

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

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 3 (1175) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 3 (1175). – 174 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. 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. Ніколасенко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р

екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, 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. Вєпрік, 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 № 11 від 25.12.2015 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

С.Ф. АРТЮХ, д.т.н., проф., НТУ «ХПИ»
И.И. ЧЕРВОНЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»
С.В. БОРЩЕВ, ведущий инженер, ООО «НПП Энергорегулятор»,
 Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАТИМЫМИ ГИДРОАГРЕГАТАМИ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

Предложена структура новой системы автоматического управления обратимыми гидроагрегатами ГАЭС, работающими с переменной частотой вращения, что дает возможность повысить их КПД. Проведен сравнительный анализ переходных процессов полученных на математической модели и данных полученных в результате пусконаладочных работ гидроагрегата Днестровской ГАЭС.

Ключевые слова: обратимый гидроагрегат, КПД, переменная частота вращения, регулятор.

Введение. Как было доказано в многочисленных трудах отечественных и зарубежных ученых, введение режима работы обратной радиально-осевой турбины ГАЭС с переменной частотой вращения, существенно повышает эффективность ее работы при изменении напора [1-4]. При этом для получения синхронной частоты напряжения на шинах станции предлагается использовать асинхронизированный синхронный гидрогенератор (АСГГ) [5–7].

Введение такого режима работы требует создания новой системы автоматического управления (САУ) энергоблоками в составе радиально-осевой гидротурбины и АСГГ, которая обеспечила бы режим коррекции частоты вращения в зависимости от изменения напора на станции.

Синтез новой структуры системы управления гидроагрегатами ГАЭС

Традиционно для обеспечения нормальных режимов работы ГАЭС, с соблюдением всех требований к качеству электрической энергии, используют автоматический регулятор частоты вращения гидротурбин, в качестве которого обычно используется электрогидравлический регулятор (ЭГР) частоты вращения [8].

Они зарекомендовали себя наилучшим образом, обеспечивая надежную работу, высокую чувствительность и высокую точность

© С. Ф. Артюх, И. И. Червоненко, С. В. Борщев, 2015

регулирования.

После появления в 60-е годы XX века первого ЭГР, их гидромеханическая часть практически не претерпела никаких изменений. На сегодняшний день так же используется электрогидравлический преобразователь (ЭГП), блок золотников (БЗ) и сервомотор (СМ). Что же касается электрической части, то она существенно изменилась и представляет собой микропроцессорное устройство, которое обрабатывает большое количество входных параметров, в аналоговом и цифровом виде и выдает необходимые сигналы на электрогидравлический преобразователь.

Создавая новую САУ для обратимых гидротурбин, работающих с переменной частотой вращения, максимально использовалась структура ЭГР, функциональная схема которого показана на рисунке 1. Это было сделано с целью минимизации материальных затрат при введении новых режимов работы энергоблока ГАЭС.

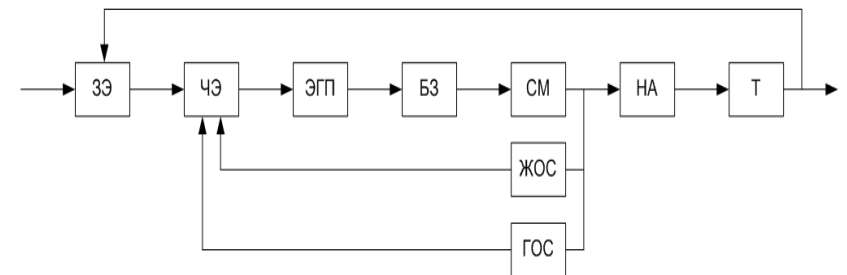


Рис. 1 – Функциональная схема электрогидравлического регулятора частоты вращения гидротурбины: ЗЭ – задающий элемент; ЧЭ – чувствительный элемент; НА – направляющий аппарат; ЖОС – жесткая обратная связь; ГОС – гибкая обратная связь

Новая система автоматического управления должна обеспечить все штатные режимы работы обратимого гидроагрегата (пуск, останов блока, регулирование частоты в аварийных режимах и в режиме резкого изменения нагрузки), и кроме того, обеспечивать коррекцию КПД при изменении напора.

Для этого в структуру регулятора было добавлено новое звено, так называемый фильтр режимов (ФР), который подключается на выходе чувствительного элемента. Задача ФР состоит в том, чтобы изменять структуру ЭГР в зависимости от режима работы гидроагрегата. При включении агрегата в турбинном режиме, или в

режиме закачки воды в верхний резервуар, структура изменяется и он переходит в режим следящей системы по напору для получения оптимального КПД.

С этой целью на вход следящей системы подключается специально разработанный блок, который получил название корректор КПД (КК). На вход КК подаются действующие значения напора, расхода воды через рабочее колесо, частота вращения агрегата и мощность генератора. Исходя из данных, поступающих на вход КК, по специальным массивам-таблицам или по кривым, которые запрограммированы в микроконтроллере, определяется такое открытие НА и частота вращения турбины для действующего напора, при которых КПД гидроагрегата будет самым высоким.

Функциональная схема синтезированной САУ показана на рисунке 2.

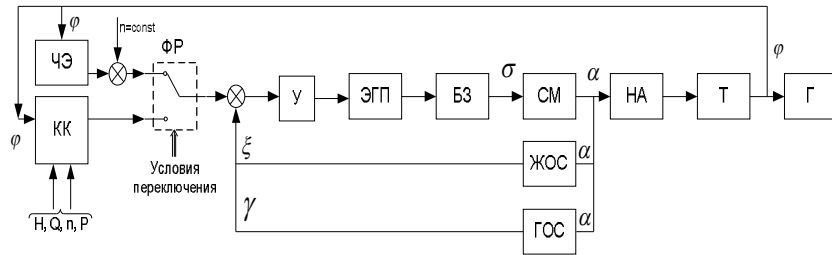


Рис. 2 – Функциональная схема САУ с корректором КПД и фильтром режимов

Построение математической модели гидроагрегата

Для построения математической модели САУ рассмотрим структурную схему ЭГР показанного на рисунке 2 без учета некоторых звеньев, которые несущественно влияют на качество и динамику переходных процессов в силу малости их коэффициентов и постоянных времени (Рис. 3).

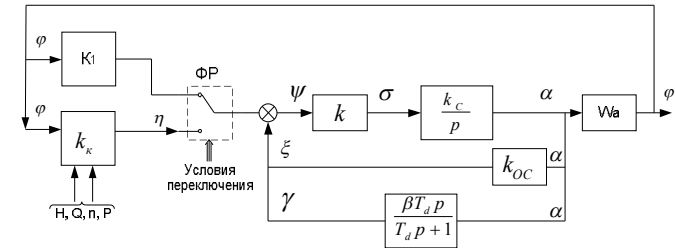


Рис. 3 – Структурная схема регулятора

Описать работу гидротурбины с учетом гидравлического удара в напорном водоводе можно системой уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= M_T - M_{\mathcal{E}} \\ M_T &= \frac{P_T}{\omega} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T}{\omega} \\ H &= H_0 + \Delta h \\ \Delta h &= -T_W \cdot \frac{dQ}{dt} \\ T_W &= \frac{Q_H}{gH_H} \sum \frac{L_i}{S_i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

- где J – момент инерции гидроагрегата;
- ω – угловая скорость вращения гидроагрегата;
- $M_T; M_{\mathcal{E}}$ – момент турбины и момент электромагнитный;
- P_T – активная мощность турбины, кВт;
- γ – удельный вес воды;
- H – напор, м.;
- η_T – КПД турбины;
- Δh – гидравлический удар;
- T_W – постоянная времени водовода, с.;
- L – длина водовода, м.;
- S – площадь сечения водовода, м²;
- Q – расход воды через турбину, м³/с.

mach., 1984. – P. 201–208. 2. *Yanagisawa, T.* Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant [Text] / *T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura, K. Kusunoki, T. Taguchi, M. Abe, H. Kaneko* // *Electrical Engineering in Japan.* – 1996. – Vol. 116, Issue 2. – P. 63–76. doi: 10.1002/ej.4391160206. 3. *Merino, J. M.* ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant [Text] / *J. M. Merino, A. Lopez* // *ABB Review.* – 1996. – Vol. 3. – P. 33–38. 4. *Иванченко, И. П.* Использование переменной частоты вращения для повышения эффективности работы гидротурбин [Текст] / *И. П. Иванченко, В. А. Щур* // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2012. – Т. 14, № 1(2). 5. *Артюх, С. Ф.* Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций [Текст] / *С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур* // *Электрические станции.* – 2014. – № 8. – С. 33–37. 6. *Артюх, С. Ф.* Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання [Текст] / *С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко* // *Енергетика, економіка, технології, екологія.* – 2014. – № 2 (36). – С. 7–10. 7. *Лабунец, И. А.* Асинхронизированные турбогенераторы. *Новости электротехники* [Текст] / *И. А. Лабунец* // *Информ. спр. изд. Журнал.* – 2007. – № 1. – С. 43. 8. *Кривченко, Г. И.* Автоматическое регулирование гидротурбин [Текст] / *Г. И. Кривченко.* – М.-Л., «Энергия», 1964. – 208 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Sheldon, L. H.* An analysis of the applicability and benefits of variable speed generation for hydropower [Text] / *L. H. Sheldon.* – Small hydro power fluid mach., 1984. – P. 201–208. 2. *Yanagisawa, T.* Transient Analysis of Converter-Fed Adjustable Speed Generator-Motor for the Pumped Storage Power Plant [Text] / *T. Yanagisawa, T. Kageyama, K. Okamura, K. Kusunoki, T. Taguchi, M. Abe, H. Kaneko* // *Electrical Engineering in Japan.* – 1996. – Vol. 116, Issue 2. – P. 63–76. doi: 10.1002/ej.4391160206. 3. *Merino, J. M.* ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant [Text] / *J. M. Merino, A. Lopez* // *ABB Review.* – 1996. – Vol. 3. – P. 33–38. 4. *Ivanchenko, I. P., Shchur, V. A.* (2012). Ispolzovanie peremennoy chastoty vrashcheniya dlya povysheniya effektivnosti raboty gidroturbin. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, No. 1(2). 15-18 Print. 5. *Artyukh, S. F., Galat, V. V., Kuz'min, V. V., Chervonenko, I. I., Shakaryan, Yu. G., Sokur, P. V.* (2014). Povyshenie energoeffektivnosti gidroakkumuliruyushchikh elektrostansiy. *Elektricheskie stantsii*, No 8, 33–37. Print. 6. *Artyukh, S. F., Chervonenko, I. I.* Zaoshchadzhennya energoresursiv za rakhunok pidvishchennya effektivnosti vikoristannya gidroagregativ pri ikh roboti zi zminnoy chastotoyu obertannya. *Energetika, ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, No 2, 2014. 7–10. Print. 7. *Labunets, I. A.* (2007). Asinkhronizirovannyye turbogeneratory. *Novosti elektrotekhniki*. No 1. 43. Print. 8. *Krivchenko, G. I.* *Avtomaticheskoe regulirovanie gidroturbin.* Moscow-Leningrad. Energiya, 1964. Print.

УДК 620.92

С. Ф. АРТЮХ, д.т.н., проф., НТУ «ХПИ»
К. В. МАХОТИЛО, к.т.н., с.н.с., НТУ «ХПИ»
К. В. САПЕЛЬНИКОВ, аспирант НТУ «ХПИ»

ПРЕДПОСЫЛКИ К СОЗДАНИЮ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ УЗЛОВ ГИБРИДНОГО ТИПА НА БАЗЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Широкое внедрение альтернативных источников энергии дает возможность создавать в энергосистемах гибридные энергогенерирующие узлы, которые могут существенно улучшать режимы их работы, повышать надежность электроснабжения потребителей и стать участниками конкурентного сектора энергорынка. В статье определены предпосылки для создания таких энергоузлов и намечены задачи, требующие научного решения.

Ключевые слова: гибридный энергогенерирующий узел, возобновляемые источники энергии, электроэнергетическая система.

Постановка проблемы. В конце прошлого и в начале настоящего века в мировой энергетике наблюдался резкий рост строительства электростанций, базирующихся на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Это в первую очередь касается ветровых (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС), малых гидроэлектростанций (МГЭС) и биогазовых электростанций (БиоЭС).

Промышленное освоение этих видов станций, постоянное конструктивное совершенствование и повышение технико-экономических показателей уже сейчас сделали их вполне конкурентоспособными по отношению к традиционным электростанциям. А острый дефицит органического топлива и снижающаяся себестоимость возобновляемой энергии дает им перспективу стать в недалеком будущем главными источниками в энергосистеме.

Тем не менее, электростанции на ВИЭ все еще страдают от своего главного недостатка – нестабильности работы, зависимости от климато-метеорологических условий. В этой связи, встает вопрос о возможности создания нового типа генерирующих узлов (ЭГУ), которые представляли бы собой комплекс разнородных альтернативных электростанций, расположенных на одной территории

© С. Ф. Артюх, К. В. Махотило, К. В. Сапельников, 2015

и работающих на общие шины. Такие комплексы в последнее время получили название гибридных из-за характера выдаваемой в электроэнергетическую систему энергии, которая представляет собой «смесь» электроэнергии разнородных источников.

ЭГУ должны позволить устранить недостатки свойственные каждому отдельному виду ВИЭ и решить проблемы, стоящие перед современным энергосистемам. В первую очередь – повышения надежности и устойчивости их работы, уменьшения потерь передаваемой электроэнергии, разуплотнения графиков нагрузки, обеспечения эффективной работы на энергорынке. Они также смогут помочь решить проблемы электрических сетей 6-10 кВ, которые в настоящее время обеспечивают электроснабжение большей части электропотребителей.

Анализ последних исследований и публикаций. Идея создания таких комплексных узлов высказывалась и ранее [1-4]. Еще в 1990 году в одной из наиболее ранних книг, посвященной ВИЭ [1] ее авторы Дж. Твайделл и А. Уэйр высказали мысль о возможности повышения эффективности работы малых ГЭС за счет их объединения с ветрогенераторами.

В своей монографии [2] украинский ученый Н.М. Мхитарян прямо указал на возможность создания комбинированных энергосистем на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и систем аккумулирования. Он обосновано предположил, что высокие технико-экономические показатели применения ВИЭ, стабильные рабочие параметры энергетического оборудования и надежность энергоснабжения потребителей может быть достигнута при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии, комплексном ее аккумулировании и при совмещении с технологиями традиционной энергетики.

Исследования, проведенные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН [3], дали возможность д.т.н. Г.Ф. Ковалеву и д.т.н. М.А. Рычкову обосновать состав и провести расчеты параметров оборудования и водохранилища для ветрогидроэнергетического комплекса (ВГЭК), как объекта «распределенной» генерации.

Ученые Университета Дуйсбург-Эссен [4] разработали проект комплексного энергоузла, который включает в свой состав ВЭС и подземную ГАЭС. А разработанный сотрудниками Укрэнергопроекта ЭГУ [5] содержит волновую энергоустановку и размещенную над поверхностью моря ВЭС.

Целью данной статьи является анализ состояния проблем, связанных с созданием гибридных энергоузлов энергосистемы, основанных на ВИЭ и определение условий их эффективной работы.

Материалы и результаты исследований. Создание энергогенерирующих узлов связано с необходимостью решения целого ряда задач, среди которых основными являются следующие:

- определение оптимального состава ЭГУ по видам электростанций;
- определение величины установленной мощности ЭГУ;
- определение места размещения ЭГУ в энергосистеме;
- обеспечение устойчивости работы ЭГУ в энергосистеме;
- обеспечение их эффективными аккумуляторами энергии;
- определение взаимосвязи работы ЭГУ с другими узлами энергосистемы;
- создание оборудования для автоматического управления режимами работы.

При определении оптимального состава ЭГУ необходимо, прежде всего, исходить из свойств отдельных видов ВИЭ и условий их работы, а также необходимости их резервирования. На выбор состава ЭГУ существенное влияние оказывает характер местности и её природные и климато-метеорологические условия, которые определяют ветропотенциал, количество солнечных дней в году, возможность строительства малых ГЭС и ГАЭС, а также условия доставки отходов для получения биогаза и его последующего использования.

Возможные варианты структуры ЭГУ представлены в таблице. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, которые должны быть тщательно проанализированы при сравнении разных вариантов.

В основе решения об использовании ВИЭ должны быть положены результаты многолетнего мониторинга за состоянием окружающей среды в данном районе. Очень важно, чтобы получаемая при этом информация включала в себя все параметры, которые необходимы для разработки конкретной энергетической системы. Частично такую информацию можно получить с метеостанций, но, к сожалению, их расположение часто не совпадает с местом намечаемого расположения энергоустановок, а иногда методы и периодичность регистрации и анализа метеоданных не полностью соответствует рассматриваемой

задаче. Поэтому созданию ЭГУ должно предшествовать развитие базы метеонаблюдений.

Таблица 1 – Варианты структуры энергогенерирующего узла

№	ВЭС	СЭС	БиоЭС	МГЭС	МГАЭС
1	+	+			
2	+			+	
3		+		+	
4	+	+		+	
5	+			+	+
6		+		+	+
7	+	+		+	+
8	+	+	+		
9	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+

На выбор состава ЭГУ большое влияние оказывает характер потребителей электроэнергии и график их работы. Характеристики потребителей и потенциальных источников возобновляемой энергии должны быть тщательно согласованы между собой. Если согласование энергоустановок на ВИЭ с потребителем вызывает сложности, то чтобы не завышать мощность этой установки необходимо будет включить в состав ЭГУ определённые накопители энергии.

Необходимо учитывать и особенности местной инфраструктуры района, в рамках которого будет создаваться и функционировать ЭГУ. Как показали зарубежные исследования [1] характерный размер такого района не должен превышать 250 кв. км.

При расчёте мощности ЭГУ следует исходить из известных зависимостей, определяющих мощность агрегатов через характеристики их энергоносителей.

Суммарная установленная мощность ЭГУ определяется так:

$$P_{уст \Sigma} = \sum_i^n P_{уст i} \quad (1)$$

где $P_{уст \Sigma}$ – суммарная установленная мощность энергоузла;

$P_{уст i}$ – установленная мощность i -й энергоустановки ЭГУ.

Мощность ветроагрегата N_B , кВт зависит от скорости ветра и от площади поверхности, ометаемой ветроколесом, и может быть записана так:

$$N_B = \frac{\rho^3 D^2}{7000} \quad (2)$$

где ρ – скорость ветра, м/с;

D – диаметр ветроколеса, м.

Таким образом установленную мощность ВЭС будет равна

$$P_{ВЭС} = \xi N_B n \quad (3)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра, который эквивалентен КПД ветроагрегата;

n – количество ветроагрегатов.

Следует сразу же сказать, что для непосредственного питания электрических приемников от ветроустановок их надо будет оснастить еще сглаживающими и замещающими устройствами, а также автоматическими регуляторами слежения ветрогенератора за направлением ветра.

Установленная мощность малых ГЭС и ГАЭС $P_{ГЭС}$, кВт находится по известной формуле:

$$P_{ГЭС} = 9,81QH\eta_r \quad (4)$$

где Q – расход воды через створ ГЭС, м³/с;

H – напор, м;

η_r – гидравлический КПД.

Что касается СЭС, то для оценки ее мощности необходимо знать энергетический потенциал солнечного излучения для данной местности. Практика показала, что в настоящее время наиболее целесообразным видом солнечных энергоустановок для условий Европы являются фотоэлектрические. Производство фотоэлектрических ячеек и панелей для них достаточно хорошо освоены промышленностью, а их технико-экономические показатели постоянно растут.

Как показывают последние исследования, солнечный радиационный режим территории Украины, особенно южных ее районов, весьма благоприятный для практического использования СЭС. Уже проведен достаточно большой объем исследований, который

дает возможность оценить на практике интенсивность прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на протяжении суток в разные месяцы года в отдельных районах Украины, а значит оценить и необходимый для расчета энергетический потенциал [7]. Анализ среднестатистических данных по поступлению солнечной энергии в Украине показывает, что суммарная солнечная радиация достигает для разных районов Украины от 600 до 800 Втч/м² в сутки.

Учитывая то, что мощность СЭС зависит главным образом от типа и мощности фотоэлектрических панелей и их количества (которое определяется площадью выделенной для их установки территории), то мощность СЭС $P_{СЭС}$, кВт для ЭГУ можно оценить так:

$$P_{СЭС} = \frac{S_{СЭС}}{S_{ФЭП}} P_{ФЭП}, \quad (5)$$

где $S_{СЭС}$ – суммарная площадь земли, выделенная для СЭС, м²;

$S_{ФЭП}$ – площадь земли необходимая для установки одной панели, м²;

$P_{ФЭП}$ – единичная мощность панели, кВт.

