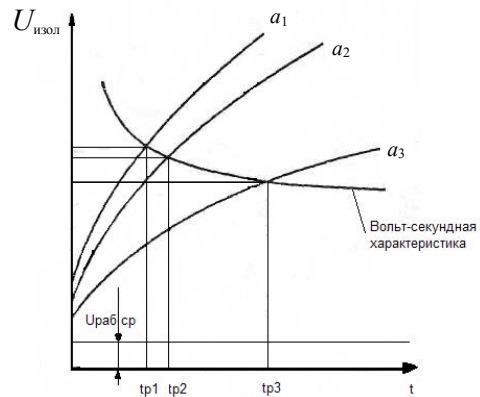


Рис. 1 – Кривые изменения напряжения при разных крутизнах фронта тока молнии ( $a_1 > a_2 > a_3$ ) и вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов. Определение времени разряда линейной изоляции

Данная вольт-секундная характеристика позволяет получить кривую опасных параметров следующим образом.

Значение напряжения на изоляции  $U_{из}(t)$  зависит от крутизны фронта тока молнии, которая при заданном времени  $t_{ф}$  определяет максимальное значение тока молнии  $I_M = a t_{ф}$ . Если построить зависимости напряжения на изоляции от времени  $U_{из}(t)$  при разных крутизнах фронта тока молнии  $a$ , как показано на рис. 1, то точки пересечения этих кривых с вольт-секундной характеристикой изоляции определяют длительность фронта тока молнии  $t_{ф} = t_p$  и минимальное значение амплитуды тока  $I_M = a t_p$ , при котором произойдет перекрытие изоляции. Например, пересечение вольт-секундной характеристики с кривой напряжения, построенной при определенной крутизне тока молнии  $a_1$ , определит время разряда  $t_{p1}$ , а следовательно, и амплитуду тока молнии  $I_{M1} = a_1 t_{p1}$ , при которой происходит перекрытие изоляции. На рис. 1 схематически изображены кривые изменения напряжения, действующего на изоляцию для трех значений крутизны  $a_1, a_2, a_3$  и вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов. Из пересечения этих кривых определяются три значения времени перекрытия  $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}$ . Соответствующие этим временам значения токов молнии будут:  $I_{M1} = a_1 t_{p1}; I_{M2} = a_2 t_{p2}; I_{M3} = a_3 t_{p3}$ .

Таким образом, можно определить все возможные сочетания амплитуды и крутизны тока молнии, которые приводят к перекрытию изоляции. По полученным значениям  $a_i$  и  $I_{Mi}$  строится так называемая кривая опасных параметров тока молнии, которая приведена на рис. 2.

Эта кривая ограничивает область сочетаний максимального значения и крутизны тока молнии, при которых происходит перекрытие изоляции. Каждый удар молнии характеризуется определенным сочетанием параметров  $I_M$  и  $a$ , следовательно, ему соответствует определенная точка в плоскости  $I_M$  и  $a$ . При этом все удары молнии, которые будут изображены точками, находящимися в области, лежащей справа от кривой опасных параметров, соответствуют сочетаниям  $I_M$  и  $a$ , вызывающим перекрытия линейной изоляции. Например, при крутизне  $a_1$  перекрытие изоляции происходит при токах, больших  $I_{M1}$ , при крутизне  $a_2$  – при токах, больших  $I_{M2}$  и т. д. В то же время все удары молнии, изображаемые точками, находящимися слева от кривой опасных параметров, соответствуют сочетаниям параметров молнии, которые оказываются для изоляции безопасными.

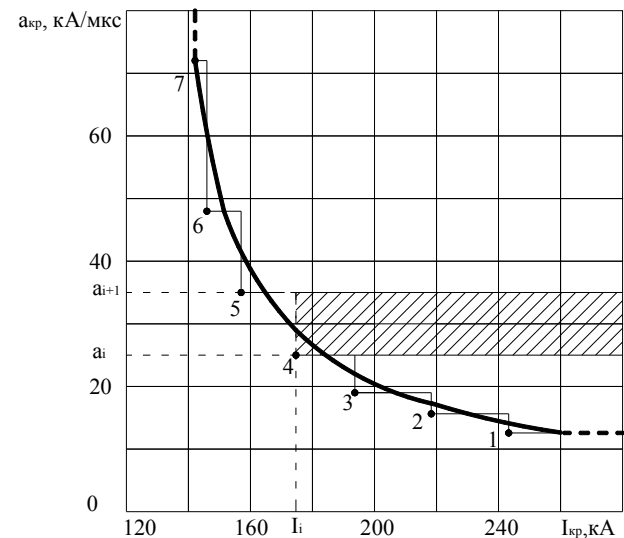


Рис. 2 – Кривая опасных параметров для удара молнии в опору

Кривая опасных параметров может быть построена только в пределах значений  $t$ , для которых известна вольт-секундная характеристика. Концы кривой опасных параметров экстраполируются прямыми, параллельными осям координат.

В этом случае вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору определяется графоаналитическим интегрированием рас-

пределения случайных сочетаний параметров молнии  $I_M$  и  $a$ , заданного двумерной функцией  $f(I_M, a)$  по всей опасной области, лежащей справа от кривой опасных параметров. Для этого плавная кривая опасных параметров заменяется ступенчатой кривой, и область справа от нее разбивается на конечное число  $n$  прямоугольных полосок. Тогда вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору

$$P_{on} = \sum_{i=1}^n \Delta_i P$$

где  $\Delta_i P$  определяется по формуле

$$\Delta_i P = P_{I_i} (P_{a_i} - P_{a_{i+1}}),$$

в которой  $P_{I_i}$  – вероятность значений  $I$  превышающих  $I_i$  по формуле (1), а  $P_{a_i}$  – вероятность значения  $a$ , превышающего  $a_i$  по формуле (2). В результате расчетов получаем  $P_{on} = 24,27 \cdot 10^{-4}$ .

По полученной кривой опасных параметров (рис. 2) строим кривую вероятности опасных параметров, которая приведена на рис. 3.

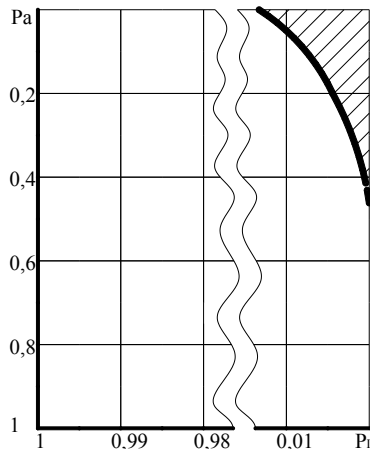


Рис. 3 – Кривая вероятности опасных параметров (заштрихованная область дает значение вероятности)

Полученная кривая вероятности опасных параметров не позволяет выполнить точный численный расчет из-за неопределенных пределов интегрирования, поэтому необходимо построить кривую вероятности опасных параметров в виде зависимости  $1 - P_a = f(1 - P_I)$ , которая, как по-

казано на рис. 4, имеет четкие пределы интегрирования, что позволяет рассчитать вероятность перекрытия линейной изоляции.

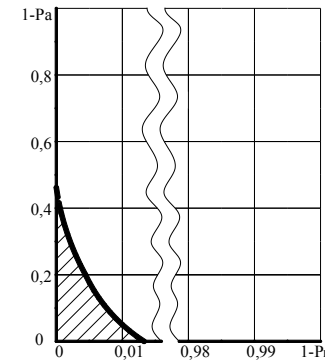


Рис. 4 – Определение вероятности перекрытия изоляции (заштрихованная область дает значение вероятности)

Аналитическим путем вероятность перекрытия изоляции определяется как:

$$P = \iint f(I_M, a) dI_M da, \quad (4)$$

где  $f(I_M, a)$  – двумерная функция плотности вероятности максимального значения амплитуды и крутизны тока молнии, а интегрирование осуществляется по всей заштрихованной области.

При практических расчетах на основании результатов измерений можно считать, что амплитуда  $I_M$  и крутизна фронта  $a$  волны тока молнии не связаны между собой однозначной функциональной зависимостью. В соответствии с этим расчетный закон двумерного распределения различных сочетаний амплитуды  $I_M$  и крутизны фронта тока  $a$  выражается формулой:

$$\lg P_{I,a} = -\left(\frac{I_M}{60} + \frac{a}{36}\right), \quad (5)$$

где  $P_{I,a}$  – вероятность того, что амплитуда и крутизна фронта тока молнии косоугольной формы одновременно превышают значения  $I_M$  и  $a$ .

В настоящее время нет достаточной информации для надежного определения функции  $f(I_M, a)$ , поэтому в качестве первого приближения

принимают их за независимые величины. В этом случае с учетом (5) вероятность перекрытия определяется как:

$$P = \int \int_{(D)} f_1(I_M) f_2(a) dI_M da = \int_0^{\infty} f_1(I_M) dI_M \int_0^{\infty} f_2(a) da = , \quad (6)$$
$$= \int_0^1 dP_I \int_0^1 dP_a = \int_0^1 P_I dP_a = \int_0^1 P_a dP_I$$

т. е. вероятность перекрытия линейной изоляции равна в соответствующем масштабе заштрихованной площади на рис. 4, которая ограничена видоизмененной кривой вероятности опасных параметров.

**Выводы.** Результаты выполненных исследований показывают, что вероятность перекрытия линейной изоляции можно рассчитать с достаточной точностью при использовании предложенной зависимости  $1-P_a=f(1-P_I)$ .

**Список литературы:** 1. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / И.М. Богатенков, Г. М. Иманов, В. Е. Кизеветтер и др. ; под ред Г. С. Кучинского. – СПб : Изд. ПЭИПК 1998. - 700 с. 2. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь; Под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с. 3. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях : учеб. пособ. / В. И. Гуль, В. И. Нижевский, И. В. Хоменко и др.; под ред. проф. В. И. Гуля. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 270 с. 4. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб. : ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. I.M. Bogatenkov, G. M. Imanov, V. E. Kizevetter *Tehnika vysokih naprjazhenij*: SPb. : PJeIPK 1998.. 2. Bazutkin V. V. V. P. Larionov, Ju. S. Pinal'; Pod obshh. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Izoljacija i perenaprjazhenija v jelektricheskikh sistemah*:. - Moscow.: Jenergoatomizdat. 3. V. I. Gul', V. I. Nizhevskij, I. V. Homenko *Koordinacija izoljacji i perenaprjazhenija v jelektricheskikh vysokovol'nyh setjah*. Khar'kov : JeDJeNA, 2009. . 4. RD 153-34.3-35.125-99. Rukovodstvo po zashhite jelektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenaprjazhenij / Pod nauchnoj redakciej N.N. Tihodeeva. – 2-e izd. – SPb. : PJeIPK Mintopjenergo RF, 1999. .

Поступила (received) 28.11.2014

УДК 551.594.221

**А.А. ПЕТКОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ";  
**Н. В. ФЕДОРОВА**, магистрант НТУ "ХПИ"

## ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕОТВОДА

В статье получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта. Сравнение параметров зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и материалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов расчета.

**Ключевые слова:** разряд молнии, вероятность поражения, плотность распределения. поверхность грунта

**Постановка проблемы.** В условиях возрастающей в последнее время грозовой активности большое значение приобретает защита от прямого удара молнии как зданий и сооружений, возвышающихся над поверхностью грунта, так и объектов, расположенных на его поверхности: кабельные коммуникации, заземляющие спуски; металлоконструкции, соединенные с броней кабеля; различные вводы в подземные объекты, а также объекты, расположенные непосредственно под поверхностью грунта. Для оценки их молниезащищенности необходима информация о вероятности поражения поверхности грунта при наличии молниеотводов различного вида и, в частности, стержневых молниеотводов.

**Анализ публикаций.** Согласно нормативному документу [1], одним из видов зоны защиты (ЗЗ) стержневого молниеотвода является коническая форма, которая характеризуется высотой конуса и радиусом ЗЗ на поверхности грунта. Радиус ЗЗ определяется в зависимости от надежности защиты и высоты молниеотвода. Надежность защиты представлена дискретным рядом {0,9; 0,99; 0,999} и предписывается всей поверхности грунта, находящейся в ЗЗ вне зависимости от расстояния от оси стержневого молниеотвода. Однако теоретические основы электрогеометрического метода построения ЗЗ молниеотводов [2], дают основания предполагать, что предписанные значения надежности ЗЗ являются некими обобщающими оценками и существует определенная зависимость вероятности поражения точек поверхности

© А.А. Петков, Н. В. Федорова. 2014

грунта от расстояния до оси стержневого молниеотвода. Этот факт подтверждают экспериментальные данные, представленные в работах [3-5]. В работах исследовались электрические разряды в неоднородном поле, создаваемом в системе «стержень-плоскость» при наличии стержня-объекта. Длина разрядных промежутков составляла 0,78 м, и 1,26 м и 3 м.

Полученные в работах экспериментальные данные могут быть использованы для оценки изменения вероятности поражения плоскости длинным электрическим разрядом при наличии стержня.

**Цель работы.** Разработка методики оценки вероятности поражения разрядом молнии поверхности грунта в районе расположения стержневых объектов.

**Результаты исследований.** На рис.1 показана одна из схем проведенных испытаний [3, 4], результаты которых позволяют дать оценку вероятности поражения плоскости длинной искрой при наличии стержневого объекта.

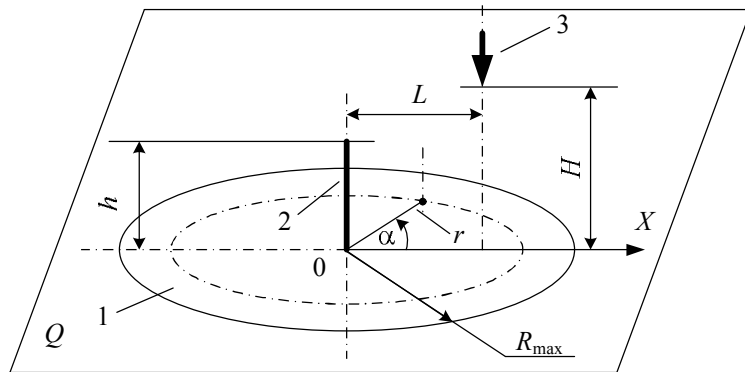


Рис. 1 – Схема проведения испытаний

На рисунке обозначено: 1 – зона заземленной плоскости  $Q$ , в которой вероятность ее поражения длинной искрой зависит от наличия стержневого объекта 2; 3 – потенциальный электрод, с которого развивается разряд длинной искры на стержень-объект 2 либо плоскость  $Q$ .

Испытания были организованы следующим образом. Первоначально потенциальный электрод 3 устанавливался на расстоянии  $H$  от плоскости соосно со стержнем-объектом 2. Проводилась серия разрядов  $N$  (с использованием генератора импульсов напряжения) и фиксировалось количество поражений стержня-объекта  $n$ . Вероятность поражения стержня-объекта определялась по соотношению  $q = n / N$ . Да-

лее потенциальный электрод смещался вдоль оси  $OX$  на величину  $L$ , проводилась новая серия разрядов и определялась вероятность поражения стержня при данном значении  $L$ .