Установленная мощность биогазовой энергоустановки зависит от вида газогенератора и объема сырья, на котором он работает. В [1] показано, что энергетический выход установки на биогазе, в общем случае, определяется соотношением

$$E = \eta H_{БГ} V_{БГ}, \quad (6)$$

где η – КПД горелочного устройства, котла и других элементов топочного цикла, примерно, 60%;

$H_{БГ}$ – теплота сгорания на единицу объема биогаза (удельная объемная теплота), МДж/м³;

$V_{БГ}$ – объем получаемого биогаза, м³.

Полученная энергия является тепловой и может быть положена в основу выбора мощности теплоагрегата БиоЭС и его электрического генератора. Очевидно, что установленная мощность БиоЭС установки целиком и полностью будет зависеть от исходного объема сырья для производства биогаза.

При этом надо иметь в виду, что сумма установленных мощностей отдельных станций ЭГУ может лишь условно представлять его полную установленную мощность, так как максимальные значения мощностей этих станций не обязательно могут быть получены в один и тот же момент времени. Нахождение величины установленной

мощности ЭГУ является лишь одной из многих взаимосвязанных между собой задач, связанных с созданием этого узла.

Необходимо будет определить, в первую очередь, месторасположения ЭГУ в энергосистеме и определить район энергопотребления, который он должен будет обслуживать. Исходя из требования уменьшения потерь при передаче электроэнергии и условия надежности электроснабжения потребителей, нужно будет определить взаимосвязи с существующими в энергосистеме близлежащими подстанциями и установить возможные перетоки электроэнергии между ними.

Используя методы теории вероятности и математической статистики, а также результаты проведенных в последние годы исследований на действующих СЭС, ВЭС и БиоЭС необходимо определить возможные пути заполнения требуемого графика нагрузки потребителей данного района. При этом главной задачей, по-прежнему, остается необходимость обеспечения должного качества электроэнергии. Все перечисленные выше задачи требуют своего научного решения.

Выводы:

1. Создание гибридных энергоузлов на базе альтернативных энергостанций, т.е. таких, которые содержат разнохарактерные источники энергии, размещаемые на одной территории и работающие на общие шины, является перспективным направлением совершенствования режимов работы электроэнергетических систем, особенно в электросетях 6-10 кВ;

2. Важнейшей задачей создания ЭГУ является определения его состава, который существенно зависит от природно-географических и климатологических факторов данной местности и характера электропотребителей выделенного района;

3. Показан метод нахождения суммарной установленной мощности ЭГУ, содержащих электростанции на базе ВИЭ разных типов;

4. Показаны направления дальнейших исследований, связанных с решением целого комплекса задач, связанных с созданием эффективных ЭГУ.

Список литературы: 1. *Твайделл Дж., Уэйр А.* Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ.-М.: Энергоатомиздат.1990.-392 с.;ил. 2 . *Мхитарян Н. М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы / *Н. М. Мхитарян* - К.: Наукова думка.1999.-320 с.. 3. *Ковалев г.Ф., Рычков М.А.* Ветроэнергетический комплекс как вариант диверсификации распределенной генерации. «Энергия:экономика,

техника,экология» №9и10, 2013. 4. Universitat Duisburg-Essen. Underground Pumped Storage Plant. <https://www.uni-due.de/wasserbau/undergroundpumpstorag-eplants.php> 5. Осадчий С.Д., / Совместное использование волновой и ветровой энергии в единой энергоустановке. / С.Д. Осадчий, А.З. Савченко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Випуск 2(62), 2013 рік .Серія «Технічні науки» 6. Мхитарян Н.М. / Н. М. Мхитарян Гелиоэнергетика: системы, технологии, применение - К.: Наукова думка, 2002- 320 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tvajdell Dzh., Ujejr A. *Vozobnovljaemye istochniki jenerгии*. Moscow. Jenergoatomizdat,1990. Print. 2 Mhitarjan N.M. *Jenergetika netradicionnyh i vozobnovljaemyh istochnikov. Opyt i perspektivy*.-Kiev Naukova dumka. 1999. Print.3. Kovalev g.F.,Rychkov M.A. *Vetrojenergeticheskij kompleks kak variant diversifikacii raspredeľennoj generacii*. «Jenerгija:jekonomika, tehnika,jekologija» №9и10, 2013. 4. Universitat Duisburg-Essen. Underground Pumped Storage Plant. <https://www.uni-due.de/wasserbau/undergroundpumpstorag-eplants.php> 5. Osadchij S.D. ,Savchenko A.Z.*Sovmestnoe ispol'zovanie volnovoj i vetrovoj jenerгии v edinoj jenerгoustanovke. Vistnik Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta priroдокoristuvannja*. No. 2(62), 2013. 13-25 Print. 6. Mhitarjan N.M. *Geliojenergetika: sistemy, tehnologii, primenenie*. Kiev Naukova dumka, 2002. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.316.925

В.Н. БАЖЕНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ».
ЭХСОНИ СУБХОН, студент НТУ «ХПИ».

УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УЗЛОВОЙ СХЕМЫ ПИТАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Рассмотрены условия функционирования дистанционной защиты распределительной сети переменного тока на примере узловой схемы питания двух участков напряжением 10 – 35 кВ. Рассмотренные условия применимы для всех видов технических средств релейной защиты, в том числе – электромеханических, которые могут быть использованы для выбора условий работы систем безопасности цифровых систем автоматизации электроснабжения.

Ключевые слова: распределительная сеть переменного тока, дистанционная релейная защита

Введение. При проектировании и эксплуатации распределительных сетей переменного тока напряжением 10 – 35 кВ особое внимание должно уделяться условиям срабатывания и несрабатывания устройств релейной защиты электроустановок. Анализ работы релейной защиты электроустановок распределительной сети – это по существу определение правильного (по требованию) и неправильного (излишнего, ложного и отказа) срабатывания устройства согласно тем условиям несрабатывания и срабатывания, которые предназначены для определенного вида устройства релейной защиты.

Целью данной работы явилась конкретизация условий работы дистанционной защиты на примере узловой схемы питания двух участков напряжением 10 – 35 кВ. Для рассмотрения условий функционирования дистанционной защиты выбраны расчетные точки короткого замыкания (рис. 1): К1 – повреждение в начале первого участка А – ПС, вблизи выключателя QА1; К2 – повреждение в конце первого участка А – ПС, вблизи пункта секционирования и выключателя QПА1; К3 – повреждение в начале второго участка ПС – В, вблизи выключателя QПВ1; К4 – повреждение в конце второго участка ПС – В, вблизи подстанции В; К5 – повреждение в начале

смежного второго участка А – ПС, вблизи выключателя QА2.. В дальнейших рассуждениях принято, что при коротких замыканиях в любом месте распределительной сети переменного тока К1 – К4 должны срабатывать не менее, чем две дистанционные защиты на ближайшем к месту повреждения выключателе, и одна дистанционная – на смежном выключателе.

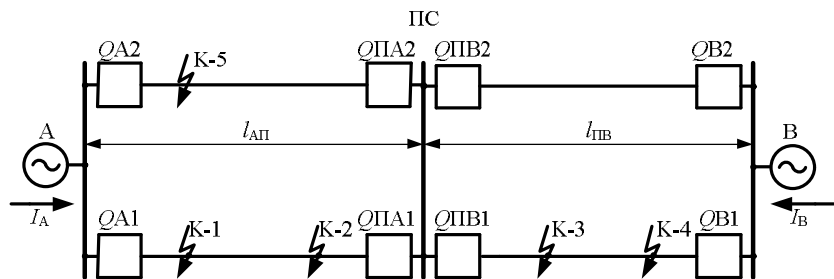


Рис. 1 – Расчетные точки короткого замыкания в распределительной сети

Сформулируем основные технические возможности дистанционных защит [1,2,3]. Первая ступень (1 зона ДЗ) дистанционной защиты – мгновенная защита с нормированной чувствительностью в пределах 85 – 90% защищаемого участка; вторая ступень (2 зона ДЗ) дистанционной защиты – 100% защита для своего участка; третья ступень (3 зона ДЗ) дистанционной защиты – резервная 100% защита для всей узловой схемы питания распределительной сети.

Обозначим коэффициенты, используемые в условиях срабатывания и несрабатывания устройств релейной защиты: $k_H=0,85 - 0,9$ – коэффициент надежной отстройки (условие несрабатывания) защиты минимального сопротивления от повреждений в конце объекта защиты; $k_3=1,1 - 1,3$ – коэффициент запаса для условий несрабатывания защит и блокировок в максимальных режимах распределительной сети; $k_B=1,1 - 1,2$ – коэффициент возврата защиты минимального типа; $k_4=1,2$ – нормированный коэффициент чувствительности (условие срабатывания) для третьей ступени дистанционной; $k_{ч1}=1,25$ – нормированный коэффициент чувствительности (условие срабатывания) для второй ступени дистанционной защиты к повреждениям в конце объекта защиты; $k_{ч2}=1,5$ – нормированный коэффициент чувствительности (условие

срабатывания) для третьей ступени дистанционной защиты к повреждениям в конце зоны защиты.

Условия функционирования дистанционных защит. Рассмотрим условия функционирования дистанционных защит. Первая ступень дистанционной защиты (ДЗ1) для выключателя QА1. Уставка данной защиты с абсолютной селективностью выбирается по условию несрабатывания от сопротивления, измеряемого защитой при к.з. в К2:

$$Z_{ДЗ1} \leq k_H \cdot Z_{К2.min}, \quad (1)$$

где $Z_{К2.min}$ – сопротивление, измеряемое первой ступенью при к.з. в конце первого участка в режиме максимума энергосистемы.

Также защита не должна срабатывать от максимальных нагрузочных режимов:

$$Z_{ДЗ1} \leq Z_{P.min} / k_3 \quad (2)$$

где $Z_{P.min}$ – минимальное сопротивление, измеряемое защитой, в рабочем максимальном режиме распределительной сети.

Характеристика защиты – ненаправленная, в виде окружности с центром в начале координат, $\varphi_{CP} = 0 - 360$. Свойство направленности обеспечивается токовой блокировкой. Данная дистанционная отсечка выполняется без выдержки времени $t_{CP} = 0$.

Токовая блокировка (БТ). Применяется для первой ступени дистанционной защиты. Уставка токового пуска выбирается больше тока в выключателе QА1 при к.з. К5 (см. рис. 1) по формуле:

$$I_{БТ} \geq k_3 \cdot I_{К5.max}, \quad (3)$$

где $I_{К5.max}$ – расчетный ток выключателя QА1 при к.з. в точке К5 равный току от подстанции В в максимальном режиме работы подстанции и прилегающей электрической сети.

Вторая ступень дистанционной защиты (ДЗ2). Защита должна защищать 100 % своего участка с нормированной чувствительностью:

$$Z_{ДЗ2} \geq k_{ч1} \cdot Z_{К2.max}, \quad (4)$$

где $Z_{К2.max}$ – сопротивление повреждения в точке К2, измеряемое второй ступенью дистанционной защиты в режиме минимума энергосистемы А.

Однако, защита не должна срабатывать во время максимального рабочего режима с учетом возврата рассматриваемой защиты после отключения повреждения на смежном участке своей основной защитой:

$$Z_{ДЗ2} \leq Z_{P.min} / (k_3 \cdot k_B), \quad (5)$$

где $Z_{P.min}$ – минимальное сопротивление, измеряемое защитой в рабочем максимальном режиме распределительной сети. Характеристика 2 зоны защиты – направленная, в виде сегмента

окружности с углом $\varphi_{CP} = 0 - 120^\circ$ в 1 и 2 квадрантах комплексной плоскости. Выдержка времени принимается равной ступени селективности $t_{CP} = \Delta t$ с целью резервирования первой зоны. Третья ступень дистанционной защиты (ДЗ3). Желательно, чтобы защита чувствовала повреждения на смежном участке ПС – В в режиме минимума питающей энергосистемы:

$$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч} \cdot Z_{К4, \max}, \quad (6)$$

где $Z_{К4, \max}$ – сопротивление повреждения в точке К4, измеряемое третьей зоной дистанционной защиты в режиме минимума энергосистемы А и с учетом активного сопротивления дуги (5 – 8 Ом) в месте повреждения.

Обязательно 3 зона дистанционной защиты должна чувствовать повреждения на шинах пункта секционирования в расчетной точке К2 :

$$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч2} \cdot Z_{К2, \max}, \quad (7)$$

где $Z_{К2, \max}$ – сопротивление повреждения в точке К2, измеряемое 3 зоной дистанционной защиты в режиме минимума энергосистемы А и с учетом активного сопротивления дуги (5 – 8 Ом) в месте повреждения.

Как правило, уставка 3 зоны дистанционной защиты по абсолютному значению не может быть отстроена от минимального сопротивления $Z_{P, \min}$ с фазовым углом в пределах 20 – 40 градусов, измеряемое защитой, в рабочем максимальном режиме распределительной сети. Поэтому отстройка от максимального рабочего режима возможна за счет угловой характеристики защиты в виде сектора 55 – 120 град. Выдержка времени принимается равной $t_{CP} = 3\Delta t$ для резервирования своих защит со стороны подстанции и защит пункта секционирования, а также отказов выключателя последнего.

Условия функционирования релейной защиты для выключателей QА1 и QПВ1 (здесь не показано) на примере узловой схемы питания распределительной сети сведены в таблицу условий функционирования защит (табл.1). Как видно, правильное функционирование релейной защиты во многом определяет высокую надежность работы систем электроснабжения. В последнее время становятся актуальными вопросы повышения надежной работы электроэнергетических систем в экстремальных условиях, вызванных, в первую очередь, применением кибернетического наступательного оружия. Для противодействия такому нападению предлагается создавать системы безопасности цифровых подстанций [4], как второй уровень системы релейной защиты и автоматики на контролируемой

электромеханике. Поэтому, рассмотренные условия срабатывания и несрабатывания применимые для всех видов технических средств релейной защиты, в том числе электромеханических, могут быть использованы для выбора условий работы систем безопасности цифровых систем автоматизации электроснабжения.

Таблица 1 – Условия функционирования дистанционных защит

Защита	Выключатель QА1	Выключатель QПВ1
ДЗ1	$Z_{ДЗ1} \leq k_H \cdot Z_{К2, \min}, \quad (1)$ $Z_{ДЗ1} \leq Z_{P, \min} / k_3. \quad (2)$ $t_{CP} = 0;$ $\varphi_{CP} = 0 - 360^\circ$ (с БТ).	$Z_{ДЗ1} \leq k_H \cdot Z_{К4, \min}, \quad (8)$ $Z_{ДЗ1} \leq Z_{PП, \min} / k_3. \quad (9)$ $t_{CP} = 0;$ $\varphi_{CP} = 0 - 120^\circ.$
БТ	$I_{БТ} \geq k_3 \cdot I_{К5, \max}. \quad (3)$	–
ДЗ2	$Z_{ДЗ2} \geq k_{ч1} \cdot Z_{К2, \max}, \quad (4)$ $Z_{ДЗ2} \leq Z_{P, \min} / (k_3 \cdot k_B). \quad (5)$ $t_{CP} = \Delta t;$ $\varphi_{CP} = 0 - 120^\circ.$	$Z_{ДЗ2} \geq k_{ч1} \cdot Z_{К4, \max}, \quad (10)$ $Z_{ДЗ2} \leq Z_{PП, \min} / (k_3 \cdot k_B). \quad (11)$ $t_{CP} = \Delta t;$ $\varphi_{CP} = 50 - 120^\circ.$
ДЗ3	$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч} \cdot Z_{К4, \max}, \quad (6)$ $Z_{ДЗ3} \geq k_{ч2} \cdot Z_{К2, \max}. \quad (7)$ $t_{CP} = 3\Delta t;$ $\varphi_{CP} = 55 - 120^\circ.$	$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч2} \cdot Z_{К4, \max}. \quad (12)$ $t_{CP} = 2\Delta t;$ $\varphi_{CP} = 55 - 120^\circ.$

Выводы.

Сформулированы основные условия функционирования для дистанционных защит узловой схемы питания распределительной сети 10 – 35 кВ. Условия срабатывания защит определены нормированной чувствительностью к повреждениям для защит: первой зоны дистанционной защиты – короткие замыкания в пределах 85 – 90% защищаемого объекта; второй зоны дистанционной защиты – короткие замыкания в пределах 100% защищаемого объекта; третьей зоны дистанционной защиты – короткие замыкания в пределах 100% всей распределительной сети между двумя подстанциями. Условия несрабатывания защит заданы отстроенностью от внешних повреждений (1 и 2 зоны дистанционной защиты) и все ступени защит – от максимального рабочего режима распределительной сети.

Рассмотренные условия срабатывания и несрабатывания применимы для всех видов технических средств релейной защиты, в том числе – электромеханических, которые могут быть использованы для выбора условий работы систем безопасности цифровых систем автоматизации электроснабжения.

Список литературы: 1. *Фигурнов Е.П.* Релейная защита: учебник для вузов железнодорожн. трансп. / *Е.П. Фигурнов* – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с. 2. *Чернобровов Н. В.* Релейная защита энергетических систем / *Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов* – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с. 3. *Федосеев А.М.* Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп. / *А.М.Федосеев, М.А. Федосеев* – М. :Энергоатомиздат.,1992. – 528 с. 4. *Щедриков Б.Д.* Система безопасности цифровой подстанции (мысли вслух) // Релейная защита и автоматизация. – 2011. №01 (02). – с. 58-59.

Bibliography (transliterated): 1. *Figurnov EP Relay protection: a textbook for high schools railway. transp.* Moscow Zheldorizdat, 2002. Print. 2. *VA Semenov Relay protection of power systems* Moscow Energoatomizdat, 1998. Print. 3. *Fedoseev AM Fedoseev MA Relay protection of electric power systems:* Moscow Energoatomizdat., 1992. Print. 4. *Schedryk BD Security system digital substation (thinking out loud) // Automation and Protection.* - 2011. No. 01 58-59. Print

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.316

Ю. В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»
Д. О. МАЛИШЕВА, магістр НТУ «ХПИ»

ДОКАЗ У ПРИКЛАДАХ НЕСПРОМОЖНОСТІ МЕТОДИКИ ОБЧИСЛЕННЯ ПЛАТИ ЗА ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВИРІШУВАТИ ПРОБЛЕМУ КРП

На прикладах розрахунків плати за перетікання реактивної електроенергії для різних споживачів, згідно з офіційною Методикою обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії, показана нісенітниця цих розрахунків та як наслідок цього неспроможність офіційної Методики бути економічним важелем стимулювання споживачів та вирішувати проблему компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Ключові слова: споживач, реактивна потужність, реактивна електроенергія, компенсація реактивної потужності, електричні мережі

Вступ. У сучасній дійсності одним з нагальних питань електропостачання та енергозбереження є компенсація реактивної потужності (КРП) в електричних мережах. Ступінь КРП та пов'язанні з нею рівні напруги у центрах живлення споживачів в значній мірі визначає рівень втрат електричної енергії в електричних мережах всіх призначень. Вирішення питання КРП монополіст (Міненерго) бачить виключно у застосуванні «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами» (далі Методика) [1,2] як економічного важеля стимулювання споживачів до встановлення у своїх мережах устаткувань КРП.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Численна критика цієї Методики, наприклад [3,4,5], не вплинула на думку монополіста і, як наслідок цього, поява у 2012 році на офіційному сайті Міненерго проекту нової редакції цієї Методики [6]. Хоча, як стверджується у [7] за ініціативою Міненерго у період 2011 – 2013 рр. деякими організаціями виконувався аналіз з редакції діючої Методики. Було визнано некоректну методичну позицію, що питання КРП у мережах електропередавальних організацій вирішується автоматично за рахунок КРП в мережах потужних промислових підприємств, а також, що з точки зору системної КРП «нульова» (повна) компенсація може

© Ю. В. Владимиров, Д. О. Малишева, 2015

бути некоректною [7]. Але варто відзначити що дані висновки були опубліковані ще у 2003 р. [8]. Нажаль у висновках [7] мова йдеться не про скасування діючої Методики, а лише її корекції. В [8] було відзначено, що оскільки Методика не дозволяє реалізувати оптимальні взаємоу'язані рішення з КРП, а виконує лише фіскальну функцію, то споживач електроенергії розглядає питання виключно захисту своїх економічних інтересів. Впровадивши в дію дану Методику, монополіст взяв таким чином на себе повну відповідальність за оптимізацію режимів роботи електричних мереж по реактивній потужності, не залучая фактично споживачів до регулювання цих режимів.