На рис. 2 показано [5] изменение вероятности поражения стержня в зависимости от величины смещения потенциального электрода  $L$  для варианта  $H = 3$  м,  $h = 0,3$  м. Обработка экспериментальных данных показывает, что радиус зоны, в которой вероятность поражения плоскости длинной искрой зависит от наличия стержневого объекта 2 (рис. 2), и составляет [5]: для варианта  $H = 3$  м,  $h = 0,3$  м –  $R_{\max} = 1,7$  м; для варианта  $H = 3$  м,  $h = 0,15$  м –  $R_{\max} = 1,3$  м. Величина  $R_{\max}$  равна минимальному смещению потенциального электрода  $L$ , при котором уже не наблюдаются разряды на стержневой объект 2 (рис. 2).

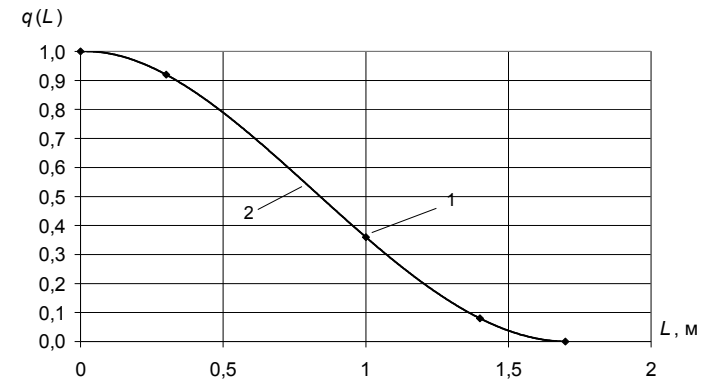


Рис. 2 – Зависимость вероятности поражения стержня от величины смещения потенциального электрода.

1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

Учитывая, что при разряде возможны только два несовместимых события: поражение стержня или поражение плоскости, то данные вероятности поражения стержня позволяют определить точки эмпирической функции распределения поражения плоскости  $F_e$  при смещении потенциального электрода в виде:

$$F_e(L_k) = \sum_{i=1}^k \frac{1 - q(L_i)}{\sum_{j=1}^m [1 - q(L_j)]}, \quad (1)$$



где  $k$  – номер экспериментальной точки;  $m$  – количество экспериментальных точек.

Теоретическая функция распределения  $F_t(L)$  может быть получена путем аппроксимации данных, определенных по (1) и для варианта  $H = 3$  м,  $h = 0,3$  м имеет вид

$$F_t(L) = 0,327L^2. \quad (2)$$

Тогда плотность распределения поражения плоскости при смещении потенциального электрода по радиусу равна

$$g(L) = \frac{dF_t(L)}{dL} = 0,654L. \quad (3)$$

Для оценки поражения плоскости разрядом длинной искры в районе размещения стержневого объекта рассмотрим следующую задачу. Пусть разряд длинной искры может равно вероятно инициироваться из любой точки пространства, расположенной на высоте  $H$  над плоскостью в пределах круга с радиусом  $R_{\max}$  (рис. 2). Известно, что разряд может поразить либо стержневой объект, либо плоскость. Требуется определить вероятность того, что в результате разряда из точки с координатами  $(r, \alpha, H)$  будет поражена плоскость  $Q$ . Исходя из постановки задачи, с учетом соотношения (3) вероятность поражения элементарной площадки плоскости  $Q$  имеет вид [6]

$$p = g(r, \alpha) dr d\alpha = 0,654r dr d\alpha. \quad (4)$$

Тогда вероятность поражения плоскости при инициировании разряда в пределах круга радиусом  $r$  определится как

$$P(r) = F(r) - F(0) = \frac{\int_0^r \int_0^{2\pi} g(r, \alpha) dr d\alpha}{\int_0^{R_{\max}} \int_0^{2\pi} g(r, \alpha) dr d\alpha} = \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^2. \quad (5)$$

Соотношение (5) определяет вероятность поражения всей плоскости  $Q$  и может служить верхней оценкой вероятности поражения части плоскости – круга радиусом  $r$ .

Для определения адекватности принятой оценки произведем ее сравнение с зоной защиты стержневого молниеотвода на уровне грунта, определяемой по материалам действующего нормативного документа [1]. Согласно [1] надежность защиты стержневого молниеотвода  $P_3$  равна  $P_3 = 1 - P_{\text{ППМ}}$ , где  $P_{\text{ППМ}}$  – вероятность прямого поражения молнией защищаемого объекта. Эту вероятность можно отнести и час-

ти плоскости грунта, находящейся в зоне защиты конической формы, которая является кругом с радиусом  $r_0 = kh_M$ , где  $h_M$  – высота стержневого молниеотвода,  $k$  – коэффициент, зависящий от высоты молниеотвода и надежности защиты.

Используя геометрическое подобие системы стержень-круг (рис. 1), можно сопоставить значения коэффициента  $k$ , приведенные в [1] и рассчитанные исходя из (5) при  $P(r) = P_{\text{ППМ}}$ . На рис. 3 показано изменение коэффициента  $k$  для различных значений вероятности поражения круга, соосного со стержнем высотой до 30 м. Как видно из рисунка, при малых вероятностях поражения плоскости (больших значениях надежности зоны защиты стержневого молниеотвода), расчет дает меньшее значение радиуса зоны защиты на поверхности грунта по сравнению с нормативным документом. При малых значениях надежности – расширяет зону защиты на поверхности грунта.

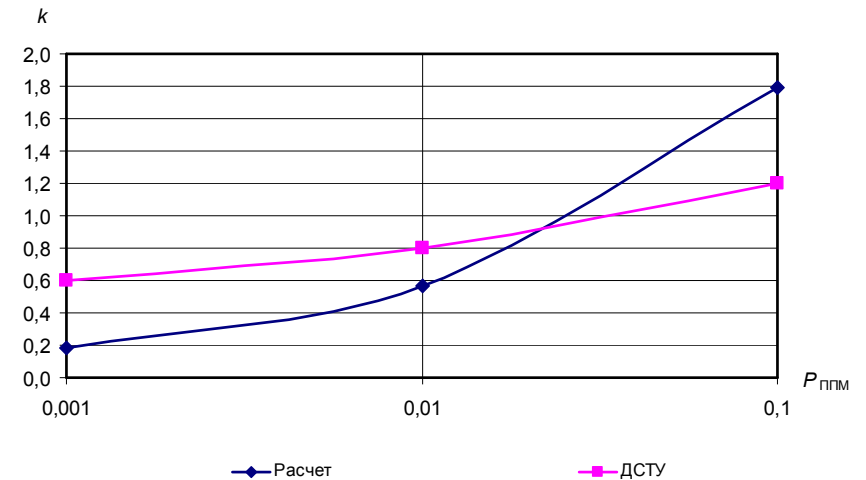


Рис. 3 – Изменение коэффициента связи высоты стержня и радиуса круга

### Выводы

1. Получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта.
2. Сравнение зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и мате-

риалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов.

Материалы статьи могут быть использованы для усовершенствования методов расчета зоны защиты стержневых молниеотводов.

**Список литературы:** 1. Улаштування блискавкозахисту будівель споруд (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Чинний від 2008–01–01]. – К. : Мінорегіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. Ларионов В.П. Основы молниезащиты / Ларионов В.П. : под ред. И.М. Бортника. – М. : Знак, 1999. – 104 с. 3. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / [Баранов М.И., Доценко В.И., Зиньковский В.М. и др.] // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПИ", – 2013. – №27. – С. 11 – 20. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/3817>. 4. Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длинной искрой / [Г.М. Колиушко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др.] // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПИ", – 2013. – №60. – С. 57 – 70. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/5668>. 5. Петков А.А. Экспериментальные исследования поражения стержневого молниеотвода / А.А. Петков // Физические и компьютерные технологии: труды 19-й Международной научно-технической конференции (Харьков, 25 – 26 июня 2014г.). – Харьков : ГП ХМЗ "ФЭД", – 2014. – С. 146 – 149. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8747>. 6. Венцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000.— 480 с. – ISBN 5-06-003830-0.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivell sporud (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Chinniy vid 2008–01–01]. – K. : Minoregionbud UkraYini, 2008. – 63 s. 2. Larionov V.P. *Osnovni molniezaschityi*. Moscow: Znak, 1999. 3. Baranov M.I., Dotsenko V.I., Zinkovskiy V.M. *Eksperymentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeshchennykh na ney ob'ektov elektricheskimi razryadom v dlinnom promezhutke*. *Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unversitetu "Harkivskiy politehnlchniy Instytut"*. Zblrnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnlka ta elektroflzika visokih naprug. No. 27. 2013. 11 – 20. Print 4. G.M. Koliushko, P.N. Melnikov, O.S. Nedzelskiy *Vliyanie konfiguratsii sistemyi elektrodov na raspredelenie tochek porazheniya ploskosti dlinooy iskroy*. *Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unversitetu "Harkivskiy politehnlchniy Instytut"*. Zblrnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnlka ta elektroflzika visokih naprug. No. 60. 2013. 57 – 70. Print 5. Petkov A.A. *Eksperymentalnye issledovaniya porazheniya stержnevoogo molnieotvoda* *Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: trudy 19-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Harkov, 25 – 26 iyunya 2014g.)*. Kharkov : GP HMZ "FED", 2014. 146 – 149. Print.

Поступила (received) 05.11.2014

УДК 621.315

Э. Д. ШУМИЛОВА, к.т.н., доцент, Донбасский государственный педагогический университет

Ю. Н. ШУМИЛОВ, д.т.н., проф., ГП «Научно-исследовательский институт высоких напряжений»

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЛЁНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Работа посвящена изучению электрической прочности и закономерностям разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в среде криогенных жидкостей при напряжённости электрического поля близких к рабочим. Показано, что основным разрушающим фактором МПИ являются частичные разряды ЧР в полостях, заполненных криогенной жидкостью. Воздействие ЧР в зависимости от материала приводит к растрекиванию плёнок, либо к образованию на поверхности науглероженных проводящих побегов. Даны рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств.

**Ключевые слова:** многослойная полимерная плёночная изоляция, криогенные жидкости, электрическая прочность, частичные разряды, разрушение плёночной изоляции

Криогеника – раздел физики низких температур, изучающий изменение свойств различных веществ в условиях крайне низких (криогенных) температур. Наибольшее количество работ по изучению свойств материалов при криогенных температурах посвящено чистым металлам и их сплавам после открытия явления в них сверхпроводимости [1-2]. Применение сверхпроводящих токопроводов в электро-техническом оборудовании позволит создавать различные энергетические устройства, такие как трансформаторы, токоограничители, индуктивные накопители, кабели и так далее. Их применение может значительно улучшить ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличить их устойчивость, надёжность и пропускную способность [3]. К сожалению очень мало работ по изучению свойств диэлектрических материалов при криогенных температурах.

**Целью настоящей работы** явилось изучение электрической прочности и закономерностей разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в криогенных жидкостях при напряжённости электрического поля близких к рабочим частотой 50 Гц.

Полимерная плёночная изоляция обладает высокой электрической и механической прочностью, гибкостью, технологичностью нанесения на токопроводящие элементы электрооборудования. Однако

© Э.Д. Шумилова, Ю. Н. Шумилов. 2014

одним из недостатков МПИ является возможность появления между слоями и стыками лент газовых полостей заполненных впоследствии криогенной жидкостью. При повышении напряжения свыше рабочего в этих полостях могут возникать частичные электрические разряды ЧР, разрушающим образом воздействующие на изоляцию, которые, в конечном счёте, могут привести к её пробое.

**Методика исследования.** Исследования МПИ проводились на модельных образцах, представляющих собой стопку вырезанных плёнок с количеством слоёв от 3 до 12. Сверху плёнок накладывалась слюдяная пластинка толщиной 0,11 мм с отверстием диаметром 4 мм для создания полости, в которой инициировали частичные разряды. Полученный образец зажимался между дискообразными металлическими электродами: высокопотенциальный диаметром 25 мм и низкопотенциальный электрод диаметром 35 мм. Специальное приспособление с образцом и электродами помещалось в дюар с криогенной жидкостью и на образец подавалось переменное напряжение 50 Гц. При исследованиях измеряли характеристики ЧР: напряжение возникновения ЧР, напряжение погасания ЧР, интенсивность ЧР. В работе использовались широкополосные регистраторы ЧР «Корона-5М» и «Корона-6». Чувствительность схемы измерения составляла не менее  $3 \cdot 10^{12}$  Кл. После пробоя образца или длительной выдержки под напряжением он разбирался и изучалась с помощью микроскопа поверхность в зоне действия ЧР.

В качестве МПИ использовались следующие промышленные плёночные диэлектрики:

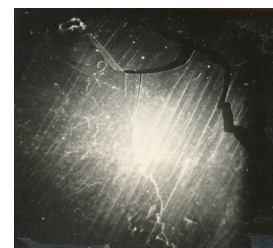
- полиэтилентерефталат (ПЭТФ) толщиной 10-30 мкм,
- политетрафторэтилен (ПТФЭ) толщиной 15-30 мкм,
- полиимид (ПИ) толщиной 40 мкм,
- полиэтилен (ПЭ) толщиной 40 мкм,
- полипропилен (ПП) толщиной 10 мкм.

**Экспериментальные результаты.** При изучении закономерностей разрушения полимерных плёнок в среде жидкого азота и гелия было установлено, что ЧР могут существовать в виде разрядов, перпендикулярных диэлектрическим поверхностям и в виде поверхностных скользящих разрядов. Первый вид разрядов оставляет следы эрозии в виде кратеров круговой формы, второй – каналы белого цвета или тёмные науглероженные побеги (треки). Микроскопическими исследованиями поверхности разрушения были установлены три типа разрушения в месте пробоя:

Тип 1 – пробой в виде отверстия (Рис.1б и 2), которому предшествует образование кратеров;

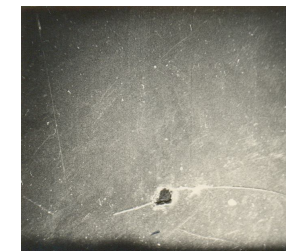
Тип 2 – пробой после образования науглероженных каналов на поверхности плёнки (Рис.4);

Тип 3 – пробой в результате растрескивания плёнок (Рис.2);



увеличение X 10

а



увеличение X 10

б

Рис.1– Разрушение полимерных плёнок при пробое в жидком гелии,  $f=50$  Гц:

а – полиэтиленовые плёнки ПЭ, 3 слоя x 40 мкм;

б – ПЭТФ плёнки, 5 слоёв x 15 мкм.

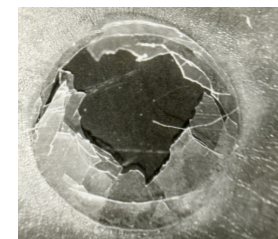


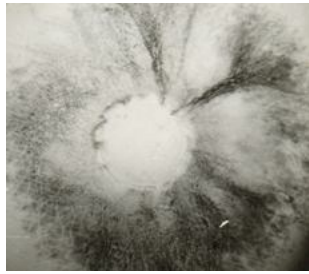
Рис. 2 – Растрескивание ПЭ плёнки в зоне ЧР при выдержке в жидком азоте.

Толщина образца - 2 слоя, 40 мкм, частота 50 Гц, напряжение 6 кВ.

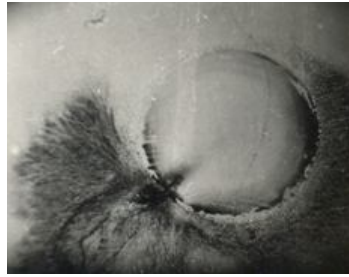


Рис. 3 – Пробой в жидком азоте ПТФЭ плёнки в центре полости (Тип 1).

Толщина образца 3 слоя x 40 мкм., частота 50 Гц.



увеличение x 6.



увеличение x 6.

Рис.4 – Образование науглероженных побегов и пробой в зоне ЧР образцов полиимидной плёнки (ПИ) в жидком азоте (Тип 2). Толщина образцов 4 сл x 30 мкм.

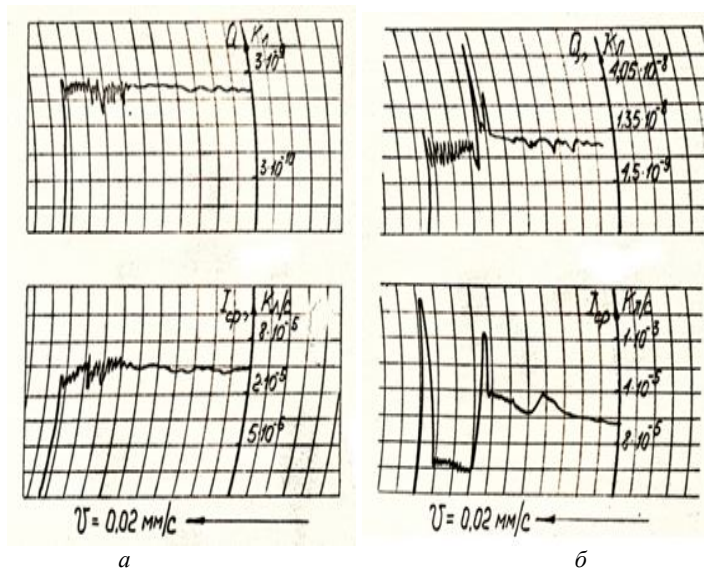


Рис. 5 – Изменение характеристик ЧР в момент появления трещин в плёнках ПЭ. а – колебания тока ЧР при появлении первоначальных трещин; б – резкое возрастание тока при интенсивном растрескивании плёнок.

Если образцы не доводить до пробоя, то указанные виды разрушения присутствуют только в первом слое, прилегающем к газовой полости.

**Эффект растрескивания.** В ряде плёнок перед пробоем наблюдалось растрескивание. Нестойкими к растрескиванию являются плёнки ПЭ и ПП, в меньшей степени ПТФЭ. В полиэтиленовых плёнках перед пробоем наблюдалось резкое самопроизвольное возрастание среднего тока ЧР, вызванное интенсивным растрескиванием плёнки в зоне ЧР (Рис.2).

Наиболее стойкими к растрескиванию являются ПЭТФ и ПИ, но они склонны к образованию науглероженных побегов. Высокие энергетические характеристики ЧР в криогенных жидкостях ( $Q=10^{-7} - 10^{-9}$ ) Кл,

$I_{cp}=(10^{-6} - 10^{-3})$  Кл/с, а также присутствие науглероженных побегов и трещин на поверхности плёнок позволяет допустить возможность разрушения МПИ вследствие термического воздействия ЧР.

Стойкость полимерных диэлектриков при криогенных температурах к растрескиванию в условиях импульсного теплового воздействия ЧР оценивалась с помощью известного критерия:

$$k = \frac{\sigma_p}{\alpha E} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c}}$$

Где  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении, кг/м<sup>2</sup>,

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К,

$E$  – модуль упругости, кг/м<sup>2</sup>,

$\lambda, \rho, c$  – коэффициенты теплопроводности, плотности и удельной теплоёмкости диэлектрика.

Согласно [4], чем больше критерий  $k$ , тем выше термостойкость диэлектрика. Вычисленные значения  $k$  возрастают в направлении ПЭ, ПТФЭ, ПЭТФ, ПИ (от 0,2 до 4,7). Эта последовательность совпадает с рядом устойчивости к растрескиванию полимерных плёнок в зоне ЧР, который был получен экспериментально, что позволяет использовать критерий  $k$  при выборе МПИ для криогенных устройств.

**Образование науглероженных побегов (треков).** Высокие энергетические характеристики ЧР в криогенных жидкостях - интенсивности  $Q=10^{-7}-10^{-9}$  Кл и среднего тока  $I_{cp} = (10^{-6} - 10^{-3})$  Кл/с, а также отсутствие окислительной среды в полостях способствует образованию трековых дорожек в зоне ЧР. Тенденция к образованию науглероженных проводящих побегов при воздействии поверхностных дуговых разрядов при нормальных температурах в воздухе рассматривается в работе [4], в которой проводится анализ терморазрушения полимера с энергетической точки зрения. Считается, что при воздействии высоких

температур термодеструкция полимера происходит следующим образом:

Полимер – (температура) – углерод + газообразные продукты.

$$\Delta H_{срd} = \Delta H_c + \Delta H_{vol},$$

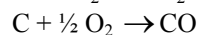
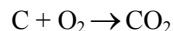
Где  $\Delta H_{срd}$  - суммарная энергия связей основного структурного звена полимерной молекулы,

$\Delta H_c$  - суммарная энергия связей, разрыв которых приводит к образованию свободного углерода,

$\Delta H_{vol}$  - суммарная энергия связей, разрыв которых способствует удалению углерода вместе с газообразными продуктами.

Согласно этой гипотезе считается, что на поверхности полимера образуются науглероженные побеги только в том случае, если при терморазложении углерод остаётся на поверхности и в объёме материала. Если углерод окисляется, то он удаляется вместе с газообразными продуктами и возникает только эрозия материала.

При нормальных условиях удалению углерода из зоны разряда способствует присутствие в воздухе кислорода, который поглощает образующийся свободный углерод и образует летучие газообразные продукты:



С увеличением мощности источника скорость пиролиза становится выше скорости окислительных процессов. Это способствует образованию и появления трещин на поверхности полимерных материалов.

Показано, что при соотношении  $\Delta H_c / \Delta H_{срd} < 0,4$  терморазрушение полимеров приводит только к образованию эрозионных кратеров в зоне разрядов без образования проводящих побегов. При  $\Delta H_c / \Delta H_{срd} > 0,4$  терморазрушение полимеров сопровождается интенсивным образованием проводящих науглероженных побегов. К полимерам первого типа ( $\Delta H_c / \Delta H_{срd} < 0,4$ ) относятся полиэтилен, полипропилен, полиметилметакрилат, кремнийорганические каучуки. К полимерам второго типа - полистирол, поликарбонат, фенолформальдегидные смолы, диановые эпоксидные смолы и др.

В среде криогенных жидкостей ввиду отсутствия кислорода и большой интенсивности ЧР, как и в изоляции при нормальных условиях, образование науглероженных побегов облегчается [4], что и наблюдалось в описываемых экспериментальных результатах. Возникновение проводящих побегов способствует также образованию полисо-

136 ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098)

пряжённых соединений, к чему склонны полимеры, содержащие в структуре ароматические соединения и боковые группы со слабыми звеньями. С этих позиций объясняется высокая устойчивость к образованию проводящих побегов у исследуемых полимеров – ПЭ, ПП, ПТФЭ – как не имеющих в структуре цепи боковых групп со слабыми связями и ароматических соединений. ПЭТФ и ПИ, содержащие в структуре ароматические соединения, образуют проводящие побеги. Структура полиимидов наиболее предрасположена к образованию полисопряжённых структур "паркетного" типа и поэтому наиболее подвержена образованию проводящих науглероженных побегов.

#### Заключение.

Анализ результатов по электрической прочности, напряжённым состояниям возникновения ЧР и устойчивости к разрушению позволяет следующие рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств:

1. В устройствах, к которым предъявляются повышенные требования к обеспечению минимальных диэлектрических потерь, рекомендуется применять неполярные диэлектрики ПП, ПЭ, ПТФЭ, обеспечивающие одновременно низкие диэлектрические потери и высокие значения напряжённости возникновения ЧР.

2. В устройствах с более низкими требованиями к диэлектрическим потерям могут быть рекомендованы плёнки из ПЭТФ, как обладающие повышенной устойчивостью к растрескиванию и менее выраженной склонностью к образованию науглероженных побегов.

**Список литературы:** 1. П.Де-Жен. Сверхпроводимость металлов и сплавов / П.Де-Жен // М.: Мир. – 1968 с. 2. Г.Брехна. Сверхпроводящие магнитные системы./ Г.Брехна.// М.: Мир. – 1976.с. 3. Н.А.Черноплеков. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения.// Вестник Российской академии наук.– № 4. – 2001. – с 303 – 319. 4. D.I.Parr, R.M. Scarisbrik. Performance of syntetic insulating materials under polluted conditions. " Proc. IEE ", № 8, p.1625 – 1632. 5. А.К. Шидловский, Высоковольтные полимерные изоляторы. / А.К. Шидловский, Ю.Н., Шумилов, А.А.Щерба, Золотарёв В.М. // Киев, Сучасність, 2008..

**Bibliography (transliterated):**1. P.De-Zhen. *Sverhprovodimost' metallov i splavov*. Moscow «Mir», 1968. 2. G.Brehna. *Sverhprovodjashhie magnitnye sistemy*. Moscow: Mir. 1976. 3. N.A.Chernoplekov. *Sverhprovodnikovye tehnologii: sovremennoe sostojanie i perspektivy prakticheskogo primenenija*. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2001.No 4, 303 – 319. Print. 5. A.K. Shidlovskij, Ju.N., Shumilov, A.A.Sherba, Zolotarjov V.M. *Vysokovol'tnye polimernye izoljatory*. Kiev: Suchasnist'. 2008.

Поступила (received) 03.07.2014

**Л.А. ШЕБЕНЮК**, канд.техн.наук.,проф., НТУ «ХПІ»  
**Т.Ю. АНТОНЕЦЬ**, аспірант ЗАТ «Завод Південкабель», Харків

### ДО ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 110 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитого поліетиленовою ізоляцією. Показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись і зменшуватись.

**Ключові слова:** високовольтний силовий кабель, зшитий поліетилен, навантажувальна спроможність.

**Постановка проблеми.** Важливою споживчою властивістю силових кабелів є спроможність до перевантаження. Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією характерними особливостями є: більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює особливості при визначенні перевантажувальної спроможності таких кабелів. Динаміка їх нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції, що не дозволяє без перевірки застосовувати відому експоненційну модель нагрівання кабелю впродовж часу  $t$ :  $\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)]$ , де  $\beta$  – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір  $\beta = C \cdot S$ . Необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, але модель для застосування цього методу для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією в нормативній документації відсутня.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1] нами показано, що доцільно, при визначенні перевантажувальної спроможності цих кабелів, порівнювати рішення, одержані за допомогою універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну. Зокрема застосування відомого методу зосереджених теплоємностей [2, 3]. В [1] показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією з великим перерізом струмопровідної жили, різниця між результатами, одержаними за допомогою різних моделей є досить сут-

© Л.А. Шебенюк, Т. Ю. Антоненць. 2014

тєвою для визначення перевантажувальної спроможності кабелю. Додаткові питання виникають щодо кабелів з оболонкою з полівінілхлоридного пластику (ПВХ), призначених для застосування в пожеже-небезпечних умовах, оскільки питомий тепловий опір ПВХ суттєво більший, ніж у поліетилену. Якщо такий кабель призначений для прокладання в ґрунті, то до теплового опору оболонки додається тепловий опір ґрунту навколо кабелю, тепловий опір якого може бути суттєво більшим, ніж у ґрунті, віддаленого від кабелю [4].

Тому для перевірки відповідності результатів розрахунків, виконаних за різними моделями, необхідним є експериментальне визначення критичної точки на кривій нагрівання конкретного кабелю в умовах заданого перевантаження.

**Ціль і задачі дослідження.** В межах застосування методу зосереджених теплоємностей запропонувати розрахункову модель для визначення динаміки нагрівання високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією марки АПвЭВнгд 1×500/95 – 110, прийнятну для визначення його перевантажувальної спроможності. Для цього: 1) виконати експеримент по визначенню критичної точки на кривій нагрівання кабелю в умовах заданого перевантаження; 2) порівняти динаміку нагрівання кабелю, визначену за різними розрахунковими моделями методу зосереджених теплоємностей, з результатами експерименту.

**Основний матеріал дослідження.** За найпростішою моделлю в межах методу зосереджених теплоємностей ізоляцію кабелю представляють у вигляді двох зон із рівними величинами теплового опору  $S_{i11} = S_{i12} = S_{i3}/2$ , але з різними теплоємностями:  $C_{i11} = c_{i3} \cdot \pi \cdot r(R - r)$ ;  $C_{i12} = c_{i3} \cdot \pi \cdot R(R - r)$ , де  $c_{i3}$  – питома об'ємна теплоємність ізоляції. Відповідну схему наведено на рис. 1.

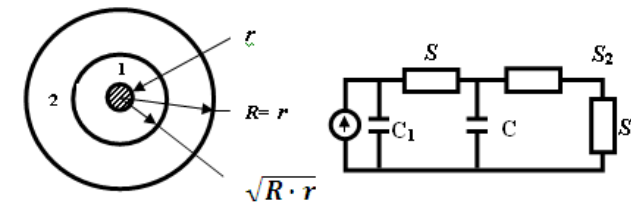


Рис. 1 - Схема моделі нагрівання ізолюваного проводу в повітрі та відповідна схема заміщення

Параметри схеми визначає коефіцієнт  $p$  (коефіцієнт Ван Вормера [3]):  $p = [\ln(R/r)]^{-1} - [(R/r) - 1]^{-1}$ ;  $S_1 = S_{i11}$ ;  $S_2 = S_{i12}$ ;  $C_1 = p C_{i11} + C_{ж}$ ;  $C_2 =$

$(1-p) C_{i31} + C_{i32}$ . Модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-g t}) + S_f \cdot (1 - e^{-f t})], \quad (1)$$

де  $g, f$  – постійні, складові кінетики нагрівання даного кабелю.