Мета досліджень. Довести, що діюча офіційна Методика не є економічним важелем стимулювання споживачів до впровадження засобів КРП та, як наслідок цього, неспроможна вирішувати проблему КРП.

Результати досліджень. Оскільки числові значення (цифри) кажуть про процес більш переконливо, автори статті виконали в площині порівняльного аналізу розрахунки плати за перетікання реактивної енергії відповідно до різних редакцій Методики та для різних споживачів. Для розрахунків були обрані споживачі з прикладів №№3,6,7 редакції Методики 1997 р. [1]. Розрахунки виконані для цих споживачів відповідно для різних редакцій Методики [1,2,6] для трьох випадків. Випадок 1 – базові умови прикладів. Випадок 2 – у споживача демонтують батарею статичних конденсаторів, тоді, якщо враховувати, що батарея в робочі години працювала з встановленою потужністю, споживання підприємством реактивної енергії з мережі енергосистеми зростає. Випадок 3 – демонтовані засоби КРП та вийшов зі строю лічильник реактивної енергії (або демонтований).

Для зіставлення результатів розрахунків був прийнятий тариф запропонований в редакції Методики 1997 р. [1]. Результати розрахунків зведені у таблицю 1.

Аналіз одержаних результатів обчислення плати за перетікання реактивної енергії (табл.1) свідчить:

1. Для всіх прикладів на законних підставах споживач може знизити плату за реактивну енергію у 5,02–13,36 разів (приклад №6,7, випадок 3– Методика 2002р. [2]).

2. Плата за реактивну енергію для споживача з прикладу №7, фактично лише за наявності у нього синхронних двигунів стає у 2,66 разів більша ніж у споживача з прикладу №6, хоча обидва споживачі

Таблиця 1– Результати розрахунків обчислення плати за реактивну електроенергію

Приклади з Методики 1997 р.	Випадо к	Методика 1997 р.[1]	Методика 2002 р.[2]	Проект методики 2012 р.[6]
1	2	3	4	5
№3 На промисловому підприємстві здійснюється облік споживання активної та реактивної енергії; в електромережі 0,4 кВ встановлена БСК потужністю $Q_{ку}=1100$ кВар; режим роботи підприємства однозмінний. Споживання енергії місяці, в якому 31 календарний та 21 робочий день, по показанням лічильників складо: $WP=230000$ кВт-год; $WQ=50000$ кВар-год. Значення коефіцієнта $D=0,058$ кВт/кВАр. Середньовідпускний тариф $T=0,072$ грн/кВт год.	1	8 146,54	8 146,54	8 156,56 (5 507,31) *
	2	1 736,28	1 561,88	1 968,81
	3	1 070,55	1 000,82	1 163,52
№6 На промисловому підприємстві здійснюється облік споживання активної та реактивної енергії; в мережі підприємства встановлена БСК потужністю $Q_{ку}=10136$ квар режим роботи підприємства трьохзмінний с двома вихідними на тиждень.	1	7 063,47	7 063,47	18 055,93 (12 132,31) *

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Споживання енергії місяці, в якому 31 календарний та 21 робочий день, по показанням лічильників склало: $WQ_{СП}=1454378$ кВт·год. Значення коефіцієнта $D = 0,0129$ кВт/квар. Середньовідпускний тариф $T=0,072$ грн/кВт год..	2	25 055,59	20 431,29	28 054,1
	3	1 505,63	1 407,56	1 636,39
№7 На промисловому підприємстві здійснюється облік споживання активної та реактивної енергії; в мережі підприємства встановлена БСК потужністю $Q_{КУ}=10136$ кВар. Потужність синхронних двигунів напругою 10 кВ – $P_{СД}=1200$ кВт. Режим роботи підприємства безперервний, без вихідних днів. Споживання енергії в місяці, в якому 31 календарний, по показанням лічильників склало: $WP=1454378$ кВт·год; $WQ_{СП}=307023$ квар·год; Значення коефіцієнта $D = 0,0129$ кВт/квар. Середньовідпускний тариф $T=0,072$ грн/кВт·год	1	18 802,24	18 802,24	18 802,24 (12 629,88) *
	2	36 310,37	22 323,82	37 950,49
	3	1 505,37	1 407,56	1 636,39

* з урахуванням знижки

мають однакові параметри споживання енергії (приклади №6,7, випадок 1 – Методика [2]).

3. Фактична ціна за одиницю спожитої реактивної енергії може бути, наприклад, у 2,26 разів (0,163 грн/квар·год) вищою за ціну активної енергії (приклад №3, випадок 1), чи близької (0,061 грн/квар·год) до ціни за активну енергію (приклад №7, випадок 1), але це нісенітниця.

Окрім вказаних результатів аналізу розрахунків плати за реактивну енергію слід мати на увазі що, як це було доведено у [9], що значення коефіцієнту D (економічного еквіваленту реактивної потужності ЕЕРП) може коливатися до 9 разів.

Спричиняти ці коливання може, наприклад, відключення сміжних споживачів (закриття підприємства), або їх суттєве розширення, модернізація мереж, відключення одного з джерел живлення у мережах з двостороннім живленням та багато інших чинників [9]. Тому плата у цьому випадку теж може змінюватись у 9 разів, споживач же не може впливати на це.

Усе наведене вище доказує безглуздість розрахунків за реактивну енергію, виконаних, відповідно до Методики. Також можливо стверджувати, що Методика не відповідає задекларованій цілі – бути економічним важелем стимулювання споживачів до залучення к КРП та, як наслідок цього, неспроможна вирішувати проблему КРП в електричних мережах.

Єдиний шлях до цього, як пропонується у [10], є покладання в законодавчому порядку, наприклад, через механізм ліцензування діяльності усієї відповідальності за КРП в електричних мережах усіх призначень (окрім мереж споживачів) на електропостачальні (електропередавальні) організації, а не впровадження проектів системної КРП лише з їх ініціативи як це пропонується у [7].

Висновки. По-перше, негайно скасувати діючу Методику обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії [2], як таку, що не відповідає вирішенню проблеми КРП та не є об'єктивною.

По-друге, розрахунки плати за реактивну електроенергію для малих та середніх споживачів проводити лише за показниками лічильників та тарифами, які повинні бути затверджені НКРЕ без застосування коефіцієнта ЕЕРП, який не має практичного механізму контролю за його величиною з боку споживача і може сприяти корупційним схемам. Цей платіж може бути скорегована лише урахуванням фактора впливу нестаціонарності споживання (навантаження) на втрати в електричних мережах [11]. Розрахунки з великими підприємствами до розробки Інструкції – методики по комплексній системній КРП проводити на засадах двобічних взаємовигідних умов.

По-третє, зупинити неконтрольоване використання коштів отриманих від споживачів як платіж за реактивну електроенергію та спрямувати їх, як це пропонується у [7], до інвестиційних фондів фінансування проектів з КРП в мережах енергосистем та електропередавальних компаній...

Список літератури: 1. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами. Наказ Міністерства енергетики України №37 від 14.11.97 р. / Офіційний вісник України, 1998, №1. 2. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Наказ Міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01.2002 р. // Офіційний вісник України 2002. - №6. 3. *Владимиров Ю.В.* О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями / *Ю.В.Владимиров, И.И.Смелянский* // Энергетика и электрификация. - 2002. № 11, С.31-34. 4. *Зорин В.В.* Об оплате за перетоки реактивной энергии в условиях рыночных отношений. / *В.В.Зорин* // Промелектро.-2004.-№4, С.22-23. 5. Проблемні питання компенсації реактивної потужності // Промелектро.- 2004. – №5. – С.4 –17. 6. Офіційний веб-сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://mpe.kmu.gov.ua>. 7. *Банин Д.Б.* Практические вопросы комплексной системной компенсации реактивной мощности в электрических сетях 110/35/10 кВ электропередающих организаций/ *Д.Б.Банин, М.Д.Банин, А.С. Яндольский* и др. // Электрические сети и системы. – 2013. №3, С.20-36. 8. *Владимиров Ю.В.* Экономическая целесообразность полной компенсации реактивной мощности в линиях питания потребителей / *Ю.В.Владимиров, Т.А.Крамская, Л.С.Попазов* // Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні : Матеріали II-ї міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 19.06 - 20.06.2003р.) – Зб.наук.статей.- Львів, ЛьЦНТЕІ, 2003.- С.133-135. 9. *Батюк И.А.* Исследование влияния ЭЭРМ на эффективное экономическое регулирование перетоков реактивных мощностей в электрических сетях / *И.А.Батюк, Ю.В.Владимиров* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»:-Харків: НТУ «ХПІ» : –№3 – 2011.–С.8–11. 10. *Владимиров Ю.В.* О генерации и потреблении реактивной мощности в электрических системах / *Ю.В.Владимиров* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»: –Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ»: –№2(15). –2013. –С.59-63. 11. *Владимиров Ю.В.* Учет фактора влияния нестационарности нагрузки на потери в электрических сетях от перетоков реактивных мощностей / *Ю.В.Владимиров, Т.А.Крамская* // Східно – європейський журнал передових технологій. – 2006/ 4/3 (22), С.46-49.

Bibliography (transliterated): 1. Metodika rozrahunkiv plati za peretoki reaktivnoi elektroenerghii mizh energopostachal'noju organizacijeu ta ii spozhivachami. *Oficijnij visnik Ukraini*, No. 1. 1998 Print. 2. Metodika obchislennja plati za peretikannja reaktivnoi elektroenerghii mizh elektroperedaval'noju organizacijeu ta ii spozhivachami. *Oficijnij visnik Ukraini* No. 6 2002 Print. 3. *Vladimirov Ju.V.* O metodike raschetov oplaty za peretoki reaktivnoj jelektrojenerghii mezhdju jenergosnabzhajushhej organizaciej i ee potrebiteljami *Jenergetika i jelektrifikacija*. 2002. No 11, 31-34. Print. 4. *Zorin V.V.* Ob oplate za peretoki reaktivnoj jenerghii v uslovijah rynchnyh otnoshenij. *Promelektro*. 2004. No. 4, 22-23 .Print. 5. Problejni pitannja kompensacii reaktivnoi potuzhnosti. *Promelektro*. 2004. No. 5. 4-17 Print. 6. Oficijnij veb-sajt Ministerstva energetiki ta vugil'noi promislivosti Ukraini [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://mpe.kmu.gov.ua>. 7. *Banin D.B.* Prakticheskie voprosy kompleksnoj sistemnoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti v jelektricheskijh setjah 110/35/10 kV jelektroperedajushhijh organizacij *Jelektricheskie seti i sistemy*. 2013. No. 3, 20-36. Print. 8. *Vladimirov Ju.V.* T.A.Kramskaja, L.S.Popazov Jekonomicheskaja celesoobraznost' polnoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti v linijah pitaniija potrebitelej. *Netradicijni i ponovljuval'ni dzherela energii, jak al'ternativni pervinnim dzherelam energii v regionii* : L'viv, LvCNTEI, 2003. 133-135. Print. 9. *Batjuk I.A., Vladimirov Ju.V.* Issledovanie vlijanija JeJeRM na

jeffektivnoe jekonomicheskoe regulirovanie peretokov reaktivnyh moshhnostej v jelektricheskijh setjah / *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut* No. 3. 2011. 8-11.Print. 10. *Vladimirov Ju.V.* O generacii i potreblenii reaktivnoj moshhnosti v jelektricheskijh sistemah *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: «Elektrotehnika i energetika»* No. 2(15). 2013. 59-63.Print. 11. *Vladimirov Ju.V.* T.A.Kramskaja Uchet faktora vlijanija nestacionarnosti nagruzki na poteri v jelektricheskijh setjah ot peretokov reaktivnyh moshhnoste. *Shidno – evropejs'kij zhurnal peredovijh tehnologij*. 2006 No. 4/3 (22), 46-49. Print.

Надійшла (received) 30.04.2015

Ю. В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»

ЗВАЛИЩА ТПВ ЯК ДЖЕРЕЛО ПОНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Однією з основних тенденцій розвитку сучасної енергетики є все більше використання нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії. В цьому ряду біомаса як джерело енергії займає не останнє місце та відповідно оцінкам Світової енергетичної ради і комітету ООН з нових та нетрадиційних джерел енергії буде одним з важливіших джерел енергії у XXI столітті. Вказано на економічні, екологічні та соціальні аспекти проблеми накопичення на полігонах та звалищах України твердих побутових відходів. Запропоновано вирішувати цю проблему за концепцією «Zero Waste».

Ключові слова: відходи, полігони, звалища, екологія, поновлювальна енергія, біомаса.

Вступ. Однією з основних тенденцій розвитку сучасної енергетики є все більше використання нетрадиційних та поновлювальних джерел енергії. В цьому ряду біомаса як джерело енергії займає не останнє місце та відповідно оцінкам Світової енергетичної ради і комітету ООН з нових та нетрадиційних джерел енергії буде одним з важливіших джерел енергії у XXI столітті. Нажаль на Україні цей напрямок розвитку поновлювальних джерел енергії покищо не знайшов державної підтримки.

Хоча данні про доцільний економічний потенціал біомаси на Україні суттєво різняться, наприклад, оприлюднені у 1996 р. данні Енергетичного Центру Європейського Союзу у Києві (програма TACIS/91-E006), данні які використовувались при підготовці енергетичних менеджерів за програмою TACIS №EUK9406 та данні наведені у [1], але у всіх цих даних потенціал біомаси суттєво вищий за потенціал вітрової енергії, яка знайшла державну підтримку.

Мета роботи: довести доцільність використання потенціалу біомаси в Україні, як джерела поновлювальної енергії і в першу чергу твердих побутових відходів.

Результати досліджень: Як відомо розподіл біомаси на первинну (рослини) та вторинну (відходи) накладає свої умови її використання. За оприлюдненими ООН даними в світі більш ніж мільярд мешканців планети страждають від голоду, тому використання сільськогосподарчих земель для вирощування технічних культур на

© Ю. В. Владимиров, 2015

біомасу є, принаймні, аморальне. Що до України, то це приведе до росту цін на продукти харчування та збільшення їх імпорту. дерев та чагарників на біомасу веде до кліматичних ризиків, як то повеней і зсувів ґрунту. Тому використання первинної біомаси слід максимально обмежити, а використання сільськогосподарчих земель для вирощування технічних культур на біомасу взагалі заборонити на законодавчому рівні. Однією з гостріших проблем сучасного суспільства є прогресуюче накопичення відходів. Україна не є виключенням з цього процесу. Особливе місце у цій проблемі займає утилізація твердих побутових відходів (ТПВ). Проблема утилізації ТПВ не є новою та актуальною для всіх країн світу. Нажаль у більшій частині країн світу, у тому числі в Україні, ця проблема вирішується шляхом захоронення ТПВ на полігонах та звалищах. Особливо слід відзначити, що екологічні наслідки захоронення ТПВ на полігонах та звалищах спричиняють великі соціальні проблеми у вигляді протестів або навіть бунтів мешканців прилеглим к цим полігонам населених пунктів. З іншого боку забувається, що ТПВ є джерелом промислових ресурсів, у т.ч. і паливно-енергетичних, при цьому це джерело є найдоступнішим, дешевим та майже невичерпним. Слід також відзначити, що енергія яка міститься у ТПВ сконцентрована в селітебних зонах, а не розподілена, наприклад, на величезній території як сонячна та вітрова енергія.

Загальний обсяг відходів на 2010 рік в Україні оцінено в 35 млрд. т [2]. Обсяг річного утворення відходів на цей час оцінюється від 1050 млн. т до 1190 млн. т, в т.ч. 400-420 млн. т відходи рослинництва, тваринництва, птахівництва, харчової промисловості та побутові - 24-27 млн. т [3]. Загалом в Україні на полігонах та звалищах накопичено понад 1 млрд.м³ (250млн. т) ТПВ. Зібрані ТПВ захоронюються на 4 тис. сміттєзвалищ і полігонів, загальною площею майже 7,4 тис. га [2]. Крім того існує майже півмільйона стихійних звалищ, займаючих майже 1 млн. га [3]. Тільки у 2012 році в Україні створено 54 млн.м³ ТПВ [4].

Автор цієї статті ще у 1997 р. [5] вказував на необхідність прийняття Державної програми України з питання використання ТПВ як джерела енергії. Слід мати на увазі, що інвестиції у цю проблему мають не лише економічний сенс, а ще більш вагомий -- екологічний та соціальний, при цьому треба ще раз наголосити, що пряме спалювання біомаси (у вигляді ТПВ) є самим неефективним

(недоцільним) методом видобутку енергії як з економічної точки зору так і з технологічної та екологічної.

Вчені Харківського національного медичного університету своїми дослідженнями довели, що технології полігонного захоронення ТПВ ведуть до забруднення оточуючого середовища, ґрунтових та артезіанських вод і завдає суттєвої шкоди умовам мешкання населення. Наприклад, питна вода у колодязях та джерелах біля полігону у Дергачах (м. Харків) стала епідемічно небезпечною по показникам загальної мікробної обсеменюваності та шкідливою за хімічним складом, що підтверджується високими концентраціями хрому, кадмію, барію, титану (від 10 до 40 ПДК). Крім того у літній період полігон горить та стає джерелом утворення сполук діаксинової групи (групи стійких органічних забруднювачів) [6].

В той самий час у розвинених країнах набула поширення концепція «нульових відходів» (Zero Waste) Робіна Мюррея. Вона передбачає перехід від розгляду відходів, як шкідливих забруднюючих речовин, які необхідно ізолювати і контролювати, до потенційних дешевих джерел корисних елементів, матеріалів та енергії [7]. Наприклад, за згаданою технологією з 1 кг органічних відходів можна отримувати від 0,25л високооктанового бензину або 1л спирту [2].

ТПВ як джерело поновлюваної енергії має величезний потенціал. Використання цього джерела енергії вирішує не лише енергетичні питання, а що ще важніше, екологічні та соціальні, які оцінити у грошовому вираженні майже не можливо.

Настав час, коли слід повністю відмовитись від видалення відходів на полігони та звалища. Тому рішення нахшталт видобутку біогазу безпосереднє на звалищах (відповідно до [7] утилізація метану з біогазу на полігоні потужністю до 500 тис.м³ ТПВ за рік, щорічно впродовж 20 років можливо здобувати близько 1 тис.м³ метану) є економічно доцільним, але не є комплексним вирішенням згаданої проблеми.

Слід також відзначити що пропозиції ряду спеціалістів щодо вирішення проблеми повної безвідходності переробки ТПВ за рахунок повсюдного впровадження роздільного збирання відходів [2], а також улаштування площадок збору попереднього сортування ТПВ (наприклад, для 3–7 будинків) [4], на думку автора є недоцільним.

По-перше, менталітет населення України неможливо змінити за декілька років, на це треба декілька десятків років (термін у два – три покоління), тому очікувати що населення буде сумлінно виконувати вимоги роздільного збирання відходів не варто казати.

По-друге, облаштування проміжних стаціонарних пунктів сортування ТПВ є розпорошенням коштів на вирішення цієї проблеми, а крім того, що є більш суттєвим, поблизу цих пунктів будуть утворюватися небезпечні екологічні зони у безпосередній близькості до житлових будинків.

Тому автор вважає що є доцільним будівництво за концепцією «Zero Waste» комбінатів по повній безвідходній переробці ТПВ з сортуванням безпосереднє на них відходів, використовуючи всі новітні технології.

Враховуючи, що питомі показники їх утворення наразі складають близько 1 кг/добу на душу населення і мають тенденцію до зростання [2], такі комбінати доцільно будувати біля міст з населенням, що мають найменш 300 – 350 тис. мешканців. ТПВ належить постачати на ці комбінати безпосереднє з контейнерів селітебних зон за допомогою відходозбірних машин, а також поступово з діючих на цей час і закритих звалищ і полігонів з метою звільнення земель для подальшої їх рекультивації. Отриманий з ТПВ біогаз слід постачати на міські теплові електричні станції, де він може спалюватись у топках котлів у суміші з природним газом або самостійно [5]. Проте, як слушно відзначено у [2], досягнути прориву у цьому напрямі можливо лише за наявності політичної волі вищих владних структур та застосуванні як економічних, так і адміністративних засобів впливу.

Слід позначити, що вирішення даної проблеми дозволить підвищити енергетику та екологічну безпеку України.