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при  $t = 0, \tau = 0$ , перегрів проводу в момент  $t$ : описує (1), де  $g = [M + (M^2 - N)^{0.5}] / N$ ;  $f = [M - (M^2 - N)^{0.5}] / N$ ;

$M = 0,5 [C_1 (S_1 + S_2 + S_d) + C_2 (S_2 + S_d)]$ ;  $N = C_1 S_1 C_2 (S_2 + S_d)$ ;

$S_g = (g - f)^{-1} [C_1^{-1} - f (S_1 + S_2 + S_d)]$ ;  $S_f = (S_1 + S_2 + S_d) - S_g$ ,

де  $P$  – потужність тепловиділення в проводі в кінці коротко-термінового (менше 1 години) режиму нагрівання.

Для кабелів з ПВХ оболонкою з урахуванням і теплового опору оболонки і теплового опору ґрунту навколо кабелю необхідно врахувати наявність двох зон із рівними величинами теплового опору  $S_{o61} = S_{o62} = S_{o6}/2$ , але з різними теплоємностями:  $C_{o61} = c_{o6} \cdot \pi \cdot r_{o6} (R_{o6} - r_{o6})$ ;  $C_{o62} = c_{o6} \cdot \pi \cdot R_{o6} (R_{o6} - r_{o6})$ , де  $c_{o6}$  – питома об'ємна теплоємність оболонки. Відповідну схему наведено на рис.2

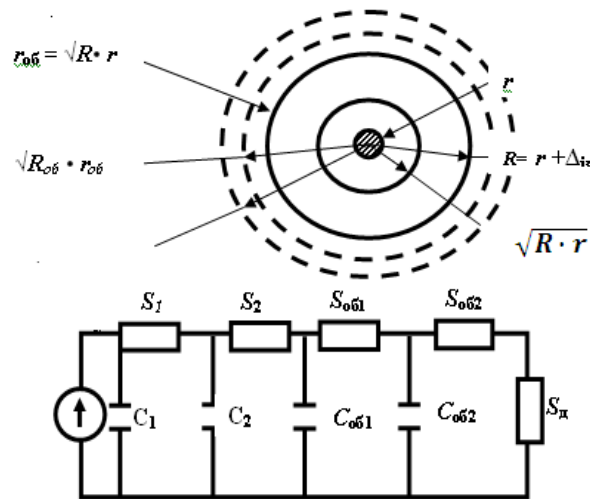


Рис. 2 - Схема моделі нагрівання ізолюваного проводу в оболонці із значним тепловим опором та відповідна схема заміщення (електропровідний екран кабелю не заземлений)

Параметри схеми на рис. 2 визначає коефіцієнт  $p_{o6}$  (коефіцієнт Ван Вормера для оболонки [3]:  $p_{o6} = [2 \ln(R_{o6}/r_{o6})]^{-1} - [(R_{o6}/r_{o6}) - 1]^{-1}$ ).

При включенні під навантаження при температурі навколишнього середовища, тобто при  $t = 0, \tau = 0$ , перегрів в момент  $t$ : описує (1), де

$g = [M + (M^2 - N)^{0.5}] / N$ ;  $f = [M - (M^2 - N)^{0.5}] / N$ ;

$M = 0,5 [C_1 (S_1 + S_2 + S_d) + C_2 (S_2 + S_d)]$ ;  $N = C_1 S_1 C_2 (S_2 + S_d)$ ;

$S_g = (g - f)^{-1} [C_1^{-1} - f (S_1 + S_2 + S_d)]$ ;  $S_f = (S_1 + S_2 + S_d) - S_g$ ,

де  $P$  – потужність тепловиділення в проводі в кінці коротко-термінового (менше 1 години) режиму нагрівання;

$S_1 = S_{i31}$ ;  $S_2 = S_{i32} + S_{o6}$ ;  $C_1 = p C_{i31} + C_{ж}$ ;

$C_2 = (1-p) C_{i31} + C_{i32} + [(C_{o61} + C_{o62}) \cdot p_{o6} + C_e] \cdot (S_{o6}/S_2)^2$ ,

де  $C_e$  – теплоємність електропровідного екрану;

$C_{o61}, C_{o62}, S_{o6}$  – спільні параметри ПВХ – оболонки і зони ґрунту навколо кабелю з підвищеним тепловим опором.

Результати відповідних розрахунків та співставлення їх з результатом експерименту ілюструє рис.3. При розрахунках коефіцієнт теплопередачі в повітря вибрано за рекомендацією міжнародних нормативних документів [4].

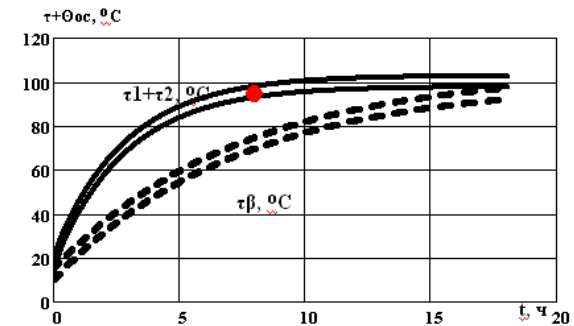


Рис. 3 – Криві нагрівання кабелю АПвЭВнгд 1×500/95 – 110 в умовах підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм, температури оточуючого повітря  $(12,5 \pm 2,5) ^\circ\text{C}$ , струм 910 А: суцільні криві – розрахунок за моделлю (1) та рис. 2;

штрихові криві – розрахунок за експоненційною моделлю нагрівання кабелю впродовж часу  $t$ :  $\tau = \tau_{\max} [1 - \exp(-t/\beta)]$ , де  $\beta$  – постійна нагрівання, струм 910 А; точка – температура через 8 годин

Одержані результати дали підставу використати модель (1) і схему заміщення на рис. 2 для розрахунку гранично допустимого струму та перевантажувальної спроможності кабелю в даних умовах та співставити результати з відповідними даними для номінальних умов.

Номинальний струм кабелю АПвЭВнгд 1× 500/95 – 110 без підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю та за температури оточуючого повітря від  $(12,5 \pm 2,5)$  °С, розрахований за [4] становить від 913 А до 943 А. В тих же умовах та за підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм гранично допустимий струм за [4] становить від 833 А до 860 А. Різниця суттєва і свідчить про те, що для конкретних умов прокладання потужних високовольтних кабелів необхідно враховувати можливість підвищення теплового опору навколо кабелю, наприклад при підсиханні ґрунту при тривалому нагріванні. Це відповідає вимогам нормативних документів [4], хоча там не наведено конкретних рекомендацій щодо методу розрахунку. Модель (1) і схему заміщення на рис. 2 використано для розрахунку гранично допустимого струму за різної товщини ізоляції (див. рис.4).

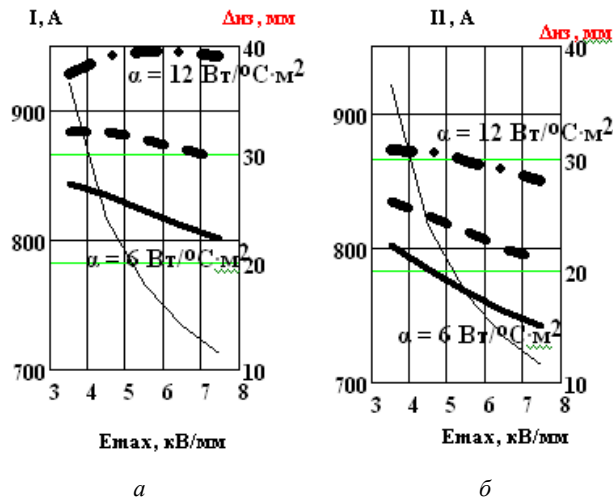


Рис. 4 – Допустимий струм кабелю залежно від максимальної напруженості електричного поля в ізоляції в діапазоні товщини ізоляції від 10 мм (8 кВ/мм) до 30 мм (4 кВ/мм) за різних значень коефіцієнту теплопередачі з поверхні  $\alpha$  в діапазоні від  $6 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$  до  $12 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$  (рекомендовано  $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$  [4]): *a* – в повітрі; *б* – в повітрі за підвищеного теплового опору в зоні навколо кабелю товщиною 5 мм

Дані рис.4 свідчать про те, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись (див. а) при  $\alpha = 12 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ ) і зменшуватись

(див. а) при  $\alpha = 6 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$  і б) при всіх вибраних значеннях  $\alpha$ ). Характер вказаної залежності визначають умови прокладання. Цей, на перший погляд, «неправильний результат» можна пояснити особливістю конструкції високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією. Більша, порівняно із традиційними конструкціями, товщина ізоляції, більші значення площі перерізу струмопровідних жил зумовлюють те, що пропускну спроможність сильніше впливає площа поверхні ізоляції, ніж її товщина. При відносному зменшенні товщини ізоляції зменшується площа її поверхні, яка визначає передачу тепла до захисних елементів конструкції кабелю і, відповідно, відведення тепла з його поверхні. Ці дані свідчать про цілий ряд особливостей відведення тепла в оточуюче середовище для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, які прямо впливають на їх пропускну і відповідно перевантажувальну спроможність.

**Висновки.** 1) Для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі дають практично однакові результати щодо визначення тривало допустимого струму і таким чином діючі нормативні документи є застосовними. 2) Для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідне застосування методу зосереджених теплоємностей, оскільки кінетика нагрівання впродовж перших кількох годин перевантаження суттєво залежить від теплоємності жили і прилеглої до неї ізоляції. 3) Експериментальне дослідження нагрівання цих, інноваційних для вітчизняної кабельної техніки потужних кабелів з метою побудови моделі, яка б враховувала особливості цих кабелів свідчить про те, що для кабелів з ПВХ оболонкою з урахуванням і теплового опору оболонки і підвищеного теплового опору навколо нагрітого кабелю, необхідно застосовувати метод зосереджених теплоємностей і щодо ізоляції, і щодо захисних покривів. 4) Запропоновано і експериментально перевірено розрахункову модель, що враховує наявність двох зон в ізоляції і двох зон в захисних покривах. Зони в цих шарах мають однаковий тепловий опір, але відрізняються геометричними параметрами і теплоємностями. 5) Показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись і зменшуватись і характер вказаної залежності визначають умови прокладання. Ця особливість пояснена особливостями конструкції таких кабелів.

**Список літератури:** 1. Шебенюк Л.А. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. / Л.А. Шебенюк, Т.Ю. Антоненць //



Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип.42.– С. 43 – 46. **2.** Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: [учебн. Пособие для вузов]/ Э.Т. Ларина – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с. 3. Карпушенко В.П. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість./ В.П. Капушенко, Л.А. Щепенюк, О.А. Науменко, Антонеч Ю.О.; Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. **4.** DSTU IEC60287-1-1:2012. КАБЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНІ. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат . Загальні положення..

1. Shhebenjuk L.A. Antonec' T.Ju. Do viznachennja propusknoї spromozhnosti visokovol'tnih silovih kabeliv z plastmasovuju izoljacієju. *Vіstnik NTU «HPI»*. – Kharkiv: NTU «HPI», No. 42. 2011. 43 – 46. Print. **2.** Larina Je.T. *Silovye kabeli i kabel'nye linii*. Moscow.: Jenergoatomizdat. 1984. **3.** Karpushenko V.P. L.A. Shhebenjuk, O.A. Naumenko, Antonec' Ju.O *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugi. Konstrujuvannja, tehnologija, jakist'*. Harkiv: Region-Inform. 2000. **4.** DSTU IEC60287-1-1:2012. KABELI ELEKTRICHNI. Obchislennja nominal'noi sili strumu. Chastina 1 – 1. Spivvidnoshennja dlja obchislennja nominal'noi sili strumu (koefficient navantazhennja 100 %) i obchislennja vtrat . Zagal'ni polozhennja..

*Поступила (received) 14.09.2014*

УДК 621.315

**С.А. ЩЕРБИНА**, асп., НТУ «ХПІ»

## **АПАРАТНО-ЧУТЛИВИ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ ЗШИВКИ РАДІАЦІЙНО-МОДИФІКОВАНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ**

Повний та надійний аналіз ступеню зшивки полімерних матеріалів засновано на використанні сучасного та дорого обладнання з реалізацією відповідної програмної обробки. Виконано аналіз та обґрунтовано можливість застосування апаратно-чутливих методів контролю ступеню зшивки кабелів з двошаровою поліетилен-фторопластовою полімерною ізоляцією. Показано, що найбільш ефективними методами для визначення ступеню радіаційної зшивки є диференціальна скануюча калориметрія та інфрачервона спектроскопія.

**Ключові слова:** радіаційне модифікування, полівініліденфторид, термогравіметричний метод, диференціальна скануюча калориметрія, інфрачервона спектроскопія.ПВДФ

### **Вступ.**

Технологія модифікації структури полімерів за допомогою радіаційного випромінювання широко практикується в промисловості для поліпшення фізичних та хімічних властивостей кінцевої продукції, такої як спеціальні дроти і кабелі, що призначені, наприклад, для фіксованого монтажу бортової електричної мережі авіаційної техніки [1].

Використання авіаційних проводів з ізоляцією на основі тільки одного зшитого поліетилену не відповідає вимогам за пожежебезпеку, радіаційною та тепловою стійкістю [2,3]. В виробництві проводів застосовується захисна оболонка з полівініліденфториду (ПВДФ - PVDF – фторопласт–2М). На відміну від фторопласта - 4 (політетрафторетилену) PVDF переробляється методом екструзії [4]. Після накладання ізоляції та захисної оболонки відбувається радіаційне модифікування (зшивка) проводу в цілому. Поведінка фторопласту – 2М під час випромінювання суттєво залежить від хімічної структури і може варіюватися від ступеня зшивки [4].

Фторопласт 2 М - унікальний полімерний матеріал, що отримується хімічним шляхом. Завдяки вмісту атомів фтору, він відрізняється високою хімічною стійкістю, не розчиняється в багатьох органічних розчинниках і навіть не змінюється при кип'ятінні в "царській горілці" [5]. Характеризується широким діапазоном механічних властивостей, високою діелектричною проникністю, низьким коефіцієнтом тертя і значенням зносу, стійкістю до впливу агресивних середовищ при кім-

© С.А. Щербіна. 2014

натній і підвищеній температурі. Зарубіжними аналогами Ф-2М за властивостями і застосуванням є марки ПВДФ: Kynar, Solef, KF-polymer.

Ступень зшивки оболонки з фторопласту – 2М, як і поліетилену – основної ізоляції авіаційних проводів, може бути визначено за вмістом гель-фракції [6].

Вміст гель-фракції (не розчиненої частини, тобто не зшитої) PVDF визначається шляхом витримки зразків матеріалу, наприклад, в диметіл-ацетоміді протягом 12 – 24 годин.

Полімерні матеріали часто являють собою сополімери, суміші, а їх властивості модифікуються використанням різних добавок або змішанням з такими компонентами, як вогнезахисні добавки, піноутворювачі, лубриканти і стабілізатори, а також радіаційним опроміненням. У цих випадках найпростіші методи ідентифікації не дадуть задовільних результатів. Єдиний шлях до отримання правильних результатів полягає у використанні складних хімічних та термічних методів аналізу.

Ступінь важливості застосування спеціальних кабелів потребує відповідних методів контролю ступеню зшивки [7]. Найбільш актуальними в останній час є так звані апаратно-чутливі методи контролю. Перевага цих методів полягає в тому, що для оцінки ступеню зшивки потрібні навіски полімерів масою всього від 200 до (3 – 5) мг.

**Ціллю статті є** аналіз та обґрунтування застосування апаратно-чутливих термоаналітичних методів, а саме: термогравіметричного аналізу, диференціальної скануючої калориметрії та інфрачервоної спектроскопії, для визначення ступеню зшивки поліетиленової ізоляції та полівініліденфторидної захисної оболонки.

#### **Методи термоаналітичного аналізу.**

Термоаналітичні методи випробувань полімерів широко використовуються лабораторіями, як на підприємствах, так і в науково-дослідних інститутах. За допомогою термічних методів аналізу визначають такі показники полімерних матеріалів як температура початку термічного розкладання, втрата маси при різних температурах, швидкість втрати маси, температури фазових переходів в полімерах, енергію активації та ін. Також можна проводити оцінку впливу різних добавок (стабілізаторів, наповнювачів, пластифікаторів) на структуру та властивості матеріалів.

**Термогравіметричний аналіз (ТГА)** використовується в дослідженні і розробках різних речовин і конструкційних матеріалів, як рідких, так і твердих, для того, щоб отримати інформацію про їх термостійкість і склад [8].

Фізико-хімічні процеси в матеріалах після зшивки часто супроводжуються зміною маси, яке може бути визначено за допомогою термо-

гравіметричного методу, який є стандартним методом аналізу полімерів, заснованим на вимірюванні зміни маси досліджуваного зразка при нагріванні. За допомогою реєстрації в часі температури та втрати маси зразком визначають температуру розкладання і термічну стійкість полімеру, а також роблять висновки про вміст речовин-композитів (наприклад, розм'якшувача, наповнювача). Метод може бути реалізованим в режимі лінійно зростаючої температури або в ізотермічному режимі. Фізичний сенс методу полягає в тому, що в процесі його проведення фіксується втрата маси мікроразка при постійній швидкості його нагріву в кюветі приладу.

У тому випадку, якщо не відбувається зворотних процесів виділення вологи або відщеплення низькомолекулярних сполук у результаті процесів циклізації, температура початку втрати маси зразка характеризує початок розкладання матеріалу. В якості критерію термостабільності полімерів вибирають температури 5, 10 і 50% -ої втрати маси на кривій TG.

**Метод є ефективним в тому випадку, коли зразок виділяє летючі речовини в результаті різних фізичних та хімічних процесів.**

Недоліком методу є також та обставина, що втрата маси, обумовлена відщепленням газоподібних продуктів деструкції, в окремих випадках може компенсуватися збільшенням маси при протіканні процесів окисної деструкції.

Наступним методом є **диференціальна скануюча калориметрія (ДСК)**, який фіксує залежність від температури теплового потоку  $dH/dT$  (Дж/с), необхідного для підтримки однаковими температури зразка і еталону. У більшості випадків при окисленні відбувається виділення теплоти, при термічному руйнуванні - поглинання. За площею піків кривої ДСК можна розрахувати теплові ефекти, що відбуваються в речовині змін, ступінь кристалічності полімерів і температуру скловання, ступінь вулканізації еластомерних матеріалів.

Метод диференціальної скануючої калориметрії є одним з інформативних прийомів дослідження змін в полімерах, пов'язаних з впливом опромінення [9]. Основою методу є фіксування температурної залежності ізобаричної теплоємності досліджуваного зразка завдяки визначенню потужності теплового потоку, компенсуючого виникнення різниці температур на досліджуваному зразку і еталонній речовині, які одночасно піддають дії змінного теплового поля.

Типовий вид термограми поліетилену у формі залежності теплоємності від температури показаний на рис.1. Вона дає можливість визначити температуру ( $T_m$ ) і теплоту плавлення ( $\Delta Q_m$ ), а також темпе-

ратуру ( $T_d$ ) відхилення від лінійності залежності теплоємності, яка може бути віднесена до початку окислювальних або деструкційних процесів в зоні в'язкотекучого стану (рис. 1).

Приклад застосування ДСК для зразків не опромінених та опромінених зразків ізоляції на основі фторопласту-4 наведений в [10]. Незначна зміна між контрольними неопроміненими (позначені як PTFE BOA) і опроміненими зразками спостерігається при температурі 125 °С (рис.2) [10].

Для аналізу сополімерів, визначення складу, структурних характеристик, аналізу модифікуючих добавок: пластифікаторів, антиоксидантів використовується метод інфрачервоної спектроскопії [11].

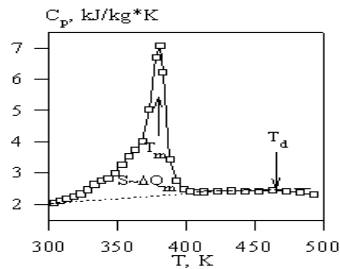


Рис.1 - Типовий вид термограми поліетилену у формі залежності теплоємності від температури

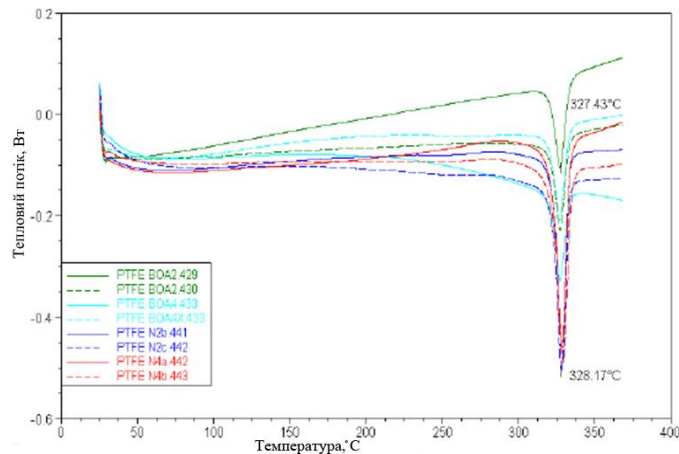


Рис.2 - Порівняльні криві ДСК для фторопластової ізоляції

**Фур'є-перетворення інфрачервоного спектру** в даний час є одним з найбільш широко застосовуваних методів ідентифікації полімерів. Випробування полягають у тому, що потік інфрачервоного випромінювання направляє на зразок, де він частково поглинається, а частково проходить крізь матеріал. Інфрачервоний спектр є таким же індивідуальним відображенням полімеру (див. рис.3,4), як і відбитки пальців. Результати аналізу відображаються в графічній формі на дисплеї. Оскільки ніякі дві індивідуальні структури не дають абсолютно ідентичні спектри, отриманий спектр порівнюється з відомими еталонами для раніше досліджуваних матеріалів, що дозволяє однозначно ідентифікувати аналізований полімер.

**Метод інфрачервоної спектроскопії** засновано на явищі поглинання хімічними речовинами інфрачервоного випромінювання з одночасним збудженням коливань молекул. Цей метод застосовується для оптично-прозорих матеріалів [12]. Матеріали сажонаповнених оболонок кабелів цим методом перевіряти не можна, так як вони непрозорі для інфрачервоних хвиль.

В інфрачервоній області довжин електромагнітних хвиль (від 0,8 до 50 мкм) розташована більшість коливальних і обертальних спектрів молекул. Поглинання ІЧ хвиль має селективний характер і відбувається на тих частотах, які збігаються з власними частотами коливань атомів в молекулах речовини і з частотами обертання молекул як цілого (а у випадку кристалічної речовини - з частотами коливань кристалічної решітки). В результаті інтенсивність ІЧ-випромінювання на цих частотах різко падає - утворюються смуги поглинання (рис. 3, 4, 5).

Інфрачервоне випромінювання представляє собою електромагнітну хвилю і характеризується довжиною хвилі  $\lambda$ , частотою  $\nu$  і хвильовим числом  $\bar{\kappa}$ , які пов'язані наступною залежністю:

$$\bar{\kappa} = \frac{\nu}{\left(\frac{c}{n}\right)} = \frac{1}{\lambda}$$

де  $c$  - швидкість світла, а  $n$  - показник заломлення середовища.

В спектроскопії поглинання, окремим випадком якої є ІЧ-спектроскопія, відбувається поглинання молекулами фотонів певної енергії, яка пов'язана з частотою електромагнітної хвилі через постійну Планка  $h$ :

$$E_p = h \cdot \nu.$$

Швидка інфрачервона спектроскопія в ближній області спектру - в діапазоні довжин хвиль від 800 до 200  $\text{см}^{-1}$  - стала особливо популярною останнім часом. Макромолекули поглинають радіацію різним чином, що в підсумку дає унікальний спектр. Це дозволяє ідентифікувати досліджуваний полімер та визначити ступінь зшивки.

Для поліетилену зазвичай визначають ступінь окислення поліетиле-ну по смузі 1720  $\text{см}^{-1}$ , яка відповідає концентрації карбонільних груп [13].

Із зростанням поглиненої дози оптична густина поліетилену зростає (рис.3).

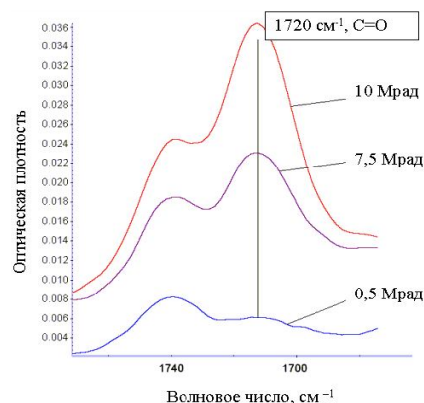


Рис.3 - Зростання оптичної густини смуги 1720  $\text{см}^{-1}$  в опромінену поліетилені зі збільшенням поглиненої дози

На рисунках 4, 5 представлено інфрачервоні спектри політетрафторетилену та полівініліденфториду відповідно.

Технологія вимірювання спектру в ближній інфрачервоній області являє собою недорогий високошвидкісний метод, який став альтернативним методом Фур'є - інфрачервоної спектроскопії.

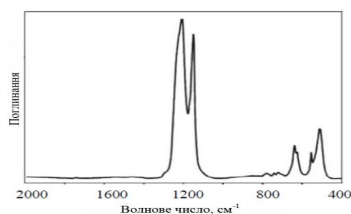


Рис.4 - ІЧ спектр поглинання промислового політетрафторетилену



Рис.5 - ІЧ спектр поглинання плівки полівініліденфториду

### Висновки.

Таким чином, повний і надійний аналіз ступеню зшивки полімерних матеріалів - складна і комплексна задача, що потребує тривалого часу і заснована на використанні сучасного та дорого обладнання з реалізацією відповідної програмної обробки результатів вимірювань.

1. Термогравіметричний метод аналізу ступеню зшивки поліолефінової поліетиленової ізоляції та полівініліденфторидної захисної оболонки не може бути ефективним для визначення ступеню зшивки. Причина полягає в тому, що маса матеріалів мало змінюється в процесі радіаційної зшивки.

2. Метод диференційної скануючої калориметрії може бути застосованим для визначення ступеню зшивки як поліетилену, так і фторопласту -2М. Аналіз отриманої температурної залежності теплоємності дозволяє оцінити параметри релаксаційних та фазових переходів, характерних для прояву молекулярної (сегментальної) рухливості в аморфній та кристалічній фазах відповідно. Виникнення структурних змін в полімерній матриці, які пов'язані з впливом радіаційного опромінення, проявляються в зміщенні температурних положень релаксаційних та фазових переходів.

3. Ефективним методом визначення ступеню радіаційної зшивки поліетилену та полівініліденфториду є швидка інфрачервона спектроскопія. Особливістю радіаційного модифікування структури застосованих полімерів є те, що відсутні низькомолекулярні речовини зшивки, які притаманні для хімічної зшивки. Так, наявність ацетофенону призводить до поглинання ІЧ-променів в області 1720  $\text{см}^{-1}$ . Ця смуга відповідає також концентрації карбонільних груп, вміст яких визначає ступінь зшивки.

**Список літератури:** 1. Щербина С.А. Особенности радиационного модифицирования фторсодержащих полимеров // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетика: надежность и эффективность. - Харьков: НТУ «ХПИ». -2012. - Вып.43, - С.35 - 40. 2. Щербина С.А. Обос-

нование коэффициента радиационного облучения защитной оболочки на основе фторопласта -2М по результатам механических испытаний// Вестник НТУ «ХПИ». Энергетика: надежность и эффективность. – Харьков: НТУ «ХПИ». –2013. – Вып.59, – С.181 – 187. **3. Беспрозванных А.В.** Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения / *А.В.Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.В. Морозова* // Электротехника и электромеханика. – Харьков. – 2006. – № 3. – с. 82 – 86. **4. Финкель Э.Э.** Кабели и провода для энергетических установок/ *Э.Э. Финкель*. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136с. **5. Пешков И.Б.** Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / *И.Б.Пешков*. – М.: Машиностроение, 2011. – 367с. **6. Щербина С.А.** Визначення ступеню зшивки захисної оболонки авіаційних проводів. – Тези доповідей ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції. – НТУ «ХПИ». – Х., ч.ІІ, С.267. **7. Дикерман Д.Н.** Провода и кабели с фторопластовой изоляцией / *Д.Н.Дикерман, В.С.Кунегин*. – М.: Энергоиздат/ – 1982. – 145 с. **8. Альмяшев В.И., Гусаров В.В.** Термические методы анализа //Учебное пособие. – СПб. – 1999. – с.40. **9. Берштейн В.А., Егоров В.М.** Дифференциальная сканирующая калориметрия в физико-химии полимеров. – Л.: Химия. – 1990. – 256 с. **10. R. Omar, L. Mireles, E. Eugene Shin, C. Bowman, L. Vasudevan.** Mixed Neutron and Gamma-Ray Testing of Stirling-Alternator Candidate Organic Materials // Joint Propulsion Conference & Exhibit 25 – Nashville. – 2010, – 11 p. **11. Дж. Бранд. Г. Эджинтон.** Применение спектроскопии в органической химии. – М.: Мир, 1967. – с. 34 – 50. **12. M.R Cleland.** High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing. of Polymers // Hanser Publishers, Munich and Oxford University Press. – New York. – 1992 – 23 p. **13.** Мониторинг технического состояния и оценка остаточного срока службы силовых кабелей среднего и низкого напряжения с полиэтиленовой изоляцией. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2000. – 24 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shherbina S.A. Osobennosti radiacionnogo modificirovaniya ftorsoderzhashhih polimerov. *Vestnik NTU «HPI». Jenergetika: nadezhnost' i jeffektivnost'*. No.43. 2012. 35 – 40. Print **2.** Shherbina S.A. Obosnovanie kojeficienta radiacionnogo oblucheniya zashhitnoj obolochki na osnove ftoroplasta -2M po rezul'tatam mehanicheskikh ispytaniy *Vestnik NTU «HPI». Jenergetika: nadezhnost' i jeffektivnost'*. No.59. 2013. 181 – 187. Print. **3.** Besprozvannyh A.V. B.G. Naboka E.V. Morozova Radiacionnaja stojkost' kabelej obshhepromyshlennogo naznacheniya *Jelektrotehnika i jelektromehaniika*. No 3. 2006. 82 – 86. Print **4.** Finkel' Je.Je. *Kabeli i provoda dlja jenergeticheskikh ustanovok*. Moscow Jenergoatomizdat, 1983. **5.** Peshkov I.B. *Tehnologija proizvodstva kabelej i provodov s primeneniem plastmass i rezin* Moscow: Mashinostroenie, 2011. **7.** Dikerman D.N. V.S.Kunegin *Provoda i kabeli s ftoroplastovoj izoljaciej*. Moscow: Jenergoizdat 1982. **8.** Al'mjashev V.I., Gusarov V.V. *Termicheskie metody analiza* SPb. – 1999. **9.** Bershtejn V.A., Egorov V.M. *Differencial'naja skanirujushhaja kalorimetrija v fiziko-himii polimerov*. – Leningrad: Himija. – 1990. **10.** R. Omar, L. Mireles, E. Eugene Shin, S. Bowman, L. Vasudevan. Mixed Neutron and Gamma-Ray Testing of Stirling-Alternator Candidate Organic Materials // Joint Propulsion Conference & Exhibit 25 – Nashville. – 2010, – 11 p. **11.** Dzh. Brand. G. Jeglinton. *Primenenenie spektroskopii v organicheskogo himii*. Moscow: Mir, 1967. **13.** *Monitoring tehniceskogo sostojanija i ocenka ostatocznego sroka sluzhby silovyh kabelej srednego i nizkogo napriazhenija s polijetilenoj izoljaciej*. – Mocow: ROSJeNERGOATOM. 2000.