Висновки. 1. ТПВ є доступнішим та дешевим джерелом поновлюваної енергії, використання якого дозволить Україні частково вирішити енергетичне питання та автоматично розв'язати екологічні та соціальні питання, пов'язані з накопичуванням відходів. 2. Розробити та прийняти Державну програму України щодо поводження с ТПВ як з джерелом енергії. 3. Реалізувати будівництво у найближчі 5–6 років комбінатів з повної безвідходної переробки ТПВ біля мегаполісів, у першу чергу з метою отримання вуглеводневих енергоносіїв.

Список літератури: 1. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников/ Н.М. Мхитарян – К.: Наукова думка, 1999.- 320с. 2. Гулий А.В. Переробка відходів виробництва та споживання як елемент ресурсо- та енергозбереження /А.В.Гулий: сб. трудов XVIII Междунар. научн.-практ. конф. [«Экология энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека , утилизация отходов»], (г.Щелкино, АР Крым, 7-11 июня 2010г.): в 2т. Т2./ М-во пром.политики Укр.ГНТЦ «Энергосталь».- Х.: НТМТ, 2010.-с.396-400. 3. Горлицкий Б.А. Экологоресурсные проблемы обращения с отходами в Украине/ Б.А.Горлицкий :сб. трудов XXI Междунар. научн.-практ. конф. [«Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго и ресурсосбережения»], (г.Щелкино, АР Крым, 3-7 июня 2013 г.): в 3т. Т3./ М-во пром.политики ГП «Укр.ГНЦ «Энергосталь».- Х.: НТМТ, 2013.-С.208 -219 4. Ткачев А.З Площадка для сбора и сортировки твердых бытовых отходов / [Ткачев А.З, Шевченко Л.Я., Слепцов Г.В., Слепцова О.В.]: сб. трудов XXI Междунар. научн.-практ. конф. [«Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго и ресурсосбережения»], (г.Щелкино, АР Крым, 3-7 июня 2013 г.): в 3т. Т3./ М-во пром.политики ГП «Укр.ГНЦ «Энергосталь».- Х.:НТМТ, 2013.- С.288 -291. 5. Владимирюв Ю. Миське сміття – джерело електричної та теплової енергії /Юрій Владимирюв : доповіді 2-ї Міжнар. наук.- практ. конф. [«Управління енерговикористанням»], (Львів, 3-6 червня 1997 р.) / М-во освіти України, Державний університет «Львівська політехніка». –Л.: Міжгалуз. ін-т підвищення кваліфікації ДУ «ЛП», 1997. –С.134. 6. Загородний І.В. Влияние полигонов захоронения твердых бытовых отходов на окружающую среду и здоровье населения, на примере Держачевского полигона / [Загородний І.В., Сидоренко Н.А. , Щербань Н.Г. и др.] сб. трудов ХУШ Междунар. научн.-практ. конф. [«Экология энерго и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека , утилизация отходов»], (г.Щелкино, АР Крым, 7-11 июня 2012г.): в 2т. Т2./ М-во пром.политики Укр.ГНТЦ «Энергосталь».- Х.: НТМТ, 2012.- С.540-542. 7. Мюррей Р. Цель - Zero Waste /Р. Мюррей; [перев.с англ. Горничко В.О.]. – М.: ОМНОО «Совет Гринпис», 2004. - 232 с..

Bibliography (transliterated): 1. Mhitarjan N.M. *Jenergetika netradicionnyh i vobnovljajemyh istochnikov*. Kiev Naukova dumka, 1999. Print. 2. Gulij A.V. *Pererobka vidhodiv virobnytva ta spozhivannja jak element resurso- ta energozberezhenja : sb.trudov konferencij: Jekologija jenergo- i resursosberezhenie, ohrana okruzhajushhej sredy i zdorov'e cheloveka , utilizacija othodov* Kharkiv. NTMT. 2010. 396-400. Print. 3. Gorlickij B.A. *Jekologoresursnye problemy obrashhenija s othodami v Ukraine. sb.trudov konferencij: Innovacionnye puti reshenija aktual'nyh problem bazovyh otraslej, jekologii, jenergo i resursosberezhenija* Kharkiv. NTMT, 2013. 208-219 Print.4. Tkachev A.Z *Ploshhadka dlja sbora i sortirovki tverdyh bytovykh othodov* 2013. 288-291. Print 5. Vladimirov J. *Mis'ke smittja – dzherelo elektrichnoi ta teplovoi energii* Lviv.: 1997. 134.Print 6. Zavgorodnij I.V. *Vlijanie poligonov zahoronjenja tverdyh bytovykh othodov na okruzhajushhuju sredu i zdorov'e naselenija, na primere Dergachevskogo poligona sb.trudov konferencij: Jekologija jenergo i resursosberezhenie, ohrana okruzhajushhej sredy i zdorov'e cheloveka , utilizacija othodov* Kharkiv. NTMT. 2012. 540-542. Print 7. Mjurrej R. *Cel' Zero Waste* Moscow OMNOO «Sovet Grinpis», 2004. Print.

Надійшла (received) 30.04.2015

В. В. ВОЛОХІН, канд. техн. наук, доцент, СумДУ, Суми;
М. В. ПЕТРОВСЬКИЙ, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
 СумДУ, Суми;
С.Ю. ШЕВЧЕНКО, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
О. О. ІВАНОВ, аспірант, СумДУ, Суми;
С. О. ІВАНОВ, студент, СумДУ, Суми;
О. І. ІГНАТОВА, студент, СумДУ, Суми

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРЯМЛЕНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ PSCAD\EMTDC

Моделювання напрямленого дистанційного захисту лінії електропередач реалізоване в програмному комплексі PSCAD\EMTDC, а також порівняно дві характеристики спрацювання дистанційного органу, а саме кругову і багатокутну. Розроблений алгоритм пускового органу, який завдяки контролю векторного приросту струмів зворотної послідовності запобігає фальшивим спрацюванням при коливаннях електричної системи і асинхронному ході генераторів.

Ключові слова: моделювання, дистанційний захист, дистанційний орган, пусковий орган, коливання, асинхронний хід.

Постановка проблем та аналіз літератури. Надійність функціонування електроенергетичних систем в нормальних і особливо аварійних і після аварійних режимах значною мірою визначається правильністю роботи засобів релейного захисту та автоматики (РЗА), у тому числі дистанційного захисту (ДЗ), що застосовується в якості основного і резервного захисту ліній електропередачі, резервних захистів автотрансформаторів [2]. Дистанційний принцип також використовується при реалізації захистів від втрати синхронізму синхронних генераторів, в пристроях автоматики ліквідації асинхронного режиму і в ряді інших засобів РЗА. При цьому згідно узагальненої статистики неправильне функціонування РЗА, що спричинило аварійні зміни експлуатаційного стану або режиму роботи зазначених елементів електроенергетичних систем, в 25 відсотках випадків служить причиною важких аварій. Оскільки поломки, дефекти, помилки персоналу, стихійні лиха в даній статистиці також враховані, основною причиною неправильного функціонування РЗА є невідповідність їхнього налаштування конкретним режимним умовам [5].

© В. В. Волохін, М. В. Петровський, О. О. Іванов, С. О. Іванов, О. І. Ігнатова, 2015

В силу того, що натурні експерименти в електроенергетичних системах, особливо аварійного характеру, як правило, не припустимі, а також зважаючи на надмірні складності повноцінного фізичного моделювання електроенергетичних систем, основним інструментом для налаштування і аналізу функціонування РЗА є математичне моделювання електроенергетичних систем.

Мета роботи – Змодельовати дистанційний релейний захист в програмному комплексі PSCAD/EMTDC; порівняти найбільш розповсюджені типи характеристик спрацювання ДЗ; експериментально дослідити реалізовану модель для підтвердження справедливості основних теоретичних положень.

Основна частина. Для дослідження ДЗ нами було обрано лінію електропередач з номінальною напругою 220 кВ виконаною проводом марки АС-300\39. Ця система живиться від двох джерел. Схема заміщення електричної мережі, що зображена на рисунку 1 відповідає системі змодельованій в програмному комплексі PSCAD\EMTDC (рис. 2) до якої входять наступні компоненти: B1, B2 – Three-Phase Breaker (імітує функцію трифазного електричного вимикача); M1, M2 – Multimetr (елемент, який вимірює основні електричні величини); блоки AB, BC, CD – Line Configuration (імітують відповідні ділянки лінії електропередач); S – Fixed Load (імітує функцію трифазного електричного навантаження); KZ – Three-Phase Fault (використовується для імітації пошкоджень в трифазній мережі змінного струму); RS – Rotary Switch (виконує функцію перемикача на десять позицій виду короткого замикання).

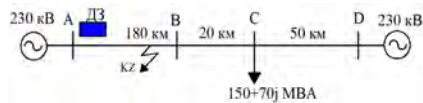


Рис. 1 – Схема заміщення електричної мережі

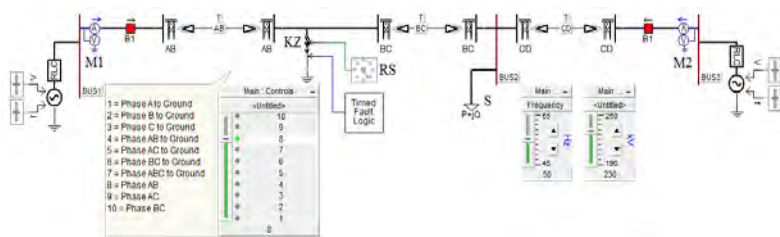


Рис. 2 – Схема для імітації пошкоджень лінії електропередач

Матиматична модель повітряної лінії електропередач враховує положення провідників відносно землі, величину стріли підвісу, та наявність грозозахистних тросів, параметри ґрунту.

Для побудови даного захисту ми використовували наступні компоненти вибрані з бібліотеки PSCAD\MTD: Fast Fourier Transform розкладає вхідний сигнал, в нашому випадку струм захищуваної схеми фази А, Б, С, на значення амплітуд гармонічних складових та відповідні значення фази зсуву; Sequence Filter здійснює лінійне перетворення вхідних значень амплітуд і фаз струмів в величини, пропорційні симетричним складовим трифазної системи у вигляді модуля і фазного кута; у блоці Line to Ground Impedance відбувається розрахунок фазних та міжфазних опорів; Формування умов спрацьовування полягає в завданні координат точок характеристики спрацьовування - уставки органу опору Trip Polygon.

Підчас виконання даної роботи нами було порівняно два види характеристик спрацювань дистанційного органу (ДО) кругову і багатокутну (рис. 3).

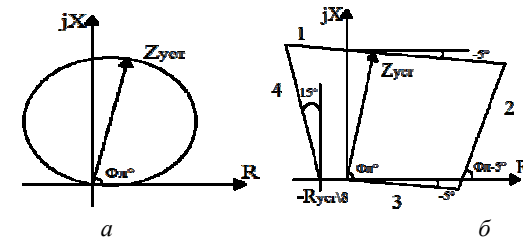


Рис. 3 – Характеристики ДО: а – кругова; б – багатокутна

На вигляд цієї характеристики впливає безліч факторів:

- перехідний опір в місці пошкодження;
- вплив режиму навантаження;
- вплив режиму хитань і асинхронного ходу.

Наявність цих факторів потребує як розширення області спрацювання ДО для забезпечення охоплення можливих пошкоджень, так і звуження цієї області для забезпечення неспрацьовування при пошкодженнях поза захищуваної зони і в режимах відсутності пошкоджень.

Кругова характеристика є найбільш розповсюдженою оскільки її побудова і експлуатація є найлегшими. В свою чергу багатокутна має такі переваги: сторона 1- забезпечує підвищення селективності ДЗ при дугових замиканнях; сторона 2 – зменшує вплив перехідного опору;

сторона 3 – забезпечує спрацювання при близьких коротких замиканнях (КЗ) від місця установки ДЗ; сторона 4 – враховує похибки ДО в статичному і динамічному режимах [4].

В якості показника, що характеризує швидкодію ДО ми використовували залежність часу спрацювання ДО від співвідношення опору між місцем установки ДЗ і місцем КЗ до опору захищеної ділянки лінії, тобто коефіцієнта αk , який розраховується за такою формулою:

$$\alpha k = \frac{Z_k}{Z_l}$$

де Z_k - опір ділянки лінії від місця установки захисту до місця КЗ;

Z_l - опір захищеної ділянки лінії.

Експериментально порівнявши дві вище згадані характеристики можна зробити висновок (рис. 4), що час спрацювання ДО з багатокутною характеристикою менший ніж у круговій при будь-якому виді короткого замикання. Тому у подальших розрахунках будемо опиратись саме на багатокутну характеристику.

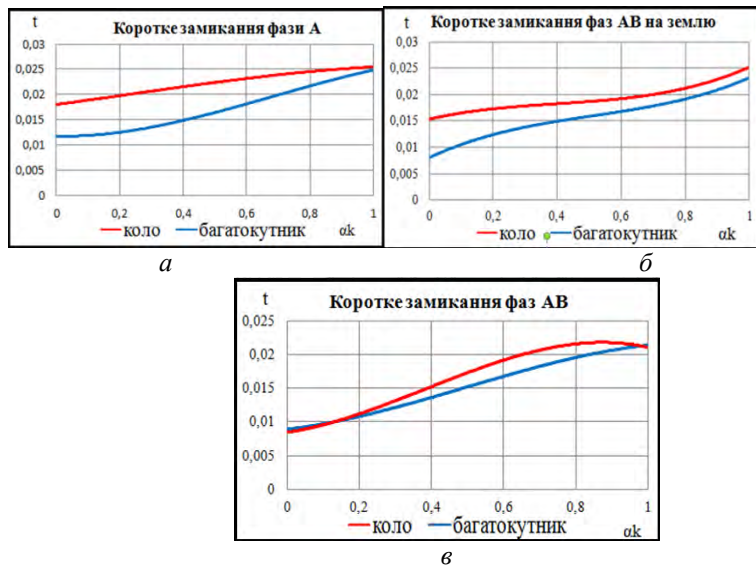


Рис. 4 – Порівняння характеристик спрацювання ДО: а – коротке замикання фази А; б – коротке замикання фаз А, В на землю; в – міжфазне коротке замикання

Для усунення помилкового спрацювання при хитаннях та асинхронному ході генераторів запропоновано алгоритм, який базується на виділенні векторного приросту струму зворотної послідовності.

На рис. 5, а) зображено векторну діаграму струмів зворотної послідовності в момент КЗ на початку і вкінці проміжку часу. Різниця між цими струмами і є показником режиму КЗ. Осцилограма приросту струмів зворотної послідовності зображено на рисунку 5, б.

Даний алгоритм був реалізований в програмі PSCAD за допомогою наступних блоків (рис.6): 1 – інерційний орган; 2 – компаратор; 3 – утримувач сигналу; 4 – сума/різниця сигналів; 5 – дійсна константа; 6 – утворювач синусоїдального сигналу.

Підчас асинхронного ходу генераторів ДО спрацьовує майже миттєво без КЗ. В свою чергу сигнал ПО його блокує. При асинхронному ході генераторів і КЗ між фазами АВ подається сигнал на спрацювання ДЗ.

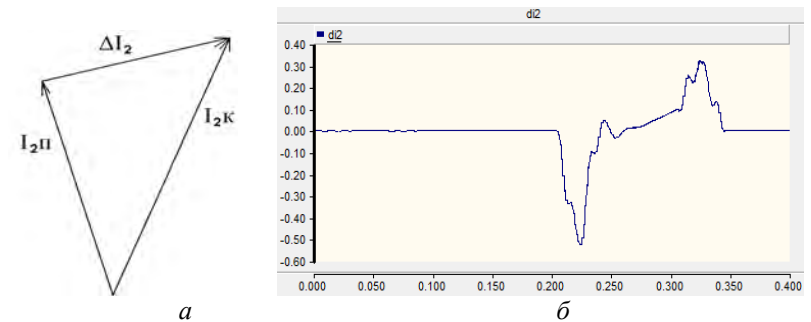


Рис. 5 – Характеристики ДО: а – векторний приріст струму зворотної послідовності; б – приріст струму зворотної послідовності при КЗ між фазами АВ

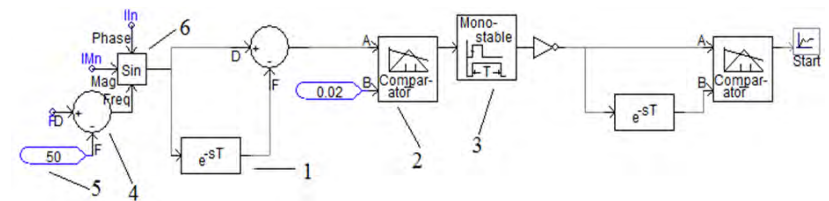


Рис. 6 – Принцип побудови ПО

На рисунку 7 показана залежність часу спрацювання від коефіцієнта αk . З цієї залежності можна зробити висновок, що час спрацювання ДЗ при асинхронному ході і різних видах КЗ максимально відповідає часу спрацювання реального ДЗ.

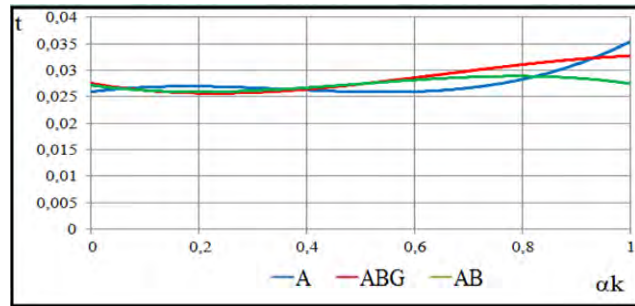


Рис. 7 – Залежність часу спрацювання ДЗ при асинхронному ході генераторів і різних видах КЗ

Висновки. Запропонована математична модель дозволяє в режимі реального часу проводити різноманітні маніпуляції над розробленою схемою та спостерігати всі процеси, які відбуваються в системі. Всі процеси, що відбуваються в математичній моделі відповідають тим процесам, що проходять в реальній системі. Було експериментально доведено, що багатокутна характеристика є більш точною у порівнянні з круговою. Багатокутна характеристика дозволяє зменшувати вплив перехідного процесу, підвищувати селективність ДЗ при дугових замиканнях, забезпечувати спрацювання при близьких КЗ від місця установки ДЗ, враховувати похибки ДО в статичному та динамічному режимах. Запропонований алгоритм роботи ДО, дозволяє виключити хибні спрацювання ДЗ в режимі асинхронного ходу та хитання електричної мережі, завдяки контролю приросту струму зворотної послідовності.

Список літератури: 1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем / Федосеев А. М. – М. : Москва, 1992. – 266 с. 2. Александров А.М. Дифференциальные защиты трансформаторов / Александров А. М. – М. : Санкт-Петербург, 2005. – 216 с. 3. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения / Циглер Г. – Под ред. А.Ф.Дьякова. – Энергоиздат, 2005. – 273с. 4. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита / Шнеерсон Э.М. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549с. 5. Ершов Ю.А. Электроэнергетика. Релейная защита и автоматика: учеб. пособие по курсовому проектированию релейной защиты и автоматики ЭЭС на базе

микропроцессорных устройств/ Ершов Ю.А., Халезина О.П., Малеева А.В., Перехватов Д.П. – Красноярск: ИПК СФУ, 2011. – 82с. 6. Кривенко В.В. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения/ Кривенко В.В., Новелла В.Н. – М.: Энергоиздат, 1981. – 328с.

Bibliography (transliterated): 1. Fedoseev A.M. *Relejnaja zashhita elektroenergeticheskikh sistem* 1992. Print. 2. Aleksandrov A.M. *Differencial'nye zashhity transformatorov* Sankt-Peterburg, 2005. Print. 3. Cigler G. *Cifrovie ustrojstva differencial'noj zashhity. Principy i oblast' primenija.* – Moscow. Jenergoizdat, 2005. Print. 4. Shneerson Je.M. *Cifrovaja relejnaja zashhita* Shneerson Je.M. – M. : Jenergoatomizdat, 2007. – 549s. 5. Ershov Ju.A. Halezina O.P., Maleeva A.V., Perehvatov D.P. *Jelektrojenergetika. Relejnaja zashhita i avtomatika: ucheb. posobie po kursovomu proektirovaniju relejnoj zashhity i avtomatiki JeJeS na baze mikroprocessornyh ustrojstv* Ershov Ju.A., – Krasnojarsk: IPK. 2011. Print. 6. Krivenko V.V. *Relejnaja zashhita i avtomatika sistem jelektrosnabzhenija.* Moscow Jenergoizdat, 1981. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

О.Г. ГРИБ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
С.Ю. ШЕВЧЕНКО, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Д.А. ГАПОН, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
А. В. ЛЕЛЕКА, ведущий инженер ГП НЭК «Укрэнерго»;
Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА, ассистент, НТУ «ХПИ».

СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В современном обществе наблюдается резкое повышение требований к эффективности энергообеспечения широкого круга потребителей, обеспечение надежности энергоснабжения и качества электрической энергии. Это может достигаться путем интеллектуализации энергетических сетей на основе положений концепции Smart Grid. Одним из основных сегментов этой системы являются цифровые подстанции (ЦПС), которые позволяют сегодня модернизировать и развить энергетику. Термин «Цифровая подстанция» означает подстанцию, на которой доступ к информации, ее передача и обработка производится в цифровом виде.

Ключевые слова: система, цифровая подстанция, диспетчеризация, диагностика, электроэнергия, качество.

Вступление. Решение проблемы оптимизации производства, снабжения и потребления электрической энергии возможно только при усовершенствовании системы технологического процесса на базе цифровых подстанций. В цифровых подстанциях используются встроенное первичное оборудование интеллектуальных устройств, применение локальных вычислительных сетей для автоматизации процессов управления. Цифровая подстанция является основным сегментом интеллектуальной сети Smart Grid, которая содержит современные интеллектуальные устройства [1-2].

Анализ последних исследований и литературы. Для успешного развития автоматизации процессов передачи, и распределения электроэнергии используется система диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций.

Основными разработчиками концепции цифровой подстанции являлись следующие организации:

- EPRI (Electric Power Research Institute) – Американский Институт Исследований в Электроэнергетике;

© О. Г. Гриб, С. Ю. Шевченко, А. В. Лелека, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, 2015

- IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Международный Институт Инженеров Электроники и Электротехники;

- CIGRE (International Council on Large Electric Systems) – постоянная негосударственная и некоммерческая международная организация.

Для внедрения цифровых подстанций необходимо разработать общую концепцию технического задания на проектирование цифровой подстанции. В это техническое задание входит построение программно-аппаратного комплекса цифровых подстанций в электрических сетях, кроме того необходимо определить основные требования, которые должны удовлетворять проектируемые цифровые подстанции.

Данные подстанции оснащены интеллектуальным оборудованием с применением электронных измерительных трансформаторов с цифровыми выходами, выключателей со встроенными контроллерами управления, традиционных выключателей, оснащаемых внешним контроллером управления, что позволило создать программно-аппаратный комплекс подстанции, в стандарте МЭК 61850. Данный стандарт регламентирует представление данных о подстанции как объект автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными устройствами подстанции, включая устройства контроля и управления, релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, интеллектуальных счетчиков электроэнергии.

Для обмена информацией между первичным и вторичным оборудованием применяются оптические кабели, по которым в цифровом закодированном виде передается информация о мгновенных значениях параметров и управляющие команды.

Цель статьи. Создать систему диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций.

Постановка проблемы. В настоящее время актуальной проблемой является создание системы диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций, в которых организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме.

Материалы исследований. На цифровых подстанциях технологическую информацию можно разделить на два вида[1]:

- обязательная информация которая поступает на диспетчерский пункт;
- дополнительная информация которая необходима для функционирования подстанции, и поступает на диспетчерский пункт по запросу диспетчера.

К первым относятся:

- частота;
- перетоки мощности;
- состояние выключателей;
- напряжения на секциях шин;
- информация срабатывания защит и аварийной сигнализации;
- информация об электропотреблении и качестве электроэнергии;
- баланс мощности и электроэнергии на подстанции;
- информация о несанкционированном доступе к интеллектуальным устройствам или информации, а также кибератаках на сервер подстанции.

Ко вторым относятся:

- информации о состоянии схемы соединений и параметров режима функционирования оборудования ЦПС;
- данные от средств регистрации аварийных событий и процессов подстанций;
- данные от устройств РЗА и ПА;
- данные от устройств определения места повреждения в высоковольтных линиях;
- данные от подсистем мониторинга и диагностики силового оборудования ЦПС и воздушных линий электропередачи;
- данные от инженерных и вспомогательных систем ЦПС;
- данные от систем метеонаблюдения;
- информация от систем видеонаблюдения.

Результаты исследований. Оборудование цифровой подстанции использует цифровые сети передачи данных для обмена информацией о значениях параметров, положениях коммутационных аппаратов, передачи управляющих команд. Этим исключается применение большого количества контрольных кабелей на подстанции. Требования к реализации сетей передачи данных, составу информации и методам передачи определяются стандартом IEC 61850. На цифровой подстанции должны присутствовать такие системы, как система диагностики и мониторинга состояния силового оборудования, система анализа аварий, система управления переключениями. Наличие таких автоматизированных систем увеличивает общий уровень автоматизации подстанции, упрощает проведение ремонтно-

восстановительных работ, оптимизирует состав и периодичность работ по проведению технического обслуживания.

На базе статистики технологической информации можно решать задачи необходимые для перспективного развития энергосистемы и эксплуатации электрооборудования[1-2]:

- планирование и проведение ремонтов оборудования;
- стратегическое планирование развития сети;
- оценка состояния оборудования и общая оценка надежности энергосистемы;
- расследование аварийных ситуаций;
- анализ режимов работы электрических сетей;
- анализ потребления и распределения электрической энергии с учетом качества и определения ответственного за ее ухудшение;
- оценка принятых решений диспетчерского персонала и условий эксплуатации на состояние оборудования;
- статистический анализ надежности работы оборудования.

Цифровые подстанции можно объединить в единую информационную сеть обмена информации между ними, что позволит повысить надежность работы электрооборудования и упростить работу диспетчеров. Подстанции имеют территориальную привязку, что позволяет использовать в информационно управляющих системах такой программный продукт, как геоинформационные технологии, по информационным срезам которых можно идентифицировать состояние оборудования цифровой подстанции.

Выводы. Система диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций позволяет повысить надежность работы энергосистемы, путем диагностики состояния оборудования и контроля режимов работы сети в автоматическом режиме. Цифровые подстанции являются удаленным объектом в котором используется IT – технологии. Необходимо защитить их от несанкционированного доступа и кибератак на интеллектуальные устройства измерения и диагностики, а также на сервер подстанции, в котором хранится архивированная и текущая информация.

Список литературы: 1.Максимов В.В., Сипачев К. Е. Система сбора и передачи технологической информации ОАО «ФСК ЕЭС» / «Релейщик №4». 2009 – С.44 – 50. 2. Васильченко В.І., Гриб О.Г., Лелека О.В., Гапон Д.А., Іерусалімова Т.С. Цифрова підстанція складова системи “Smart Grid” / Науково – практичний журнал 2014/6 Електротехніка і електромеханіка. – Харків НТУ «ХПИ». – 2014. – С. 72 – 76.

Bibliography(translation): 1. Maksimov V., Shipachev K. System for the collection and transfer of technological information of JSC «UES FGC» *Relay* No. 4 . 2009. 44 - 50. Print.
2. Vasilchenko V., Gryb O., Leleka A., Gapon D., Ierusalimova T. Digital substation component of the system “Smart Grid” 2014/6 *Electrical engineering and electromechanics.* – Kharkov. 2014. No. 6. 72 - 76. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.384.6

А. Г. ГУРИН, докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
Е. А. КОРНИЛОВ, докт. физ.-мат. наук, проф. ННЦ «ХФТИ», Харьков
Р. С. ЛОЖКИН, ст. преп. НТУ «ХПИ»

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

В статье рассмотрена возможность применения импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции с изоляцией из радиационно-сшитого полиэтилена. Проведен сравнительный анализ с другими типами ускорителей, применяемыми для этих целей.

Ключевые слова: импульсно-периодический сильноточный индукционный ускоритель электронов; радиационная сшивка полиэтилена.

Введение. В настоящее время радиационная технология находит все более широкое применение в промышленности. В общем виде под этим термином подразумевается воздействие на вещество излучений высокой энергии с целью изменения его свойств. Основным физическим явлением, используемым при этом, является неупругое рассеяние быстрых электронов или квантов электромагнитного излучения в обрабатываемом объекте, при котором в нём образуется большое число вторичных электронов низкой энергии, происходит ионизация и возбуждение атомов, разрыв молекулярных связей, образование высокоактивных свободных радикалов. Образовавшиеся частицы — инициаторы разнообразных химических реакций, вызывающих требуемые изменения свойств облучаемого объекта: сшивку полимеров, полимеризацию мономеров, прививку молекул одного вещества к другому, деструкцию, синтез новых соединений и т.д. В радиационной технологии можно получать многие материалы с лучшими, а иногда и с качественно новыми свойствами. Одно из таких направлений – радиационная модификация полимеров электронным пучком, при которой происходит сшивка его молекул, т.е. образование поперечных связей между ними. Это приводит к значительному повышению прочности и термостойкости облучаемых изделий. Провода и кабели с такой изоляцией могут эксплуатироваться при

© А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин, 2015

более высоких температурах и токовых нагрузках, в сложных условиях, где ранее использовались провода и кабели с дорогостоящей изоляцией из фторопласта [1].

Полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и другие полимеры обладают рядом ценных свойств, таких как низкие плотность, влагопоглощение и газопроницаемость, высокие диэлектрические показатели и химическая стойкость, что позволяет широко использовать эти материалы и для изготовления труб и различных фасонных изделий, предназначенных для строительной промышленности, нефтегазового комплекса, коммунального хозяйства, в первую очередь в водоснабжении и для отопления.

В последние годы наблюдается неуклонный рост заинтересованности в использовании полимерных трубопроводов вместо металлических, что связано с рядом их преимуществ. В процессе эксплуатации металлические трубопроводы подвергаются сильной коррозии из-за повышенной влажности, кислотности грунтов, высоких температур, что требует значительных затрат на их изоляцию и замену. Лучшими их заменителями признаны полимерные трубы с использованием радиационно-модифицированного полиэтилена [2].

1. Сравнительный анализ устройств генерации электронных пучков. В настоящее время для радиационной модификации наиболее широко применяются электронные пучки, генерируемые высоковольтными ускорителями постоянного тока и резонансными ускорителями. Сравнение экономических и энергетических характеристик этих ускорителей с характеристиками импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей (табл. 1) [3] делает привлекательным рассмотрение возможности применения последних в радиационной технологии.

Таблица 1 - Параметры различных типов ускорителей

Параметр	Ускоритель пост. тока	Резонанс. ускоритель	Индукц. ускоритель
КПД, %	70-90	<25	50-80
Цена, долл./Вт	10-20	80-200	4-20

Также привлекательным проведение такого анализа делает тот факт, что в настоящее время в технике достигнут прогресс по нескольким направлениям:

1) разработаны высоковольтные сильноточные тиратроны нового типа (ТПИ), обладающие малым фронтом коммутации (на уровне 10 нс), способные работать с высокой рабочей частотой посылок

импульсов и имеющие большой срок службы [4], что сделало возможным разработку на их основе импульсно-периодических высоковольтных сильноточных модуляторов большой средней мощности, работающих в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, характерном для ускорителей индукционного типа;

2) разработаны сильноточные взрыво-эмиссионные катоды с большим сроком службы [5-9];

3) разработан механически прочный и нагревостойкий углерод-углеродный композиционный материал, из которого стало возможным изготовление выпускных окон с большой рабочей площадью, позволяющей выводить в обрабатываемую среду пучки электронов вплоть до мегаваттного уровня [10, 11].

В диапазоне промышленно освоенных в настоящее время для радиационной технологии энергий электронного пучка 0,4-4 МэВ средняя мощность большинства существующих резонансных ускорителей находится в диапазоне до 100 кВт, ускорителей постоянного тока – до 200 кВт. Индукционные ускорители не имеют ограничений по максимально достижимой средней мощности пучка во всём диапазоне энергий вплоть до мегаваттного уровня. Повышение мощности пучка привлекательно с точки зрения повышения производительности установок и удешевления техпроцесса.

У большинства применяемых в настоящее время высоковольтных ускорителей постоянного тока и резонансных ускорителей в их конструкции присутствует протяженный линейный ускорительный тракт, в конце которого расположено «щелевое» выпускное окно, через которое «сканирующий» пучок выводится в атмосферу. Из-за одностороннего выведения пучка возникает необходимость в применении специальных устройств для всестороннего однородного облучения изделия, если оно имеет осесимметричную форму и большой диаметр, что достигается различными способами [12]: многократным проведением облучаемого изделия мимо выпускного окна после прохождения поворотных валиков; вращением самого облучаемого изделия вокруг своей оси при его движении вдоль выпускного окна; применением нескольких облучающих устройств, размещенных под разными углами; поворотом электронного пучка, выведенного в атмосферу, в сторону облучаемого изделия сопровождающим магнитным полем. Недостатком некоторых таких устройств является наличие неиспользуемых зон облучения («просветов») и в некоторых случаях увеличенной длины пробега электронов в воздухе. Это приводит к дополнительным

ионизационным потерям электронного пучка в атмосфере, что снижает энергоэффективность облучающего устройства.

Достоинством ускорителя индукционного типа является то, что он может быть выполнен однозорным, нагруженным на осесимметричный взрывоземиссионный ножевой катод, если секция ускорителя выполнена крупносекционированной, в виде линейного импульсного трансформатора (рис. 1) [13, 14]. В таком ускорителе нет

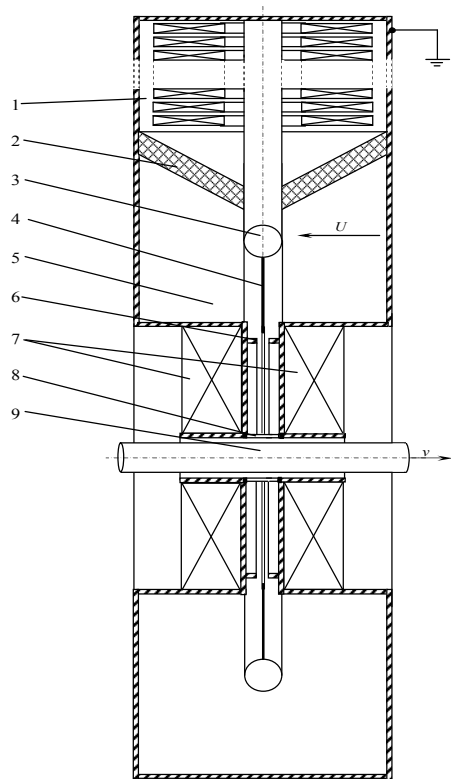


Рис. 1 – Разрабатываемое облучающее устройство на основе индукционного ускорителя электронов: 1 – секция индукционного ускорителя; 2 – вакуумный изолятор; 3 – тороидальный экран ножевого катода, подключенного к центральному электроду секции ускорителя; 4 – ножевой осесимметричный взрывоземиссионный катод; 5 – вакуумная ускорительная камера; 6 – анодная диафрагма; 7 – катушки сопровождающего магнитного поля; 8 – окно вывода пучка из вакуума в атмосферу; 9 – облучаемое изделие.

протяженного вакуумного линейного ускорительного тракта, как в резонансных ускорителях или в ускорителях постоянного тока. Это даёт возможность создания устройств для однородного по поверхности осесимметричного облучения изделия электронным пучком за один проход. При этом пучок, выведенный в атмосферу в любой области выпускного окна, будет направлен в обрабатываемое изделие, то есть в таком устройстве нет неиспользуемых зон облучения, что обеспечивает наилучшую энергоэффективность. Другим достоинством такого устройства является возможность однородного по поверхности облучения изделий большого диаметра за один проход без применения каких-либо дополнительных вращательных механизмов.

2. Оценка возможности применения сильноточных импульсно-периодических ускорителей электронов для облучения полиэтилена. При облучении вещество нагревается, а сильноточный индукционный ускоритель способен ввести в обрабатываемое изделие значительные дозы облучения за время, существенно меньшее времени охлаждения материала, и поэтому для определения предельно допустимых доз облучения за один проход нами была рассчитана зависимость нагрева полиэтилена от поглощенной дозы во всём диапазоне промышленно применяемых в настоящее время доз его облучения (от 50 до 300 кГр) (рис. 2). Расчет показал, что при введении

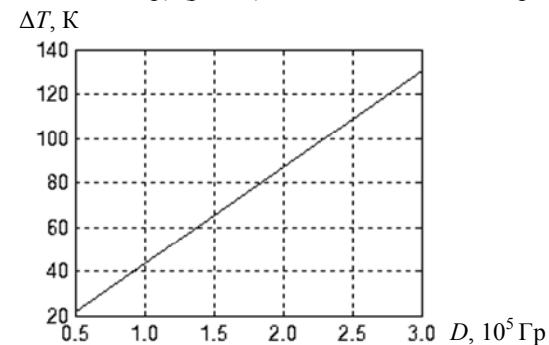


Рис. 2 – Нагрев полиэтилена в зависимости от величины «мгновенно» введенной дозы облучения $\Delta T = D/c$ ($c = 2300$ Дж/(кг·К) – теплоёмкость полиэтилена)

максимальной дозы – 300 кГр, материал с комнатной температуры кратковременно нагреется до температуры 170°C, что допустимо для радиационно-сшитого полиэтилена. Известно, что кратковременно он способен выдерживать температуру до 300 градусов Цельсия. В целом,

расчет показал, что схожим тепловым нагрузкам подвергается полиэтилен и при облучении другими типами ускорителей. Далее нами была рассчитана по [1] оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен $\delta(E)$ в наиболее широко освоенном диапазоне энергий электронного пучка 0,4 – 4 МэВ (рис. 3). Расчет был проведен для усредненной величины плотности полиэтилена $\rho = 0,943 \text{ г/см}^3$. Оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен низкой и высокой плотности отличается от рассчитанной зависимости не более чем на $\pm 3 \%$.

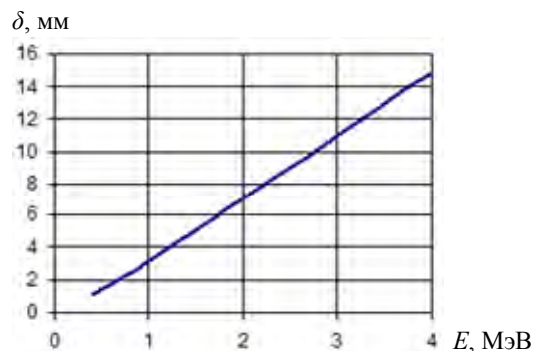


Рис. 3 – Зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов

Для полученного диапазона толщин и характерного для этих толщин диапазона диаметров выпускаемых изолированных проводов и водопроводных полиэтиленовых труб был проведен расчет количества импульсов, требуемого для введения в полиэтилен доз облучения 50, 100, 200 и 300 кГр (рис. 4). Расчет был произведен по формуле:

$$n(d, \delta) = \pi \cdot (d - \delta(E)) \cdot l \cdot \delta(E) \cdot \rho \cdot D / (I_n \cdot \tau \cdot E / e) \quad (1)$$

где d – наружный диаметр обрабатываемого изделия;
 l – расчетная осевая длина зоны облучения;
 I_n – величина тока пучка электронов в импульсе;
 τ – длительность ускоряющего импульса;
 E – энергия ускоренных электронов;
 e – заряд электрона.
 D – экспозиционная доза облучения.

Расчет был проведен для параметров пучка, характерного для линейного индукционного ускорителя, имеющего КПД на уровне 80 %.

Расчет показал, что высокопоточные индукционные ускорители применимы при диаметрах облучаемого изделия начиная с величины порядка 1 см и более. При диаметрах изделий значительно меньше 1 см введение пучка даже при одной только посылке способно ввести в изделие дозу, значительно превышающую 300 кГр, что может привести к деструкции полимера. Применение индукционных ускорителей для облучения изделий малых диаметров возможно при снижении величины тока пучка в импульсе, однако это снизит КПД ускорителя, что, в целом будет вести к утрате его преимуществ перед

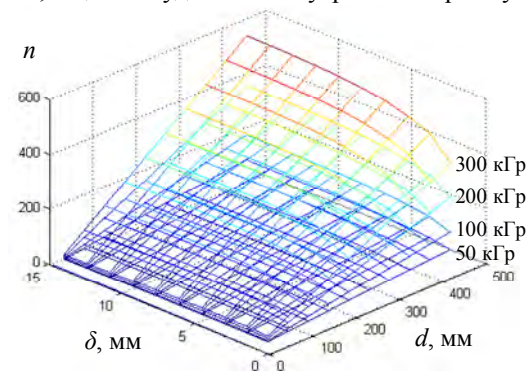


Рис. 4 – Количество посылок импульсов, требуемое для введения в полиэтилен заданных доз, в зависимости от толщины стенки и внешнего диаметра облучаемого изделия ($I_n = 8 \text{ кА}$, $\tau = 100 \text{ нс}$, осевая длина зоны облучения $l = 30 \text{ см}$)

высоковольтными и резонансными ускорителями. В целом можно сказать, что выбор ускорителя для облучения изделий малого диаметра связан с поиском оптимума с точки зрения стоимости оборудования и эксплуатационных затрат, и его следует решать исходя из того, для облучения изделий каких диаметров и какой мощностью дозы он предназначен. Также можно отметить, что наилучшим с точки зрения возможности плавного регулирования мощности дозы и минимизации скорости нагрева изделия является применение индукционного ускорителя для облучения изделий как можно больших диаметров.

Далее нами была рассчитана средняя мощность дозы, вводимой в полиэтилен, в зависимости от диаметра изделия и толщины облучаемой стенки (рис. 5). Расчет был произведен по формуле:

$$P_D(\delta, d) = D \cdot f_n / n(\delta, d) \quad (2)$$

где f_n – частота посылок ускоряющих импульсов. В нашем расчете была принята равной 125 Гц на основе номинальных данных для тиратронов типа ТПИ1-10к/50.

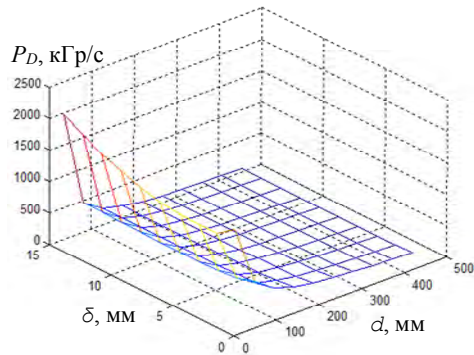


Рис. 5 – Зависимость средней мощности вводимой дозы от толщины облучаемой стенки и диаметра изделия ($I_n = 8$ кА, $\tau = 100$ нс, $f_n = 125$ Гц)

Известно, что в диапазоне мощностей доз до 10 кГр/с свойства материала практически не зависят от мощности дозы, а определяются лишь величиной поглощенной дозы. При применении сильноточного индукционного ускорителя минимальная мощность дозы превышает эту величину в полученных нами расчетах в 7 раз, а максимальная – в 200 раз. Индукционные ускорители позволяют регулировать частоту посылок ускоряющих импульсов, и соответственно, и среднюю мощность дозы, что позволяет снизить среднюю мощность дозы до желаемого уровня. Однако это нежелательно, так как снизит и производительность установки. Поэтому целесообразно провести исследования, которые позволят определить максимально допустимую среднюю мощность дозы. Из имеющихся в технической литературе данных известно, что на качество облученного полиэтилена влияют как время экспозиции, так и мощность дозы облучения. Кратковременная экспозиция при значительных мощностях дозы может приводить к нежелательному окислению поверхностного слоя полиэтилена из-за его реакции с кислородом воздуха. Устраняют возможность поверхностного окисления в настоящее время следующими способами:

- 1) интенсивной продувкой воздухом области облучения с целью быстрого отведения образующегося озона;
- 2) путём облучения полимера в среде разреженного газа;

3) путём облучения полимера в среде инертного газа. Не исключено, что какой-то из этих способов окажется востребованным при больших мощностях дозы облучения.

Далее нами была рассчитана скорость движения облучаемого изделия через проектируемое облучающее устройство (рис. 6). Расчеты показали, что при облучении малыми дозами изделий с диаметром в единицы см скорость может достигать 700 м/мин. А для изделий с диаметром около полуметра, при максимальной дозе облучения – до 4 м/мин.

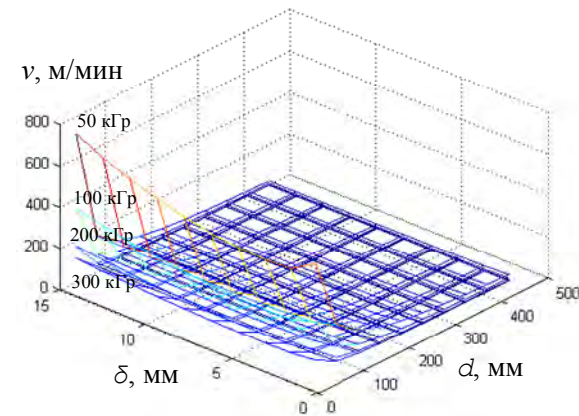


Рис. 6 – Зависимость скорости движения изделия мимо выпускного окна при различных величинах экспозиционной дозы облучения ($I_n = 8$ кА, $\tau = 100$ нс, $f_n = 125$ Гц)

Также нами была определена зависимость средней мощности пучка от энергии электронов и производительность облучающей установки, в тоннах в час облученного полиэтилена (рис. 7). При расчете использовались следующие соотношения:

$$v(\delta, d) = l \cdot f_n / n(d, \delta) \quad (3)$$

$$P_{cp}(E) = I_n \cdot \tau \cdot f_n \cdot E/e \quad (4)$$

$$P_{fact}(P_{cp}) = P_{cp} / D_{max} \quad (5)$$

В расчетах было принято приближенное допущение, что вся введенная в полиэтилен энергия поглощается на оптимальной глубине проникновения. В реальности небольшая остаточная часть энергии пучка расходуется на несколько большей глубине.

Расчеты показали, что индукционный ускоритель позволяет

обеспечить производительность от 5 до 30 тонн/час, и следует отметить, что радиационная сшивка электронным пучком признана в настоящее время наименее энергозатратной по сравнению со всеми другими существующими методами сшивки (химическими, и т. д.).

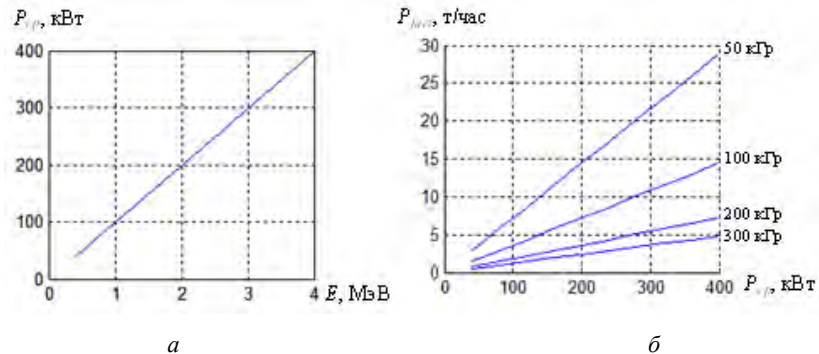


Рис. 7 – а зависимость средней мощности пучка от энергии электронов ($I_n = 8$ кА, $\tau = 100$ нс, $f_n = 125$ Гц); б – производительность в зависимости от средней мощности пучка для различных значений введенных в полиэтилен доз

Выводы. Проведенные в данной работе аналитические исследования показывают, что использование импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов перспективно для радиационной сшивки полиэтилена, особенно для производства изделий больших диаметров.

Поскольку мощность дозы, вводимая индукционными ускорителями, может существенно превосходить мощности дозы, достижимые на ускорителях других типов – для обеспечения максимальной производительности целесообразно провести исследования, направленные на определение предельно допустимой мощности дозы, вводимой в полиэтилен при использовании сильноточных индукционных ускорителей. Величины предельно допустимой мощности дозы, поглощенной дозы, планируемой производительности и габаритов облучаемого изделия являются основополагающими при разработке линейного индукционного ускорителя электронов для промышленных целей и окна вывода пучка.

Список литературы: 1. Свинын М.П. Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 144 с. 2. Шлапацкая В.В. Полимерные трубопроводы во внутренних системах центрального отопления и водоснабжения. Часть 2. / Шлапацкая В.В., Ильенко Р.Е. // Журнал С.О.К. Сантехника Отопление Кондиционирование 17.03.2005: [Электронный

ресурс]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Дата обращения: 27.04.2013). 3. R. J. Adler. Comparison of DC and Pulsed Beams for Commercial Applications. // 10th International Conference on High Power Particle Beams. June 20-24, 1994, San Diego, CA. P. 29-32. 4. Тиратроны с холодным катодом - псевдоискровые разрядники: [Электронный ресурс] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: http://www.pulsetech.ru/tpi-series_rus.htm. (Дата обращения: 27.04.2013). 5. Литвинов Е.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы при вакуумных разрядах. / Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // УФН, т. 139, № 2, 1983, С. 269 – 302. 6. Месяц Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме. / Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // Новосибирск. Наука, 1984. – 242 с. 7. Бугаев С.П. Получение интенсивных микросекундных рентгеновских пучков. / Бугаев С.П., Кассиров Г.С., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ, т. 18, 1973, С. 21-26. 8. Joda G.R. A repetitively pulsed electron beam generator. / Joda G.R., Meskaw D.A. // "Proceeding 2 International topical conference on high power electron and ion research and technology". Cornell. 1977, P. 252-273. 9. Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения. / Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Шанин П.М. // М. Энергоиздат, 1984. – 232 с. 10. О.Ф. Ковпик. Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, В.А. Гуринов, И.В. Гуринов, В.В. Колосенко, and other. // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (42). №1, ННЦ «ХФТИ», Украина 2004, С. 77-79. 11. Антінюв В.С. Перспективний комплекс для використання радіаційних технологій у промисловості, заснований на використанні потужного електронного пучка індукційного прискорювача з вікном виведення з вуглець – вуглецевого композиційного матеріалу. / Антінюв В.С., Бабіч Є.М., Єгоров О.М., Ковпик О.Ф., Корнілов Є.О., Колосенко В.В., Кисельов В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (59), № 4(80), 2012, С. 194 -198. 12. Фінкель Э.Э. и др. Технология производства проводов и кабелей с облученной изоляцией: состояние и перспективы // Кабельная техника. 1997. № 12–13. 13. Гуринов А.Г. Баланс энергии в высокоэнергетичном линейном индукционном ускорителе. / Гуринов А.Г., Ложкин Р.С. // Электротехника и электромеханика, № 1, НТУ "ХПИ", Харьков 2005, С. 83-85. 14. Патент 60975 UA, МПК (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Пристрій для опромінення ізоляційних матеріалів електронним пучком. / Гуринов А.Г., Ложкин Р.С., Корнилов Є.О., Федорівська О.В., Вінокуров В.О., Гуринов В.А., Колосенко В.В.; НТУ "ХПИ", u201011014; Заяв. 13.09.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. 15. Вахрушин Ю. П., Анацкий А. И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. – 248 с.

Bibliography (transliterated): 1. Svin'in M.P. *Raschet i proektirovanie vysokovol'tnykh uskoritelej jelektronov dlja radiacionnoj tehnologii*. Moscow Jenergoatomizdat, 1989. Print. 2. Shlapackaja V.V. Polimernye truboprovody vo vnutrennih sistemah central'nogo otopenija i vodosnabzhenija. Chast' 2. / Shlapackaja V.V., Il'enko R.E. // Zhurnal S.O.K. San'tehnika Otoplenie Kondicionirovanie 17.03.2005: [Jelektronnyj re-surs]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Data obrashhenija: 27.04.2013). 4. Tiratrony s holodnym katodom - psevdodiskrovye razrjadniki: [Jelektronnyj resurs] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: http://www.pulsetech.ru/tpi-series_rus.htm. (Data obrashhenija: 27.04.2013). 5. Litvinov E.A. Mesjac G.A. Avto'emissionnye i vzryvnye processy pri vakuumnyh razrjadah., Proskurovskij D.I. // UFN, t. 139, № 2, 1983, 269 – 302. Print. 6. Mesjac G.A. Proskurovskij D.I. *Impul'snyj jelektricheskij razrjad v vakuume*. Novosibirsk. Nauka, 1984. Print. 7. Bugaev S.P. Kassirov G.S., Koval'chuk B.M., Mesjac G.A. Poluchenie intensivnykh mikrosekundnykh rentgenovskih puchkov. *Pis'ma v ZhJeTF*, No. 18, 1973. 21-26. Print. 8. 9. Bugaev S.P. *Jelektronnye puchki bol'shogo sechenija*. Moscow Jenergoizdat, 1984. Print. 10. O.F. Kovpik.

Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / O.F. Kovpik, E.A. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, and other. // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija «Jaderno-fizicheskie issledovanija»* (42). №1, NNC «HFTI», Ukraina 2004, S. 77-79. **11.** Antipov V.S. Perspektivnij kompleks dlja vikoristannja radiacijnih tehnologij u promislovosti, zasnovanij na vikoristanni potuzhnogo elektronnoho puchka indukcionnoho priskorjuvacha z viknom vivedennja z vuglec' – vuglecevoho kompozicionnoho materialu. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija «Jaderno-fizicheskie issledovanija»* No. 4(80), 2012. 194 -198. Print. **12.** Finkel' Tehnologija proizvodstva provodov i kabelej s obluchennoj izoljaciej: sostojanie i perspektivy // *Kabel'naja tehnika*. 1997. № 12–13. **13.** Gurin A.G. Balans jenergii v vysokojenergetichnom linejnomo indukcionnom uskoritele. *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, No. 1, 2005, 83-85. Print. **15.** Vahrushin Ju. P., Anackij A. I. *Linejnye indukcionnye uskoriteli*. – Moscow. Atomizdat, 1978. Print

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.311

М.В. ЖИТНИК, студент НТУ «ХПИ»

ОБЗОР НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ПО СИСТЕМІ SMART GRID

Пропонується розглянути систему smart grid, її історію виникнення та трансформацію до сучасного вигляду. Запропонована класифікація стандартів, яка відноситься до цієї системи для енергетичної галузі, розглянуті переваги при впровадженні, показники ефективності та оцінка ризиків. Також відображено, як поліпшити надійність за допомогою інтелектуальної енергомережі. Зроблені висновки, що SMART GRID, надає можливості більш ефективного управління ресурсами енергосистеми і їх автоматизації, що дозволяє об'єднати мережеві функції і оптимізувати процеси експлуатації енергосистеми.

Ключові слова: SMART GRID, автоматизована система управління, показник ефективності, надійність, оцінка ризиків.

Вступ. Кількість публікацій за темою smart grid в енергетиці надзвичайно велике. Це різного роду урядові програми та дослідження, стандарти та рекомендації, пропозиції, плани та продукти найбільших енергетичних та ІТ компаній (ABB, SIEMENS, GE, Cisco, IBM, Microsoft, HUAWEI та ін.), аналітичні дослідження, технічні звіти, і т.п.

Термін «SmartGrid» можна визначати по-різному залежно від країни і застосування. Інститут Електричної Енергії (ElectricPowerResearchInstitute - EPRI) провів дослідження, через опитування респондентів, з приводу того що в їхніх компаніях мається на увазі під терміном «SmartGrid». Найбільш часто використовуваний термін, для опису smart grid, це використання розвинених/інтелектуальних пристроїв. Майже 45% респондентів так визначає smart grid. Наступні п'ять найбільш часто використовуваних визначень це:

1. Ефективність;
2. Надійність і якість електроенергії;
3. Поліпшення комунікації;
4. Досвід клієнтів/Залученість;
5. Екологічно чисті або поновлювані джерела енергії.

Пов'язано це різночитання з тим, що smart grid, - це живий симбіоз електроенергетики, електроніки, ІТ, телекомунікацій, сенсорів, ПО і математики.

Історія виникнення. Батьківщиною smart grid, є США. З

© М. В. Житник, 2015

багатьох учасників цього процесу в США, що включають Міністерство Енергетики, NIST, NERC, KEMA та ін., виділяється незалежний, некомерційний Науково-дослідний EPRI, який проводить дослідження і розробки, пов'язані з виробництвом, постачанням і використанням електроенергії на благо суспільства. EPRI - це ціле співтовариство, члени якого представляють 90% ринку електроенергії США, а міжнародна участь поширюється більш ніж на 40 країн світу. Саме в EPRI постачають для тестування і досліджень обладнання та прилади провідні виробники з усього світу.

Перші згадки про SmartGrid в вітчизняній нормативній документації можна віднести до 1982 року, коли вийшов нормативний документ «Основні положення щодо створення автоматизованих систем управління підприємств електричних мереж (АСУ ПЕС)». Який у 1989 році був переглянутий і введений в дію під номером РД 34.08.501-89.

Для розуміння того на скільки документ був прогресивним для свого часу можна привести невеликі вичавки з документа:

«Автоматизована система управління ПЕС є інтегрованою, ієрархічну систему ІАСУ ПЕС, що поєднує функції диспетчерського, виробничо-технічного та організаційно-економічного управління і забезпечує спільне функціонування АСУ ПЕС, автоматизованих систем диспетчерського управління районів електричних мереж (АСДУ РЕМ) та автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) підстанцій, що перебувають в оперативному управлінні та ведення диспетчера ПЕС.

До складу ІАСУ ПЕС входять:

- інтегрована автоматизована система диспетчерського та технологічного управління (ІАСДТУ);
- автоматизована система виробничо-технічного управління (АСВТУ);
- автоматизована система організаційно-економічного управління (АСОУ);
- автоматизована система зв'язку (АСЗ).

Інтегрована автоматизована система диспетчерського та технологічного управління включає: АСДУ ПЕС, АСДУ і диспетчерські пункти: РЕМ, АСУ ТП підстанцій, систему передачі оперативно-технологічної інформації (СПТІ).

До верхнього рівня диспетчерського та технологічного управління ПЕС відноситься комплекс технічних засобів і

математичного забезпечення, призначений для планування режимів та оперативного управління ПЕС.

Система АСДУ ПЕС входить до складу інтегрованої АСДУ енергосистемою.

До нижнього рівня диспетчерського та технологічного управління ПЕС відносяться центри та системи диспетчерського та технологічного управління, що забезпечують управління районами електричних мереж і підстанціями: АСДУ РЕМ, АСУ ТП підстанцій, ДП РЕМ. »

Якщо проводити порівняння РД 34.08.501-89 з SmartGrid Framework то можна помітити помірну схожість. Очевидно, що концепція, прийнята на початку 1982 з невеликими доробками в 1989 році, може бути легко трансформована в сучасну інтерпретацію.

Класифікація стандартів. На даний момент можна виділити п'ять сімейств стандартів, що відносяться до SmartGrid для енергетичної галузі:

- IEC 61970 та IEC 61968 - описують Загальну Інформаційну Модель (СІМ), необхідну для обміну даними між апаратурою та мережами, насамперед у передавальному секторі (IEC 61970) і розподілі (IEC 61968);

- IEC 61850 - сприяє автоматизації підстанцій і комунікацій, так само як і сумісності на основі єдиного формату даних;

- IEC 60870-6 - описує інформаційний обмін між центрами управління;

- IEC 62351 - вирішує завдання безпеки комунікаційних протоколів, визначених попередніми стандартами IEC.

Дані стандарти мають наступні переваги при впровадженні:

1. Зниження витрат - забезпечує здатність взаємодії технологій SmartGrid, що дозволяє вибирати і встановлювати будь-яку частину технології і не залежати від постачальника.

2. Оптимізація процесів - полегшує інтеграцію обладнання та систем для управління електроенергетичними процесами в комплексні системні рішення, необхідні для підтримки функціонування енергомереж.

3. Управління ризиками - досягнення цілей безпеки за допомогою цифрового підпису, аутентифікації доступу, запобігання підслуховування і виявлення несанкціонованих вторгнень.

4. Зниження залежності від одного постачальника - відхід від історично сформованої проблеми в електроенергетичному секторі,

коли використовуються специфічні технології та формати інформаційного обміну від одного постачальника.

Ключовим елементом управління мережевою енергетикою є підстанція, на яку в групі стандартів SmartGrid заведений окремий, досить загальний, стандарт IEC 61850. При використанні цієї групи стандартів можливо ряд переваг:

- забезпечує сумісність пристроїв і виключає залежність підприємств електроенергетики від рішень певного виробника
- мережа, створена на основі стандартів, забезпечує підстанції масштабованість і відтворюваність, що дозволить оптимізувати процеси тестування, установки і повторної настройки інформаційної мережі підстанції
- завдяки пристроям, доступ до яких тепер можна отримати за IP-мережі, оператори можуть підвищити прозорість функціонування енергосистеми, а інженери отримують можливість віддаленого доступу до мережі. Це дозволить скоротити час в дорозі до віддалених підстанцій для усунення неполадок на місці.