Надійшла (received) 21.11.2014

## РЕФЕРАТИ

УДК 621.35.035; 621.365.2

**Пути повышения энергоэффективности мощных электропечных установок / С. Ф. Артюх, А. Л. Кухарев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 11 – 21. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2224-0349

На підставі аналізу сучасного стану технологічних та конструктивних особливостей потужних дугових сталетопних та руднотермічних печей визначені найбільш перспективні напрямки щодо удосконалення їх систем електроживлення та засобів автоматизації, намічені актуальні задачі досліджень.

**Ключові слова:** дугові сталетопні печі, руднотермічні печі, система електроживлення.

УДК 621.316.9

**Повышение технических характеристик искробезопасного светодиодного освещения / І.А. Бершадський** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 22 – 32. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2224-0349.

У статті наведено аналіз системи вибухозахищеного освітлення для ділянки шахтної виробки довжиною 100 м, науково обґрунтовано визначення параметрів іскробезпечного блоку живлення, кількості та потужності світлодіодних світильників, робочої напруги, допустимої тривалості існування іскрового розряду, перерізу і довжини живильного кабелю з урахуванням максимуму енергії іскрового розряду в електричному колі і обмежень щодо втрат напруги на ділянці заданої довжини. Запропоновано вибирати максимальну потужність світлодіодних світильників, ґрунтуючись на захисній функції динамічного іскрозахисту з обмеження тривалості та енергії розряду, в результаті чого струм в робочому або аварійному режимі не може перевищуватися за умовами вибухозахисту.

**Ключові слова:** іскробезпека, світлодіодний світильник, блок живлення, енергія розряду, лінія, яка живить, напруга.

УДК 621.311

**Цифровая подстанция как локальный уровень автоматизированной системы коммерческого учета электрической энергии / Васильченко В.І., Гриб О.Г., Лелека О.В., Гапон Д.А., Саприка О.В., Іерусалімова Т.С.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 33 – 37. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349

Розглянута цифрова підстанція як локальний рівень автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії. Автоматизована система комерційного обліку електричної енергії на цифровій підстанції енергопостачальних підприємств можна прийняти як отримання достовірного балан-

су електроенергії. Робота енергетичної галузі в умовах функціонування енергоринку висуває підвищені вимоги до системи обліку, а саме, до рівня її автоматизації, точності, надійності і цілісності. Впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії на цифровій підстанції, дозволяє перейти до тарифів реального часу, отримання достовірного балансу виробництва, розподілу і споживання електричної потужності або енергії та оцінка показників якості електричної енергії.

**Ключові слова:** електроенергія, підстанція, потужність, вимірювання, лічильник, контроль, автоматизація

УДК 621.311

**Метрологическое обеспечение средств учета и качества электрической энергии / Васильченко В.І., Тесик Ю.Ф., Гриб О.Г., Саприка О.В., Іерусалімова Т.С.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 38 – 44. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2224-0349

Вирішення проблеми метрологічного забезпечення засобів комерційного обліку та якості електричної енергії є необхідним при побудові та експлуатації автоматизованих систем. Значна кількість технічних засобів обліку вимагає обов'язкової повірки для того щоб вони не виходили з класу точності. Сучасний стан електроенергетичної галузі ставить перед усіма учасниками оптового ринку України необхідність забезпечення кількісних і якісних показників основного товару - електричної енергії. Успішне вирішення цього завдання спрямоване на забезпечення безвідмовної експлуатації електротехнічного обладнання, приладів, складної побутової техніки, безаварійне протікання технологічних процесів у споживачів, а також сприяти процесу енергозбереження.

**Ключові слова:** метрологія, якість, електроенергія, контроль, облік, повірка, похибка, лічильник, аналізатор

УДК 621.311

**Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии / Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Белов Н.С., Гапон Д.А., Іерусалімова Т.С.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 45 – 50. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Проведено дослідження автоматизованої системи контролю рівня перенапруг та якості електричної енергії. В даний час актуальною проблемою є безперервний контроль перенапруг і якості електричної енергії. Це обумовлено тим, що при низькій якості електричної енергії термін служби обмежувачів перенапруги знижується. Постійний моніторинг дозволить прогнозувати вихід з ладу обмежувачів перенапруг. Рішення проблеми оптимізації виробництва, постачання та споживання електричної енергії можливе тільки при удосконаленні системи обліку. Цілями впровадження автоматизованої системи обліку електроенергії є перехід до тарифів реального часу, отримання достовірного

балансу виробництва і розподілу і споживання електричної потужності або енергії, а також оцінка показників якості електричної енергії.

**Ключові слова:** система, перенапруження, контроль, якість, електроенергія, обмежувач.

УДК 621.315.2

**Анализ внутренних и внешних помех при диагностике кабелей по характеристикам частичных разрядов / А.Г. Кессаев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 51 – 60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349

На основі проведених вимірювань рівня часткових розрядів в силових кабельних лініях виконаний аналіз впливу внутрішніх і зовнішніх перешкод на отримані результати. Показано, що врахування особливостей освітлення лабораторії, ступеня її екранування, а також якості заземлення вимірювальної апаратури призводить до підвищення точності визначення ЧР.

**Ключові слова:** часткові розряди, екранування, робоче освітлення, заземлення.

УДК 621.315

**Пути оптимизации внутреннего электрического поля проходных полимерных изоляторов / Ким Ен Дар, Д. Г. Карюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 61 – 69. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Основною причиною виходу зі строю прохідних ізоляторів з полімерною ізоляцією класу 35 кВ є електричне старіння, обумовлене високим електричним полем. На основі результатів аналітичного дослідження і чисельних рішень рівняння Лапласа для комплексної провідності обґрунтовано рекомендації щодо вирівнювання електричного поля ізолятора. Сформульовано оптимальні співвідношення основних параметрів конструкції ізолятора з урахуванням характеристик застосовуваних діелектричних матеріалів. Приведена кількісна оцінка крайового ефекту заземленого фланця, дано практично реалізовані шляхи зниження такого ефекту: збільшення радіуса заокруглення країв фланця та нанесення слабопровідного покриття на обмеженій ділянці зовнішньої поверхні опорної труби.

**Ключові слова:** прохідний високовольний ізолятор, полімерна ізоляція,

УДК 621.316

**Тепловая защита при частых пусках асинхронных электродвигателей на основе использования их обмоток в качестве датчиков температуры / О.С. Кобозев, І.І. Смілянський, А.В. Заратуйко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 70 – 77. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349

В статті розглянута можливість побудови системи захисту від перевантаження асинхронних двигунів (АД), що працюють в повторно-короткочасно-

му режимі , на основі використання їх власних обмоток в якості термодатчиків. Для цього запропоновано при кожному пуску , до початку розвороту , вимірювати сумарну миттєву потужність трьох фаз двигуна . Показано , що аналіз співвідношення максимуму і мінімуму миттєвої трьохфазної потужності в початковий момент пуску, дозволяє отримати однозначну інформацію про зміну активного опору обмоток , обумовленого нагрівання , і визначити температуру перегріву двигуна

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, тепловий захист, контроль температури.

УДК 621.311

**Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ для повышения КПД в летний период / Лазуренко А.П., Кругол Н.М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», – 2013. - № . – С. 78 – 82 – № 56 (1098). – С. 78 – 82. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

Використання групового регулювання механізмами власних потреб ТЕЦ дає значну економію електроенергії, що збільшує корисний відпуск електроенергії в енергосистему. Даний метод застосовується до відцентрових машин з близькими режимами зміни продуктивності. Також цей спосіб може бути використаний на блочних ТЕС.

**Ключові слова:** ТЕЦ, власні потреби, перетворювач частоти, відцентрові машини напруженість поля, крайовий ефект

УДК 621.311

**Определение объема рабочего бака электрического водонагревателя емкостного типа / О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 83 – 90 . – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349**

В статті виконаний розрахунок щодо визначення об'єму робочого баку електричного водонагрівача ємнісного типу в умовах, коли включення установки відбувається один раз на добу у зоні «провалу» споживання енергосистеми та при цьому забезпечується добова потреба у гарячій воді споживачів.

**Ключові слова:** електричний водонагрівач, споживач-регулятор, вибірка, середньоквадратичне відхилення, дисперсія, довірча вірогідність, похибка, довірчий інтервал.

УДК 621.315

**Повышение электрической прочности коллектора МПТ (Часть 2) / С.Г. Ломов // // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 91 – 97. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

Експериментально перевірена можливість збільшення електричної сили колектора машин постійного струму за рахунок застосування покриття поверхні обмотки.

ностном слое межламельной изоляции композиционного диэлектрического материала с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости.

**Ключевые слова:** изоляция, коллектор машин постоянного тока.

УДК 644.11

**Сравнительный анализ энергоэффективных решений по энергоснабжению медицинского комплекса / Л.И. Лысенко, Д.А. Логачева, А.И. Рудь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 98 – 105. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

У статті розглянуто декілька концептуальних проектів систем енергопостачання лікувального корпусу медичного комплексу з використанням сучасних енергоефективних технологій, які спрямовані на збереження традиційних первинних енергоресурсів. Проведено порівняльний аналіз цих проектів з точки зору економічної ефективності їх впровадження.

**Ключові слова:** медичний комплекс, енергопостачання, нетрадиційні джерела енергії, енергозбереження, порівняльний аналіз, економічна ефективність.

УДК 621.625.032

**Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе машины постоянного тока для испытаний двигателей внутреннего сгорания / Г.И. Мельников, А.О. Коротков, А.В. Семиков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 106 – 117 . – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

У даній роботі розглядається випробувальна установка навантаження двигунів внутрішнього згоряння, побудована на базі машини постійного струму і автономного інвертора напруги, що забезпечує передачу енергії в електромережу. Виконано синтез системи управління машини постійного струму і автономного інвертора напруги, що дозволяє управляти моментом навантаження ДВС незалежно від швидкості вала і реактивної потужності мережі. Побудовано комп'ютерну модель всієї системи. Проведено комп'ютерне моделювання випробувань ДВС в режимах, як підтримці постійного моменту, так і швидкості. Отримано енергетичні показники стенда випробувань ДВС.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згоряння, випробувальний стенд, автономний інвертор напруги, машина постійного струму.

УДК 621.316.933

**К расчету вероятности перекрытия линейной изоляции по кривой вероятности опасных параметров для случая удара молнии в опору / И. В. Нижевский, В. И. Нижевский, С.К. Березка, О. Н. Хазаров // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 118 – 124 . – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Приведены результаты анализа и расчета вероятности перекрытия изоляции на опоре линии электропередачи напряжением 500 кВ. Показана необходимость при расчете вероятности использовать видоизмененную кривую вероятности опасных параметров.

**Ключевые слова:** анализ, расчет, вероятность, перекрытие изоляции, кривая вероятности опасных параметров

УДК 551.594.221

**Оценка защищенности поверхности грунта в районе расположения стержневого молниеотвода / А. А. Иетков, Н. В. Федорова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 125 – 130. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349**

В статье получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта. Сравнение параметров зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и материалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов расчета.

**Ключевые слова:** разряд молнии, вероятность поражения, плотность распределения, поверхность грунта

УДК 621.315

**Механизм разрушения плёночной изоляции при криогенных температурах / Э. Д. Шумилова, Ю.Н. Шумилов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 131 – 137. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349**

Работа посвящена вивченню електричної міцності і закономірностям руйнування багатшарової полімерної плівкової ізоляції МПІ в середовищі криогенних рідин при напруженості електричного поля близьких до робочих. Показано, що основним руйнівним фактором МПІ є часткові розряди ЧР в порожнинах, заповнених криогенною рідиною. Вплив ЧР в залежності від матеріалу призводить до розтріскування плівок, або до утворення на їх поверхні науглероженних слідів. Дано рекомендації по вибору МПІ для криогенних пристроїв.

**Ключові слова:** багатшарова полімерна плівкова ізоляція, криогенні рідини, електрична міцність, часткові розряди, руйнування плівкової ізоляції.

УДК 621.315.2

**К определению нагрузочной способности высоковольтных силовых кабелей с пластмассовой изоляцией / Л. А. Щебенюк, Т. Ю. Антоненц // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 138 – 144 . – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Виконано аналіз результатів розрахунку пропускної спроможності силових кабелів на напругу 110 кВ. Робота присвячена створенню системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із зшитю поліетиленовою ізоляцією. Показано, що для високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією із зменшенням товщини ізоляції (відповідно зменшується тепловий опір ізоляції) пропускна спроможність кабелю може збільшуватись і зменшуватись.

**Ключові слова:** радіаційне модифікування, полівініліденфторид, термогравіметричний метод, диференціальна скануюча калориметрія, інфрачервона спектроскопія.ПВДФ

УДК 621.315

**Аппаратно-чувствительные методы контроля степени сшивки радиационно-модифицированной полимерной изоляции кабелей / С.А. Щербина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 145 – 152 . – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2224-0349.**

Виконано аналіз та обґрунтовано можливість застосування апаратно-чутливих методів контролю ступеню зшивки кабелів з двощаровою поліетилен-фторопластовою полімерною ізоляцією. Показано, що найбільш ефективними методами для визначення ступеню радіаційної зшивки є диференціальна скануюча калориметрія та інфрачервона спектроскопія.

**Ключові слова:** радіаційне модифікування, полівініліденфторид, термогравіметричний метод, диференціальна скануюча калориметрія, інфрачервона спектроскопія.ПВДФ



## РЕФЕРАТЫ

УДК 621.35.035; 621.365.2

**Пути повышения энергоэффективности мощных электропечных установок / С. Ф. Артюх, А. Л. Кухарев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 11 – 21. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2224-0349**

На основе анализа современного состояния технологических и конструктивных особенностей мощных дуговых сталеплавильных и руднотермических печей выделены наиболее перспективные направления по совершенствованию их систем электропитания и средств автоматизации, намечены актуальные задачи исследований. Намечены основные мероприятия для повышения пропускной способности и снижения потерь в СЭП, основанные на применении источников напряжения пониженной частоты, а также на совершенствовании электрооборудования компенсации реактивной мощности

**Ключевые слова:** дуговые сталетопные печи, система электропотребления.

УДК 621.316.9

**Повышение технических характеристик искробезопасного светодиодного освещения / И.А. Бершадский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 22 – 32. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2224-0349.**

В статье проведен анализ системы взрывозащищенного освещения для участка шахтной выработки длиной 100 м, научно обосновано определение параметров искробезопасного блока питания, количества и мощности светодиодных светильников, рабочего напряжения, допустимой длительности существования искрового разряда, сечения и длины питающего кабеля с учетом максимума энергии искрового разряда в электрической цепи и ограничений по потерям напряжения на участке заданной длины. Предложено выбирать максимальную мощность светодиодных светильников, основываясь на защитной функции динамической искрозащиты по ограничению длительности и энергии разряда, в результате чего ток в рабочем или аварийном режиме не может превышать по условиям взрывобезопасности.

**Ключевые слова:** искробезопасность, светодиодный светильник, блок питания, энергия разряда, питающая линия, напряжение

УДК 621.311

**Цифровая подстанция как локальный уровень автоматизированной системы коммерческого учета электрической энергии // Васильченко В.И., Гриб О.Г., Лелека А.В., Гапон Д.А., Сапрыка А.В., Иерусалимова Т.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 11 – 21. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2224-0349**

Рассмотрена цифровая подстанция как локальный уровень автоматизированной системы коммерческого учета электрической энергии. Автоматизированная система коммерческого учета электрической энергии на цифровой подстанции энерго - снабжающих предприятий можно принять как получение достоверного баланса электроэнергии. Работа энергетической отрасли в условиях функционирования энергорынка выдвигает повышенные требования к системе учета, а именно, до уровня ее автоматизации, точности, надежности и целостности. Внедрение автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии на цифровой подстанции, позволяет переход к тарифам реального времени, получения достоверного баланса производства, распределения и потребления электрической мощности или энергии и оценка показателей качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** электроэнергия, подстанция, мощность, измерения, счетчик, контроль, автоматизация

УДК 621.311

**Метрологическое обеспечение средств учета и качества электрической энергии / Васильченко В.И., Тесик Ю.Ф., Гриб О.Г., Сапрыка О.В., Иерусалимова Т.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 38 – 44. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2224-0349**

Решение проблемы метрологического обеспечения средств коммерческого учета и качества электрической энергии является необходимым при построении и эксплуатации автоматизированных систем. Значительное количество технических средств учета требует обязательной поверки для того чтобы они не выходили из класса точности. Современное состояние электроэнергетической отрасли ставит перед всеми участниками оптового рынка Украины необходимость обеспечения количественных и качественных показателей основного товара - электрической энергии. Успешное решение этой задачи направлено на обеспечение безотказной эксплуатации электротехнического оборудования, приборов, сложной бытовой техники, безаварийное протекания технологических процессов у потребителей, а также способствовать процессу энергосбережения.

**Ключевые слова:** метрология, качество, электроэнергия, контроль, учет, поверка, погрешность, счетчик, анализатор.

УДК 621.311

**Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии / Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Белов Н.С., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С. // // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 33 – 37. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

Проведено дослідження автоматизованої системи контролю рівня перенапружень і якості електричної енергії. В нинішнє час актуальною проблемою є неперервний контроль перенапружень і якості електричної енергії. Це обумовлено тим, що при низькій якості електричної енергії термін служби обмежувачів перенапруження зменшується. Постійний моніторинг дозволить прогнозувати вихід із строя обмежувачів перенапружень. Розв'язання проблеми оптимізації виробництва, постачання і споживання електричної енергії можливо тільки при удосконаленні системи обліку. Цілями впровадження автоматизованої системи обліку електроенергії є перехід до тарифів реального часу, отримання достовірного балансу виробництва, розподілу і споживання електричної потужності або енергії, а також оцінка показників якості електричної енергії.

**Ключові слова:** система, перенапруження, контроль, якість, електроенергія, обмежувач.

УДК 621.315.2

**Аналіз внутрішніх і зовнішніх поємок при діагностиці кабелів по характеристикам частинних розрядів / А.Г. Кессаєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 51 – 60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349**

На основі проведених вимірювань рівня частинних розрядів в силових кабельних лініях виконано аналіз впливу внутрішніх і зовнішніх поємок на отримані результати. Показано, що врахування особливостей освітлення лабораторії, ступінь її екранованості, а також якості заземлення вимірної апаратури призводить до підвищення точності визначення ЧР.

**Ключові слова:** частинні розряди, екранування, робоче освітлення, заземлення.

УДК 621.315

**Пути оптимізації внутрішнього електричного поля проходних полімерних ізоляторів / Кім Єн Дар, Д. Г. Карюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 61 – 69. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.**

Основною причиною виходу со строя проходних ізоляторів з полімерною ізоляцією класу 35 кВ є електричне старіння, обумовлене високим електричним полем. На основі результатів аналітичного дослідження і чисельних рішень рівня Лапласа для комплексної провідності об'єктовано рекомендації по вирівнюванню електричного поля ізолятора. Сфор-

мульовано оптимальні співвідношення основних параметрів конструкції ізолятора з урахуванням характеристик застосовуваних діелектричних матеріалів. Приведено кількісну оцінку крайового ефекту заземленого фланця, дані практичного реалізуємого шляху зменшення такого ефекту: збільшення радіуса закруглення крайового фланця і нанесення слабопровідного покриття на обмеженому ділянці зовнішньої поверхні опорної труби.

**Ключові слова:** проходний високовольтний ізолятор, полімерна ізоляція, напруженість електричного поля, крайовий ефект

УДК 621.316

**Теплова захист при частих пусках асинхронних електродвигателів на основі використання їх обмоток як датчиків температури / О.С. Кобозєв, І.І. Смілянський, А.В. Заратуйко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 70 – 77. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

В статті розглянуто можливість побудови системи захисту від перевантаження асинхронних двигателів (АД), що працюють в повторно-кратковременному режимі, на основі використання як датчиків їх власних обмоток. Для цього запропоновано при кожному пуску, до початку розвороту, вимірювати сумарну миттєву потужність трьох фаз двигателя. Показано, що аналіз співвідношення максимуму і мінімуму миттєвої трьохфазної потужності в початковий момент пуску, дозволяє отримати однозначну інформацію про зміні активного опору обмоток, обумовленого нагрівом, і визначити температуру перегріву двигателя.

**Ключові слова:** асинхронний двигатель, теплова захист, контроль температури, миттєва трьохфазна потужність.

УДК 621.311

**Використання групового регулювання механізмів власних потреб ТЕС для підвищення ККД в літній період / Лазуренко А.П., Кругол Н.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - № . – С. 78 – 82 – № 56 (1098). – С. 78 – 82. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Використання групового регулювання механізмів власних потреб ТЕС дає значительну економію електроенергії, що збільшує корисний відпуск електроенергії в енергосистему. Даний метод застосовуємо до центробежних механізмів з близькими режимами зміни продуктивності. Також цей спосіб може бути використаний на блочних КЭС.

**Ключові слова:** ТЭС, власні потреби, преобразователь частоти, центробежні машини

УДК 621.311

**Визначення об'єму робочого бака електричного водонагрівача ємностного типу / О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина // Вісник НТУ «ХПІ».**

Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 83 – 90. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349

В статті виконані розрахунки визначення об'єму робочого бака електричного водонагрівача ємностного типу в умовах, коли включення установок відбувається один раз в сутки в зоні «провала» потреби енергосистеми і при цьому забезпечується суточна потреба в гарячій воді споживачів.

**Ключевые слова:** електричний водонагрівач, регулятор, виборка, середньоквадратичне відхилення, дисперсія, помилка, довірительний інтервал.

УДК 621.315

**Повищення електричної міцності колектора МПТ (Частина 2) / С.Г. Ломов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 91 – 97. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

Експериментально перевірено можливість збільшення електричної міцності колектора машин постійного струму за рахунок застосування в поверхневому шарі міжшарової ізоляції композиційного діелектричного матеріалу з суттєво різними значеннями діелектричної проникності.

**Ключевые слова:** ізоляція, колектор машин постійного струму.

УДК 644.11

**Сравнительный анализ энергоэффективных решений по энергоснабжению медицинского комплекса / Л.И. Лысенко, Д.А. Логачева, А.И. Рудь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 98 – 105. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

В статті розглядаються декілька концептуальних проектів систем енергопостачання лікувального корпусу медичного комплексу, в яких застосовуються енергозберігаючі технології, спрямовані на економію традиційних первинних енергоресурсів. Проведено порівняльний аналіз цих проектів з точки зору економічної ефективності їх впровадження.

**Ключевые слова:** медичний комплекс, енергопостачання, нетрадиційні джерела енергії, енергозбереження, порівняльний аналіз, економічна ефективність.

УДК 621.625.032

**Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе машины постоянного тока для испытаний двигателей внутреннего сгорания / Г.И. Мельников, А.О. Коротков, А.В. Семиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 106 – 117. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть. Выполнен синтез системы управления машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, позволяющей управлять моментом нагрузки ДВС независимо от скорости вала и реактивной мощности сети. Построена компьютерная модель всей системы. Проведено компьютерное моделирование испытаний ДВС в режимах, как поддержания постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, автономный инвертор напряжения, машина постоянного тока.

УДК 621.316.933

**К расчету вероятности перекрытия линейной изоляции по кривой вероятности опасных параметров для случая удара молнии в опору / И. В. Нижевский, В. И. Нижевский, С.К. Березка, О. Н. Хазаров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 118 – 124. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Приведены результаты анализа и расчета вероятности перекрытия изоляции на опоре линии электропередачи напряжением 500 кВ. Показана необходимость при расчете вероятности использовать видоизмененную кривую вероятности опасных параметров.

**Ключевые слова:** анализ, расчет, вероятность, перекрытие изоляции, кривая вероятности опасных параметров

УДК 551.594.221

**Оценка защищенности поверхности грунта в районе расположения стержневого молниеотвода / А. А. Иетков, Н. В. Федорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 56 (1098). – С. 125 – 130. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349**

В статье получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта. Сравнение параметров зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и материалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов расчета.

**Ключевые слова:** разряд молнии, вероятность поражения, плотность распределения, поверхность грунта

УДК 621.315

**Механизм разрушения пленочной изоляции при криогенных температурах / Э. Д. Шумилова, Ю.Н. Шумилов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Ене-**

ретика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 131 – 137. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349

Работа посвящена изучению электрической прочности и закономерностям разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в среде криогенных жидкостей при напряжённости электрического поля близких к рабочим. Показано, что основным разрушающим фактором МПИ являются частичные разряды ЧР в полостях, заполненных криогенной жидкостью. Воздействие ЧР в зависимости от материала приводит к растрескиванию плёнок, либо к образованию на поверхности науглероженных проводящих побегов. Даны рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств.

**Ключевые слова:** многослойная полимерная плёночная изоляция, криогенные жидкости, электрическая прочность, частичные разряды, разрушение плёночной изоляции.

УДК 621.315.2

**К определению нагрузочной способности высоковольтных силовых кабелей с пластмассовой изоляцией / Л. А. Щепенюк, Т. Ю. Антоненя // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 138 – 144. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 110 кВ. Работа посвящена созданию системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией. Показано, что для высоковольтных кабелей с пластмассовой изоляцией при уменьшении толщины изоляции (соответственно уменьшается тепловое сопротивление изоляции) пропускная способность кабеля может уменьшаться.

**Ключевые слова:** высоковольтный силовой кабель, сшитый полиэтилен, пропускная способность.

УДК 621.315

**Аппаратно-чувствительные методы контроля степени сшивки радиационно-модифицированной полимерной изоляции кабелей / Щербина С.А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 145 – 152. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2224-0349.**

Выполнен анализ и обоснована возможность применения аппаратно-чувствительных методов контроля степени сшивки кабелей с двухслойной полиэтилен-фторопластовой полимерной изоляцией. Показано, что наиболее эффективными методами для определения степени радиационной сшивки является дифференциальная сканирующая калориметрия и инфракрасная спектроскопия. Рис.: 5. Библиогр.: 14 названий.

**Ключевые слова:** радиационное модифицирование, поливинилденфторид, термогравиметрический метод, дифференциальная сканирующая калориметрия, инфракрасная спектроскопия.

## ABSTRACTS

**Improvements in the quality of technical solutions of intrinsically safe LED lighting / I. A. Bershadsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 22 – 32. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2224-0349.**

The article analyzes the explosion-proof lighting system for the section 100 m long, scientifically based definition of the parameters of the intrinsically safe power supply, the number and power of LED lamps, the operating voltage, the permissible duration of the existence of the spark discharge, cross-section and length of the supply cable with the maximum energy of the spark discharge and circuit limitation voltage losses at the section of a given length. It has been proposed to select a maximum power of LED lights based on the protective function of the dynamic type of protection to limit the duration and energy of the discharge, resulting in a current in the power-up or emergency mode may not be exceeded under the terms of explosion protection.

**Keywords:** intrinsically safe, LED lamp, power supply, discharge energy, the flow, the voltage

**Digital substation as the local level of the automated system of commercial accounting of electric energy // Vasilchenko V., Gryb O., Leleka A., Gapon D., Sapruca A., Ierusalimova T. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 33 – 37. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.**

Digital substation is considered as the local level of the automated system of commercial accounting of electric power. Automated system of commercial electric power accounting for digital substation energy - supplying companies can take as obtaining reliable energy balance. The work of the energy sector in the functioning of the energy market puts higher demands on the accounting system, namely, to the level of its automation, accuracy, reliability and integrity. Implementation of an automated system for commercial accounting of electric power on digital substation, allows the transition to real-time rates, obtain a true balance of production, distribution and consumption of electrical power or energy and evaluation of the quality of electric energy.