У 2011 році IEEE (профільна міжнародна організація стандартизації по IT та комунікацій) опублікувала два важливих стандарти по темі SmartGrid:

- IEEE Std 1547.4-2011 - Основи розробки, експлуатації та інтеграції автономних систем на базі розподілених ресурсів з електроенергетичними системами;
- IEEE 2030-2011 - Керівництво IEEE щодо забезпечення функціональної сумісності енергетичного обладнання та інформаційних технологій з електроенергетичними системами (EPS), системами кінцевих споживачів і навантаженням в інтелектуальних мережах.

Показники ефективності, оцінки ризиків та надійність. У зазначених стандартах з'явилися фактичні комплексні показники ефективності та оцінки ризиків. Ризики створюють загрозу шкоди, щодо якої необхідно вживати заходів захисту. Якщо ризиків немає, то і заходи безпеки не потрібні. Однак коли виявляється ризик, необхідно визначити вразливі місця і загрози які вплинуть на надійність системи. Відповідно «надійність - це здатність компонента або всієї системи виконувати свої функції в передбачених умовах в передбачений період часу», але ступінь і складність архітектури інтелектуальних мереж створює труднощі для забезпечення їх надійності до такої міри, якою сьогодні могло б і не бути. Аналогічно, розміри і географічний розмах

впливу відмови мереж, безсумнівно, ростуть у міру поширення складних архітектур і засобів зв'язку в EPS на кожному рівні.

Щоб ефективно виробити вимоги по надійності, необхідно розуміти, що означає надійність у сфері енергетики та у галузі інформаційних та комунікаційних технологій (ICT). Сюди відноситься пояснення різних супутніх концепцій, включаючи забезпечення надійності електроенергії, надійність передачі даних, ітеративний характер проектування, роботу обладнання інтелектуальних енергомереж в нештатній ситуації.

В електроенергетиці зазвичай думають про надійність в термінах надійності енергопостачання - заходи надійного енергопостачання споживачів. Але в частині надійності передачі даних для підтримки застосування інтелектуальних енергомереж необхідно вказати на іншу концепцію надійності даних.

Один ряд заходів може описувати надійність електропостачання, інший - надійність даних. Незважаючи на використання різних заходів для досягнення надійності інфраструктури EPS і ICT, безпека і надійність енергосистем в разі порушень в інфраструктурі ICT повинні мати пріоритетну значимість.

У розподільчих системах надійність енергопостачання часто вимірюється через показники надійності, наприклад: SAIDI (середній показник аварій в системі), SAIFI (середній показник частоти аварій в системі).

Інтелектуальні енергомережі в потенціалі здатні поліпшити надійність енергорозподілу. Для цього через канали передачі даних на базі ICT повинні надаватися різні дані управління і дані від сенсорів. Для деяких маршрутів передачі прикладних даних потрібно надвисокий рівень управління (наприклад, усунення несправностей і автономне відновлення енергопостачання), у той час як більшість додатків здатне витримувати порівняно тривалі або часті переривання без негативного впливу на надійність енергопостачання (наприклад, зчитування електролічильників). Вхідні дані для розрахунку надійності електропостачання можна структурувати з використанням стандартних в галузі енергетики понять: тривалість аварій і частота аварій. У контексті інтелектуальних електромереж втрата даних не обов'язково призводить до припинення електропостачання, але веде до різних значень.

Дуже важливо розуміти, що в будь-який час, коли узгоджені розрахункові критерії для потоків даних не дотримуються, це вважається перериванням (або «втратою» даних). Наприклад, якщо час

передачі інформації для певного потоку даних задано як 2 секунди, але дані передаються тільки через 4 секунди, це буде вважатися перериванням навіть у тому випадку, якщо дані передані точно. Відповідно, здатність додатків інтелектуальних енергомереж витримувати втрату або затримки даних можна назвати «стійкістю до втрати даних».

Висновок. Щоб витягти з інтелектуальних енергомереж максимально можливий потенціал, вони повинні бути не менш надійні, безпечні і відмовостійкі, ніж існуючі енергосистеми. Таким чином, автоматизація підстанцій за рахунок впровадження перерахованих вище стандартів, надає можливості більш ефективного управління ресурсами енергосистеми і їх автоматизації, що дозволяє об'єднати мережеві функції і оптимізувати процеси експлуатації енергосистеми.

Список літератури: 1. Smart Grid Leadership Report: Global Smart Grid Implementation Assessment, October 2010, EPRI Project Manager M. Wakefield. 2. RD 34.08.501-89 Основные положения по созданию автоматизированных систем управления предприятий электрических сетей (АСУ ПЭС). 3. Smart Grid Framework 2.0 February 2012, National Institute of Standards and Technology Patrick D. Gallagher, Director

Bibliography (transliterated): 1. Smart Grid Leadership Report: Global Smart Grid Implementation Assessment, October 2010, EPRI Project Manager M. Wakefield. 2. RD 34.08.501-89 Main provisions of the development of automated control systems of electrical grid (ACS PES) 3. Smart Grid Framework 2.0 February 2012, National Institute of Standards and Technology Patrick D. Gallagher, Director

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.625.032

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе асинхронной машины и автономного инвертора напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть. Выполнен синтез системы управления асинхронной машины 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 поддержание постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, автономный инвертор напряжения, асинхронная машина.

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.[2]

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 асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АМ с КЗ), превращающей механическую энергию ДВС, нагружая его, в электрическую энергию, передаваемую в сеть с помощью 2 автономных инверторов напряжения (АИН) с промежуточным звеном постоянного тока. Функциональная схема показана на рис. 1.

© Г. И. Мельников, А. О. Коротков, А. В. Семиков, 2015

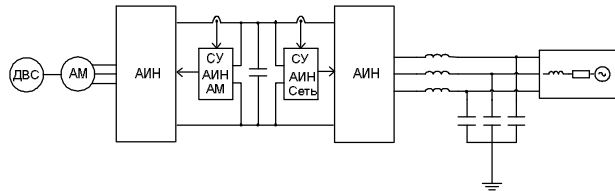


Рис 1 – Схема испытательного стенда на базе АМ и АИН.

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.

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

На испытательном стенде скорость меняется медленно, поэтому динамическим моментом при определении нагрузки ДВС можно пренебречь. Управлении АИН, питающего АМ с КЗ, используется скалярное, так как в нагрузочном стенде момент меняется медленно и нет необходимости в векторном управлении с высоким быстродействием. У АМ с КЗ момент зависит от частоты и амплитуды питающего напряжения и от скорости. Поэтому была синтезирована система управления рассчитывающая частоту и напряжение по заданному моменту и текущей скорости с использованием таблицы данных, получаемой экспериментально для выбранной АМ с КЗ.

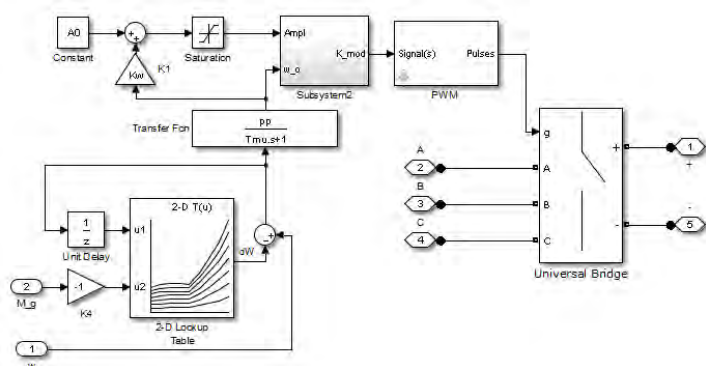


Рис. 2 — Схема управления АИН, питающего АМ с КЗ

АИН, передающий энергию в сеть, с системой управления и модель ДВС были описаны в предыдущей статье.

Используя вышеуказанные математические зависимости, была синтезирована компьютерная модель стенда в библиотеке Simulink программы Matlab, показанная на рис 3.

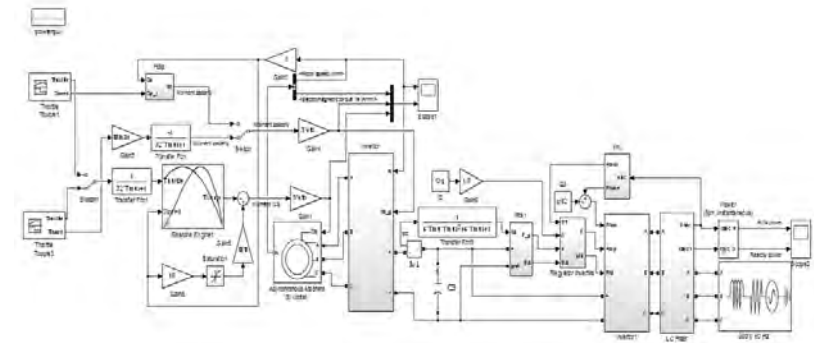


Рис 3– Компьютерная модель испытательного стенда.

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 асинхронной машины 110 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, тока статора АМ с КЗ, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора, показанные на рис.4, механическая мощность и мощность в звене постоянного тока показана на рис. 5, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 6, и фазных токов показанных на рис. 7

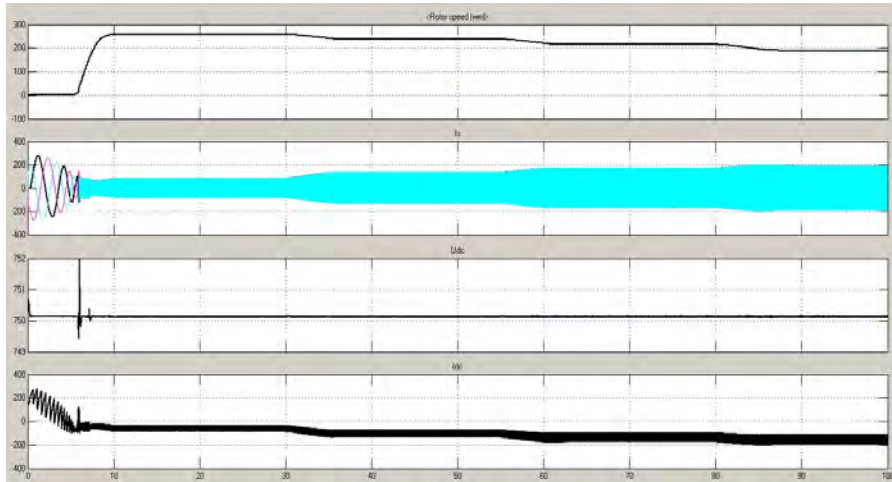


Рис 4 – Временны зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора в первом эксперименте.

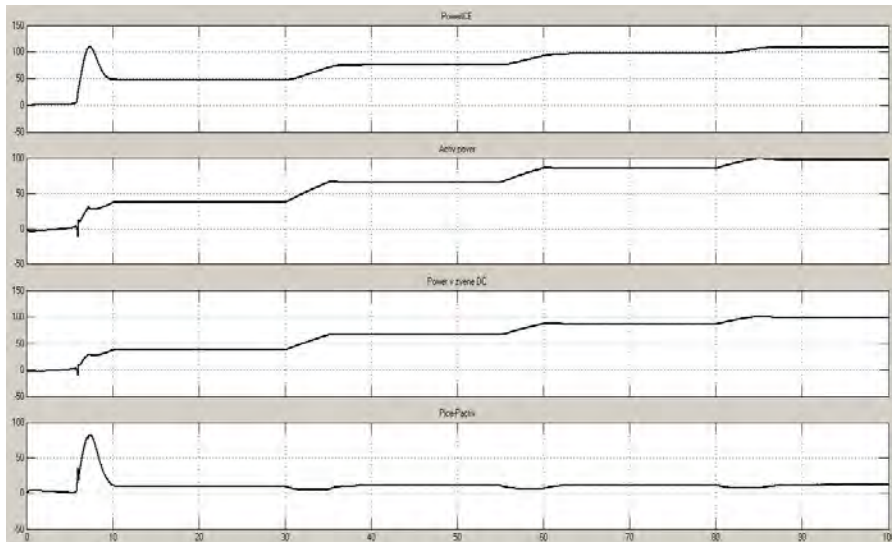


Рис 5– График изменения механической мощности, мощности в звене постоянного тока и разности мощностей между ДВС и инвертором.

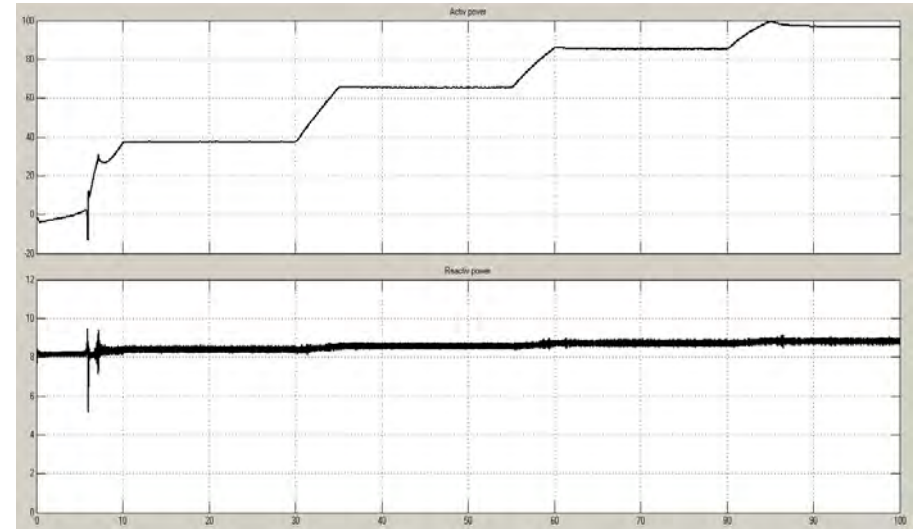


Рис 6 –График передаваемой активной и реактивной мощности.

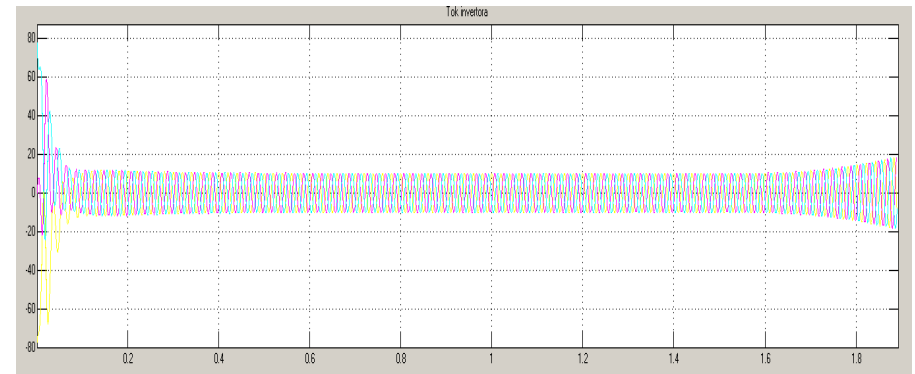


Рис 7 – График формы фазных токов.

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 передаваемая от АИН в звено постоянного тока, кВт	Активная мощность передаваемая от АИН в сеть, кВт	Реактивная мощность передаваемая от АИН в сеть, кВар
25	47,12	37,78	37,5	8,4
50	76,05	66	65,5	8,5
75	96,79	86,35	85,4	8,6
100	108,67	98,25	97	8,8

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, тока статора АМ, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора, показанные на рис.8, механическая мощность и мощность в звене постоянного тока показана на рис. 9, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 10.

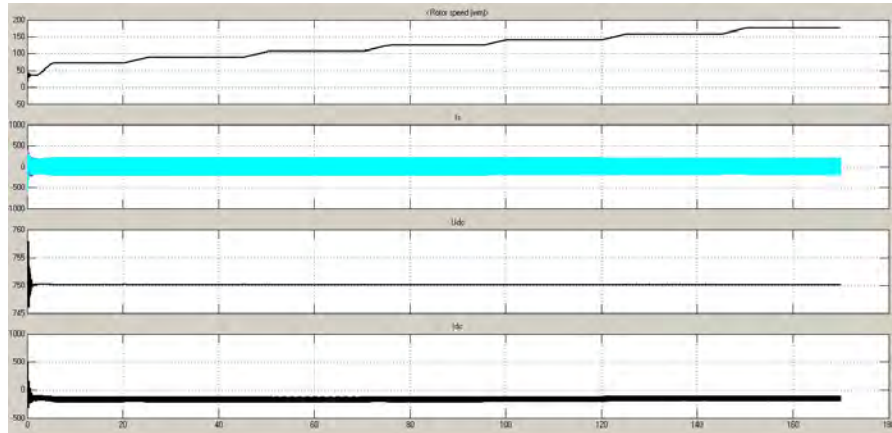


Рис 8 – Временны зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора во втором эксперименте.

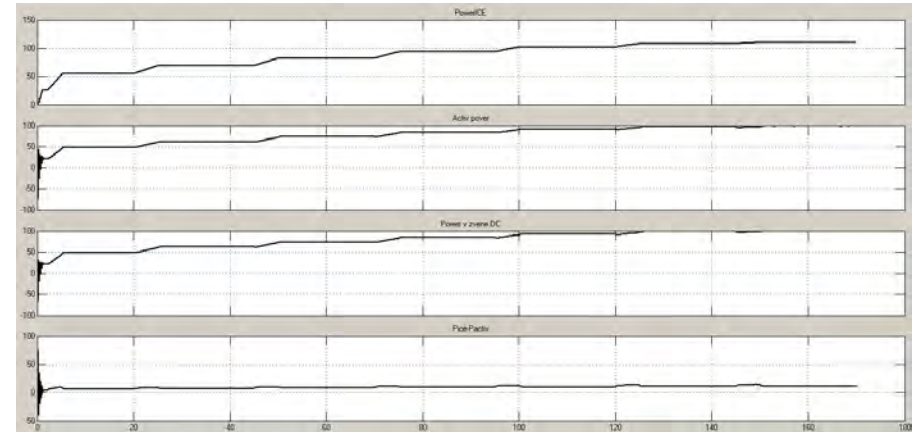


Рис 9 – График изменения механической мощности, мощности в звене постоянного тока и разности мощностей между ДВС и инвертором.

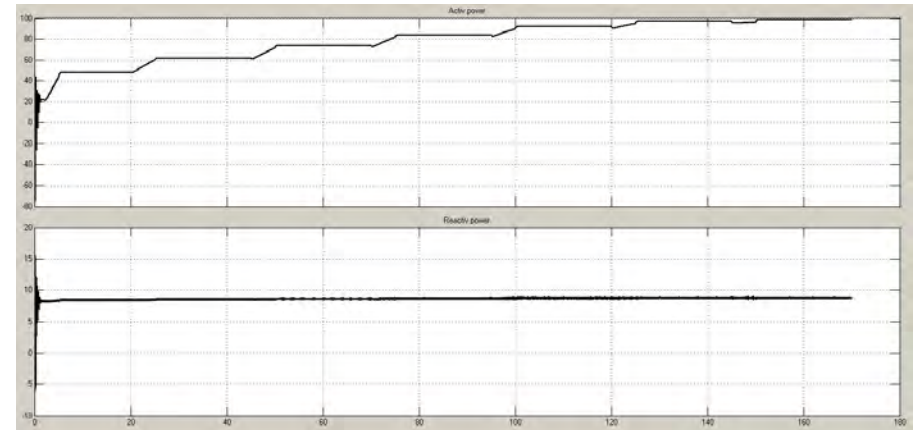


Рис 10 – График передаваемой активной и реактивной мощности

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 передаваемая от АИН в звено постоянного тока, кВт	Активная мощность передаваемая от АИН в сеть, кВт	Реактивная мощность передаваемая от АИН в сеть, кВар
2000	55,4	49,1	48,7	8,5
2500	69,605	62,4	61,8	8,55
3000	82,63	74,55	73,7	8,6
3500	93,79	85,05	84,14	8,7
4000	102,4	93,08	91,9	8,8
4500	108	98,5	97,13	8,8
5000	109,99	99,9	98,6	8,8

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%.

Основным недостатком этого стенда, является необходимость предварительного построения массива значений, определяющих зависимость между частотой и амплитудой питающего напряжения и скоростью АМ с КЗ, что требует соответствующих испытаний.