**Keywords:** electric power, substation, power, measurement, counter, control, automation

**Metrological provision of funds accounting and quality of electric energy // Vasilchenko V., Tesuk Y., Gryb O., Sapruca A., Ierusalimova T. // Bulletin of**

NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 38 – 44. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

Solving the problem of metrological provision of commercial accounting and quality of electric power is essential in the construction and operation of automated systems. A significant amount of hardware requires mandatory checking account so that they do not come out of a class of accuracy. Current state of the electricity industry confronts all participants in the wholesale market of Ukraine the need for quantitative and qualitative indicators of the underlying commodity - electricity. The successful solution of this problem is aimed at ensuring trouble-free operation of electrical equipment, appliances, household appliances, trouble-free flow of processes for consumers, as well as contribute to the process of energy conservation.

**Keywords:** metrology, quality, electric power, control, account, checking, error, counter, analyzer.

**Automated system of control of the level of the surge energy quality // Gryb O., Shevchenko S, Belov N., Gapon D., Ierusalimova T.** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 45 – 50. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

A study of automated control system-level surge and electric power quality. Currently, the actual problem is the continuous monitoring of over-voltage and power quality. This is due to the fact that the low quality of electricity service life voltage limiters reduced. Constant monitoring will predict the failure of the surge arresters. Solving the problem of optimizing the production, supply and consumption of electricity is only possible while improving the accounting system. The objectives of the implementation of the automated system of electric energy are the transition to real-time rates, obtaining a fair balance of production distribution and consumption of electrical power or energy, as well as evaluation of quality of electric energy.

**Keywords:** system, overvoltage, control, quality, power, limiter.

**Analysis of internal and external interference in the diagnosis cable characteristics of partial discharge / A. Kessaev** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 51 – 60. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349

Based on the measurements of partial discharges in power cable lines analyzed the influence of internal and external interference in the results. It is shown that the inclusion of features lighting laboratory, its degree of the screening and grounding quality instrumentation increases the accuracy of the determination of the partial discharges. It is shown that the method of grounding instrumentation also affects the accuracy of the results. Also considered types of shielded chambers and premises and the materials from which they are constructed. To carry out the tests necessary to apply high-frequency electromagnetic shielded room. Based on the experimental data it is stipulated to the use of incandescent light bulbs as working lights. It is ascertained, that the duration of the measurements also greatly affects the accuracy of the results – the longer an experiment, the effect of noise becomes significant.

**Keywords:** partial discharge, screening, working lights, grounding.

**Ways of optimization of inner electric field in polymeric insulators / Kim En Dar, D. G. Karjuk** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 61 – 69. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2224-0349.

The main reason of bushings polymeric insulator's class 35 kV failure is aging caused by the high electric field. Based on the results of analytical studies and numerical solutions of the Laplace equation for the complex conductivity substantiated recommendations on alignment of the electric field of the insulator. The optimal ratios are formulated of the basic design parameters of the insulator with the characteristics of the used dielectric materials. Quantitative assessment of the edge effect of the grounded flange and ways that practically reduce this effect were given: radius increase of rounding of the edges of the flange and application of weakly conductive coating on a limited area of the outer surface of the support tube. It is recommended for the basic isolation to utilize liquid silicon rubber, that provides the best pressurizing of insulator.

**Keywords:** bushing, polymeric isolation, electric tension, edge effect.

**Thermal defence at frequent starting of asynchronous electric motors on basis of the use of their winding as sensors of temperature / O.S. Kobozev, I.I. Smilyanskiy, A.V. Zaratuyko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 70 – 77. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.

In this article discusses the possibility of building a system overload protection of induction motors (AP) operating in intermittent mode, based on the use of temperature sensors as their own windings. For this suggested at each start, before the start of the turn, measure the total instantaneous three-phase motor power. It is shown that the analysis of the ratio of maximum and minimum instantaneous three-phase power at the initial moment of launch, allows to obtain unambiguous information on the change of the winding resistance caused by heating, and to determine the temperature of the engine overheating.

**Keywords:** induction motors, thermal protection, temperature control, instantaneous three-phase power.

**The use of the group adjusting the mechanisms of TES own necessities for increasing of productivity in summer period / A.P. Lazurenko, N. M. Krygol** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 78 – 82. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.

Gives the use of the group adjusting the mechanisms of TES own necessities considerable economy to electric power which increases useful vacation of electric power in a grid. This method is used to the centrifugal machines with the near modes of change of the productivity. Also this method can be utilized on a block TES.

The article describes the use of the group adjusting the mechanisms of own needs of TES gives a considerable economy to electric power, that increases useful vacation electric power in a grid. This method is applicable to the centrifugal mechanisms with the near modes of change of the productivity. Also this method can be used on sectional TES. Verification of method capacity was conducted on the real object. As an object of research was chosen TES with transversal connections is Kharkov TES-3. In work the characteristic chart of loading is resulted for TES, and also boiler regime map with loading of basic aggregates of the boiler draught-blowing system. The results of method approbation are resulted as consumption of electric power the mechanisms of the boiler draught-blowing system functions in time before and after the group adjusting.

**Keywords:** CHP, own need, the scheme with two systems tyres, cogeneration

**The volume of the working tank electric water heater capacitive type / O.P. Lazurenko, G.I. Cherkashina** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 83 – 90. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.

In the article the calculation of capacity type electric aquatic heater working tank volume determination is executed in the conditions when including of setting takes a place one time in days in the area of grid consumption «failure» and day's requirement is here provided in hot water of users. Determination of electric aquatic heater working tank volume was made with the purpose of management potential possibility realization by him, that the use of setting as an user-regulator. For determination of volume statistical information was collected on the consumption of hot water for apartments with a different quantity and demographic composition. The statistical processing of data was further conducted, general expression is got for determination of working tank volume taking into account the amount of persons, resident in one apartment. On the basis of the got expression the calculation volumes of electric aquatic heater working tank were certain for families from 2 – 6 persons, and also the proper are resulted them nominal volumes, produced electric aquatic heaters in industry.

**Keywords:** electric water heater, user controller, the sample standard deviation, variance, error, confidence interval.

**Comparative analysis of energy-efficient solutions for energy supply to a medical center // L. I. Lysenko, D. O. Logacheva, A.I. Ruhd** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 98 – 105. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2224-0349.

The paper presents a comparative analysis of several energy-efficient energy supply solutions for a medical center treatment block in Kharkov on the basis of energy-saving technologies. The object of the research is the treatment block heating, ventilation/conditioning and hot water supply systems. Thermal loads on the above systems and electricity load are analyzed. Three feasible autonomous energy supply schemes are developed with application of inconvenient energy sources and

low-cost energy efficient technologies which must result in traditional primary energy resources consumption drop. The schemes are a reciprocating engine-based cogeneration plant with a ventilation-conditioning absorption chiller for electricity and heat supply, a solid-fuel bio-boiler with a ventilation-conditioning absorption chiller for heat supply, and a thermal pump system with low-potential ground and ventilated air heat as primary energy resources. The schemes economic efficiency comparative analysis is conducted in terms of (discounted) payback periods and profitability indices. The bio-boiler based system proves to be most beneficial.

**Key words:** medical center, energy supply, inconvenient energy sources, energy-saving, comparative analysis, economic efficiency.

**Energy saving stand on the base of direct current machine / G. I. Mel'nikov, O/ O/ Korotkov, O. S. Semikov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 106 – 117. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.

Providing the transmission of power to the electrical grid, based on the direct current machine and autonomous inverter voltage, the test assembling for internal combustion engines load are considered in this paper. The synthesis of direct current machine and autonomous voltage inverter control, which allows to control ICE load torque regardless of speed and reactive power network, is performed. The computer model of the entire system is designed. The computer simulation of ICE test at modes as retention of constant torque well as speed is carried. Energy performance of the test stand for load ICE are obtained.

**Keywords:** internal combustion engines, test stands, autonomous voltage inverter, direct current machine.

**By calculating the probability of overlapping linear isolation probability curve parameters for the case of dangerous lightning strike in support / I. V. Nizhevsky, V. I. Nizhevsky, S. K. Berezka, O. N. Khazarov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 118 – 124. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.

In modern conditions, must be able to defend a given reliability lines of all voltage classes from lightning. This approach sets the task of improving and more precise definition of the probability of overlapping line insulation. An analytical reasoning to solve this problem. This involves determining the volt-second characteristics of isolation, dangerous curve parameters and the probability of dangerous curve parameters, which allows to calculate the probability of overlapping line insulation. The results of the analysis and calculation of the probability of overlapping insulation Transmission tower of 500 kV. The necessity of calculating probability to use a modified curve of probability of dangerous parameters.

**Keywords:** reliability, security, thunderbolt, volt-second characteristic, analysis, calculation of the probability of overlap exclusion probability of a dangerous curve parameters

**Deterioration of laminated polymeric film isolation LPI under the cryogenic temperatures / E. D. Shumilova, Ju. N. Shumilov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 131 – 137. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

The work is devoted to the study of electric strength and patterns of deterioration of laminated polymeric film isolation LPI in the environment of cryogenic liquids under electric field strength close to work. It is shown that the main destructive factor LPI are partial discharge PD in cavities filled with a cryogenic liquid. The impact of the PD, depending on the material, leads to cracking of the films or to the formation on the surface of the carburized conductive shoots. Recommendations on the choice of the LPI for cryogenic devices are given.

**Keywords:** multi-layer polymer film insulation, cryogenic liquid, dielectric strength, partial discharge, the destruction of the insulation film.

**Determination of load ability of high voltage power cables with XLPE insulation / S. Ju. Antonec, L. A. Shhebenjuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 138 – 144. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.**

The analysis of datas of current calculation of the rating of cables at direct voltages up to 110 kV. The work is devoted to creation of a system of method for calculation of the current rating of high-voltage cables. The method is based on a simple two-zone approximate physical model of the insulation of cable. The zone adjacent to the cable is dried out whilst the other zone retains the site's thermal resistivity.

**Keywords:** method for calculation, current rating, high-voltage cables.

**Hardware-sensitive methods for controlling the degree of crosslinking of the radiation-modified polymeric cable insulation / S.A. Sherbina // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 56 (1098). – P. 145 – 152. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2224-0349.**

Complete and reliable analysis of the degree of crosslinking of polymeric materials based on the use of modern and expensive equipment with the implementation of appropriate software processing. The analysis and the possibility of applying hardware-sensitive methods of controlling the degree of crosslinking cables with double-layer polyethylene-teflon-polymer insulation. Thermogravimetric analysis inefficient to determine the degree of crosslinking of polymeric materials, mass changes slightly during radiation modification. It is shown that the most effective methods to determine the degree of radiation crosslinking are differential scanning calorimetry and infrared spectroscopy. Spectrum measurement technology in the near infrared region is high and effective method for assessing the degree of crosslinking of the radiation-modified cable insulation.

**Keywords:** radiation modification, polyvinylidene fluoride, thermogravimetric method, differential scanning calorimetry, infrared spectroscopy.

|   |     |
|---|-----|
| <i>ГУРИН А. Г.</i> Кафедре «Электроизоляционная и кабельная техника» – 50 лет!.....   | 3   |
| <i>АРТЮХ С.Ф., КУХАРЕВ А. Л.</i> Пути повышения энергоэффективности мощных электропечных установок.....   | 11  |
| <i>БЕРЩАНСКИЙ И. А.</i> Повышение технических характеристик искробезопасного светодиодного освещения.....   | 22  |
| <i>ВАСИЛЬЧЕНКО В.І., ГРИБ О. Г., ЛЕЛЕКА О. В., ГАПОН Д. А., САПРЫКА О. В., ІЕРУСАЛІМОВА Т. С.</i> Цифрова підстанція як локальний рівень автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії..... | 33  |
| <i>ВАСИЛЬЧЕНКО В.І., ТЕСИК Ю.Ф., ГРИБ О.Г., САПРЫКА А.В., ІЕРУСАЛІМОВА Т.С.</i> Метрологическое обеспечение средств учета и качества электрической энергии.....   | 38  |
| <i>ГРИБ О.Г., ШЕВЧЕНКО С.Ю., БЕЛОВ Н.С., ГАПОН Д.А., ІЕРУСАЛІМОВА Т.С.</i> Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии.....                                    | 45  |
| <i>КЕССАЕВ А.Г.</i> Анализ внутренних и внешних помех при диагностике кабелей по характеристикам частичных разрядов.....  | 51  |
| <i>КИМ ЕН ДАР, КАРЮК Д.Г.</i> Пути оптимизации внутреннего электрического поля проходных полимерных изоляторов.....   | 61  |
| <i>КОБОЗЕВ А.С., СМІЛЯНСКИЙ И.И., ЗАРАТУЙКО А.В.</i> Тепловая защита при частых пусках асинхронных электродвигателей на основе использования их обмоток в качестве датчиков температуры.....                  | 70  |
| <i>ЛАЗУРЕНКО А.П., КРУГОЛН.М.</i> Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ для повышения КПД в летний период.....  | 78  |
| <i>ЛАЗУРЕНКО О.П., ЧЕРКАШИНА Г.І.</i> Щодо визначення об'єму робочого баку електричного водонагрівача емнісного типу.....   | 83  |
| <i>ЛОМОВ С.Г.</i> Повышение электрической прочности коллектора МПТ (Часть 2).....   | 91  |
| <i>ЛИСЕНКО Л. І., ЛОГАЧОВА Д. О., РУДЬ А. І.</i> Порівняльний аналіз енергоефективних рішень щодо енергопостачання медичного комплексу.....   | 98  |
| <i>МЕЛЬНИКОВ Г.И., КОРОТКОВ А.О., СЕМИКОВ А.В.</i> Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе машины постоянного тока для испытаний двигателей внутреннего сгорания.....             | 106 |
| <i>НИЖЕВСКИЙ И.В., НИЖЕВСКИЙ В.И., БЕРЕЗКА С.К., ХАЗАРОВ О.Н.,</i> К расчету вероятности перекрытия линейной изоляции по кривой вероятности опасных параметров для случая удара молнии в опору.....           | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>ПЕКТОВ А.А., ФЕДОРОВА Н. В.</b> Оценка защищенности поверхности<br>грунта в районе расположения стержневого молниеотвода.....           | 125 |
| <b>ШУМИЛОВА Э. Д., ШУМИЛОВ Ю. Н.</b> Механизм разрушения пленоч-<br>ной изоляции при криогенных температурах.....                          | 131 |
| <b>ЩЕБЕНЮК Л.А. АНТОНЕЦЬ Т. Ю.</b> До визначення навантажувальної<br>спроможності високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією | 138 |
| <b>ЩЕРБИНА С.А.</b> Апаратно-чутливі методи контролю ступеня зшивки<br>радіаційно-модифікованої полімерної ізоляції кабелів.....           | 145 |
| <b>РЕФЕРАТИ</b> .....  | 153 |
| <b>РЕФЕРАТЫ</b> .....  | 160 |
| <b>ABSTRACTS</b> .....   | 167 |