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. Print 2 Todaro V.V., Pogulyaev M.N., Doroshenko I.V., Saving electromechanical stands for testing of internal combustion engines and transmissions of agricultural machinery. *Bulletin of Herald Gomel State. tehn. University*. 2007. No 4. 80-84. Print 3 German Galkin S.G., *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0* St. Petersburg "Lumen" 2006 36-150 Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.315.2

Р.П. МОТКО, магистр НТУ «ХПИ»
А.П. ПОНОМАРЕВА, магистр НТУ «ХПИ»
С.А. СОКОЛ магистр НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрена информация о методах оценки электрофизических параметров полупроводящих экранов высоковольтных силовых кабелей с полимерной изоляцией. Определение характеристик полупроводящих экранов – актуальная задача в практике испытаний кабелей с высоковольтной изоляцией. Выполнен анализ влияния частоты на точность измерения электропроводимости и диэлектрической проницаемости полупроводящих материалов. Проанализировано влияние частичных разрядов на изоляцию из сшитого полиэтилена. Указаны причины возникновения частичных разрядов, а также методы по уменьшению амплитуды и полного устранения их. Исследован способ измерения частичных разрядов. Сопоставлены данные разных источников.

Ключевые слова: высоковольтный силовой кабель, полупроводящий экран, частичный разряд.

Введение

В силу ряда технических и экономических преимуществ изоляции из СПЭ (сшитого полиэтилена), кабели питания систем все шире используются в высоковольтных и чрезвычайно высоковольтных диапазонах.

Кабель высокого напряжения с СПЭ изоляцией состоит из медного или алюминиевого проводника (внутренний проводник), полупроводящий слой экструдированный на внутренний проводник, СПЭ изоляция, наружный полупроводящий слой, металлический экран провода или алюминиевой оболочкой и наружной полиэтиленовой оболочки. Однако, СПЭ-изоляция очень чувствительна к частичным разрядам (ЧР). Для обеспечения надежности всей кабельной системы, необходимы чувствительные лабораторные тесты ЧР для установки и проверки на местах. Один из наиболее распространенных методов для выявления ЧР является измерение излучаемого поля ЧР с чувствительных датчиков поля. Эти датчики снимают ЧР с внешнего полупроводящего слоя и, следовательно, свойства полупроводящего слоя оказывают существенное влияние на снимающие механизмы.

Знать проводимость и диэлектрическую проницаемость и их

зависимость от частоты и температуры важно для оптимизации ЧР полевых датчиков. Эти датчики обычно размещаются над наружным полупроводниковым слоем вблизи или внутри кабельных соединений.

Анализ литературы

Как показывает анализ, при неизменных параметрах собственно изоляционного слоя $\epsilon_2 = 2.3 \cdot \epsilon_0$, $\gamma_2 = 10^{-15}$ тангенс угла диэлектрических потерь согласно имеет максимум (рис.1). Такой же максимум для $\text{tg}\delta$ наблюдается и в двухслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле — изоляция».

Наличие максимума на кривой $\text{tg}\delta$ можно объяснить следующим образом. Если γ_1 и γ_3 неограниченно уменьшать, то свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам высококачественного полиэтилена с низким значением $\text{tg}\delta$. При неограниченном увеличении γ_1 и γ_2 , свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам хорошего проводника, т. е. к свойствам материала токопроводящей жилы и проводящего металлического экрана, между которыми будет находиться слой высококачественного полиэтилена с низким значением $\text{tg}\delta$.

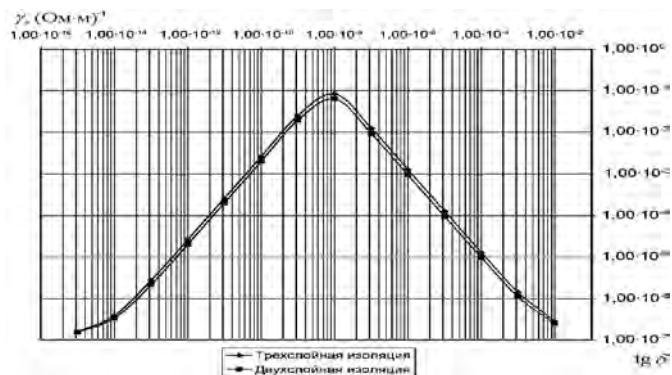


Рис. 1 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле γ_1 и по изоляции γ_3 в трехслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции». $\gamma_1 = \gamma_3 = \gamma$, $\gamma_2 = 10^{-15} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$. а) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 2.3 \cdot \epsilon_0$; б) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 10 \cdot \epsilon_0$; в) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 4 \cdot \epsilon_0$

Так как значение $\text{tg}\delta$ не зависит от объема диэлектрика, то при средних значениях проводимости полупроводящих экранов γ_1 и γ_3

будет наблюдаться максимум тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной конструкции с двумя проводящими экранами. Эти же рассуждения будут справедливыми и для случая конструкции с одним полупроводящим экраном.

При выборе проводимости полупроводящих экранов по жиле и по изоляции необходимо учитывать следующее.

1. Сглаживание электрического поля на макро- и микровыступах проводящих электродов (т. е. на поверхностях токопроводящей жилы и медного экрана) происходит при толщине полупроводящих экранов по жиле и изоляции не менее 1 мм и их проводимости γ_1, γ_3 , не менее $10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ при 20°C .

2. При достижении длительно допустимых токов в режиме перегрузки температура кабеля может достигать 130°C . При этом проводимость материала полупроводящих экранов может измениться на три порядка от 10^{-3} до $10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$. Таким образом для того, чтобы полупроводящие экраны не потеряли свое главного назначения по выравниванию электрического поля в макро- и микровыступах проводящих электродов, следует выбирать электропроводность полупроводящих экранов γ_1, γ_3 не менее $10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, что соответствует их объемному удельному сопротивлению $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Отсюда можно сделать вывод, что для нормальной работы кабелей СВН, для которых $\text{tg}\delta$ нормируется и не должен превышать значения 10^{-3} следует выбирать значение проводимости проводящих пластмассовых экранов не менее $10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$.

Представлена схема экспериментального измерения для определения частотно-зависимых проводимости и диэлектрической проницаемости малых образцов, отобранных от наружных полупроводниковых слоев различных кабелей среднего и высокого напряжения. Благодаря высокоточному измерению диэлектрической проницаемости от частоты, можно получить данные, которые являются типичными для полупроводниковых материалов (сажа заполнена полимерами).

Схема измерения для определения температурно-частотной зависимости комплексного сопротивления полупроводящего образца (черный углерод наполненный полимером) показана на рис.2 Он состоит из анализатора спектра с установленным импедансом тестового адаптера. На выставке образец устанавливается в держатель образца и подключается через коаксиальные линии передачи. Внутренний проводник - коаксиальная передающая линия,

заканчивается внутри держателя образца и имеет длину около 2 мм. Жесткие заземляющие пластины заземляются и применяется давление на образец. Образец зажимается между этой пластиной и внутренним проводником коаксиальной линии, которые имеют расстояние около 0.7 мм. Контроль температуры достигается с помощью элемента Пельтье.

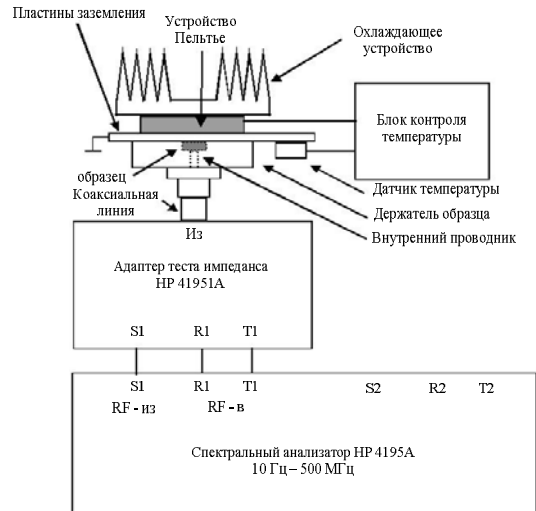


Рис. 2 – Установка для определения коэффициента отражения

На рис.3 приведена эквивалентная схема цепи для выборки из полупроводящего слоя, установленный на конце открытой коаксиальной линии передачи с волновым сопротивлением Z_L . Образец описывается комплексным импедансом Z . В конце передающей линии характеристики импеданса меняются. Часть падающей волны отражается.

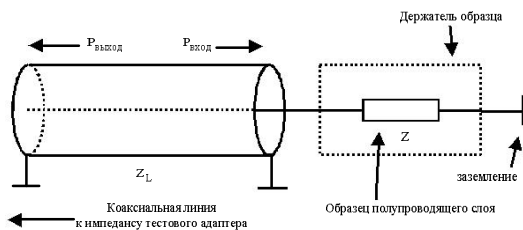


Рис.3 - Эквивалентная электрическая схема для образца

Комплексное сопротивление образца рассчитывается от величины и фазы входного сигнала P_{in} и выходного P_{out} . Входная и выходная мощность может быть измерена с помощью направленного ответвителя, который разделяет падающий и отраженный сигнал. Иницируемый сигнал подается на вход сопротивления напряжения R1, отраженный сигнал на тест входа T1. В конфигурации частотный диапазон ограничен 100 кГц - 500 МГц, поскольку прямо включен в ответвитель. Абсолютный импеданс $|Z|$ образца на конце коаксиальной линии передачи может быть вычислен согласно (1).

$$|Z| = Z_L \frac{P_{in} + P_{out}}{P_{in} - P_{out}} \quad (1)$$

Фазовый сдвиг ϕ вычисляется по разности фаз между сигналами на R1 и T1. Уравнения (2) и (3) описывают отношения между абсолютной импеданса, мнимой частью, реальное участие и фазовый сдвиг.

$$|Z| = \sqrt{\text{real}(Z)^2 + \text{imag}(Z)^2} \quad (2)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{imag}(Z)}{\text{real}(Z)}\right) \quad (3)$$

Анализатор спектра автоматически вычисляет действительную часть и мнимую часть Z для каждой точки в диапазоне частот. Эти данные используются для извлечения проводимости и диэлектрической проницаемости образца.

Точность анализатора спектра сама по себе зависит от частотного диапазона и абсолютного значения импеданса. Табл.1 дает обзор точность анализатора спектра HP4195A с установленным импедансом тестового адаптера HP 41951A для различных значений параметров.

Таблица 1 – Точность измерения HP 4195A анализатора

f, МГц	0.1 – 0.3	0.3 – 1	1 – 100	100 – 500
$ Z $, Ом				
1 – 50	10%	3%	3%	3%
50 – 100	3%	2%	1.5%	2%
100 – 5000	10%	10%	3%	10%

На рис.4 показан пример зависимости проводимости от частоты полупроводникового наружного слоя из сшитого

полиэтилена 110кВ-кабеля (1) по сравнению с наружным слоем из оксидов металлов сложного состава методом электронного парамагнитного резонанса кабеля (2).

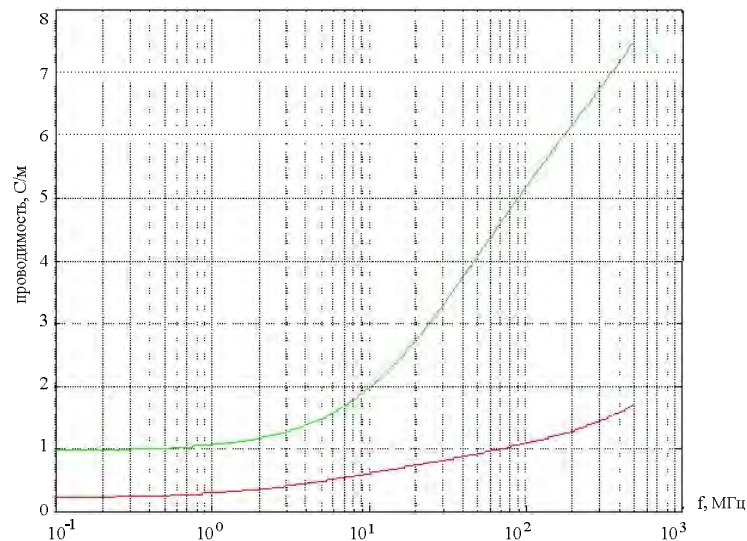


Рис.4 – Проводимость полупроводника, наружный слой кабеля СПЭ и EPR

Проводимость повышается в диапазоне частот до 500 МГц от 1с/м до 7.5 с/м для кабеля СПЭ и с 0.24 с/м до 1.7 с/м в случае ЭПР кабеля. На низких частотах проводимость принимает статическое значение. Механизм частотной зависимости может быть объяснен эквивалентной схемой полупроводникового слоя.

Полупроводниковые соединения, состоящие из полимеров, наполненных частицами сажи. Частицы образуют сеть из проводящего технического углерода, мелкий полимер заполняет пробелы. Зазор можно представить в виде конденсатора, который состоит из двух электродов из сажи и полимерного диэлектрика. Расстояние между частицами сажи, обычно очень небольшие, обычно несколько Ангстрем. Малые расстояния между частицами сажи позволяет некоторым электронам туннелировать между частицами сажи. Это основной механизм проводимости для низких частот,

которые могут быть представлены через резистор, параллельно конденсатору.

Частоту проведения зависимого поведения можно разделить на три зоны (рис.4); на низких частотах проводимость определяется туннелированием между частицами сажи. Электропроводность остается практически постоянной до частоты около 1 МГц. Выше этой частоты емкость оказывает больше и больше влияния и уменьшает общее сопротивление (резистор и конденсатор в параллель) зазора. Следовательно, проводимость увеличивается. Для очень высоких частот проводимость приближается к постоянной величине, которая определяется сопротивлением частиц сажи (не видно на рис.4).

На рис.5 показаны зависимости диэлектрической проницаемости от частоты наружного полупроводникового слоя СПЭ и EPR кабеля.

Диэлектрическая постоянная имеет очень высокое статическое значение, которое определяется большим числом взаимных емкостей между частицами сажи. Для высоких частот относительная диэлектрическая проницаемость падает до более низкого значения, которое находится обычно в диапазоне 10.. 100 при частоте 500 МГц.

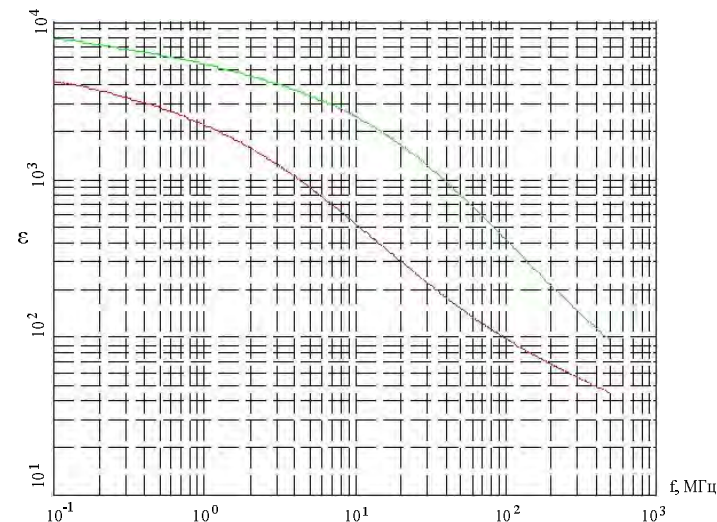


Рис.5 – Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для СПЭ и EPR кабелей

Выводы:

1. Сопоставлены данные различных источников по определению параметров полупроводящих материалов

2. Приведены частотные зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости для полупроводящих экранов, а также зависимость угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле и изоляции

3. Проблему определения характеристик полупроводящих экранов необходимо решать в зависимости от конкретных ситуаций: а) в случае высокочастотного диапазона (например: грозовой импульс, анализ частичных разрядов) можно опираться на данные вышеописанного метода (рис.4, рис.5); б) для промышленных частот более справедлива кривая рис.1.

Список литературы: 1. Золотарев В.М. Конструкции и электрическое поле кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена: уч. пособие / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, А.Г. Гурин и др. – Х.: Майдан, 2014. – 188 с. – На рус. яз. 2. R. Heinrich, S. Bonisch, D. Pommerenke*, R. Jobava**, W. Kalkner Broadband measurement of conductivity and dielectric permittivity of semiconductor materials in high voltage cables with cross-linked polyethylene insulation. 3. В. П. Карпушенко / Силові кабелі низької та середньої напруги // В. П. Карпушенко Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антоненць, О. А. Науменко, Х. : Регіон-інформ 2000, 374 стор

Bibliography (transliterated): 1. Zolotarev V.M. V.M. Zolotarev, V.P. Karpushenko, A.G. Gurin *Konstrukcii i jelektricheskoe pole kabelej s izoljaciej iz sshitogo polijetilena* Kharkiv Majdan, 2014. Print. 2. R. Heinrich, S. Bonisch, D. Pommerenke*, R. Jobava, W. Kalkner Broadband measurement of conductivity and dielectric permittivity of semiconductor materials in high voltage cables with cross-linked polyethylene insulation. 3. V. P. Karpushenko, L. A. Shhebenjuk, Ju. O. Antonec', O. A. Naumenko *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi napруги*, Kharkiv. Region-inform. 2000. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.316.933

И.В.НИЖЕВСКИЙ, соискатель НТУ "ХПИ"
В.И. НИЖЕВСКИЙ, канд. техн. наук., доц., НТУ "ХПИ"
С.К. БЕРЕЗКА, канд. техн. наук., ст. преп., НТУ "ХПИ"
И. БЕХРУЗ, студент, НТУ "ХПИ"
С. НАСРИДДИНИ, студент, НТУ "ХПИ"

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИЩЕННОГО ПОДХОДА НА ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ТОКА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

Исследовано влияние длины пролета и числа опор защищенного подхода примыкающих к подстанции линий электропередачи на выбор расчетного тока однофазного короткого замыкания в электрической высоковольтной сети. Показано, что рост длины пролета и (или) сопротивления заземлителя опоры увеличивает сопротивление заземления системы "трос-опоры". Использование результатов исследований позволяет более точно определять значение расчетного тока однофазного короткого замыкания.

Ключевые слова: подстанция, заземлитель, система "трос-опоры", длина пролета, число опор, защищенный подход, выбор, расчетный ток, однофазное короткое замыкание, анализ

Введение. При эксплуатации электрических высоковольтных сетей могут происходить короткие замыкания различного вида и по разным причинам как случайного, так и преднамеренного характера. Как показывает опыт эксплуатации, наиболее часто происходят однофазные короткие замыкания (ОКЗ) на землю как на территории подстанции (ПС), так и за ее пределами. При этом ток ОКЗ возвращается к источнику протекая в общем случае через заземляющие устройства (ЗУ) подстанций и ЗУ опор линий электропередачи (ЛЭП), примыкающих к подстанции. ЗУ опор ЛЭП участвующие в этом процессе, объединены грозозащитным тросом по всей длине так называемого защищенного подхода и образуют систему заземления "трос-опоры" [1–4].

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров защищенного подхода на выбор расчетного тока ОКЗ.

Основные результаты. Сопротивление заземления системы "трос-опоры" $R_{\text{ТО}}$ одной ЛЭП можно рассчитать аналитически

© И. В. Нижегородский, В. И. Нижегородский, С. К. Березка, С. Насриддини, 2015

по известным формулам:

а) число опор на защищенном подходе $n > 15$.

$$R_{\text{то}} = \frac{R_{\text{оп}}}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{R_{\text{оп}}}{r_{\text{T}}} + \frac{1}{4}}}, \quad (1)$$

где r_{T} - сопротивление одного троса в пролете, а для двух тросов $0,5r_{\text{T}}$; $R_{\text{оп}}$ - сопротивление заземлителя опоры.

б) при числе опор на защищенном подходе $n < 15$

$$R_{\text{то}} = \sqrt{R_{\text{оп}} \cdot r_{\text{T}}} \cdot \text{cth} \left(\sqrt{\frac{r_{\text{T}}}{R_{\text{оп}}}} \cdot n \right), \quad (2)$$

в) по упрощенной формуле

$$R_{\text{то}} = \sqrt{R_{\text{оп}} \cdot r_{\text{T}}} \quad (3)$$

с инженерной точностью ($\pm 10\%$).

Выбор значения расчетного тока ОКЗ осуществляется по конкретным схемам развития высоковольтных электрических сетей и систем. По расчетному току ОКЗ, во-первых проверяются и выбираются сечения горизонтальных элементов заземлителя и заземляющих проводников, во-вторых определяются напряжения прикосновения и шага в заданных точках ПС и в-третьих определяется потенциал на ЗУ.

В первом случае в качестве расчетного тока ОКЗ принимается наибольшее из значений полного тока ОКЗ ($I_{\text{окз}}$), которое может иметь место при замыканиях на ПС на высоком, среднем и низком напряжениях.

Во втором случае в качестве расчетного тока ОКЗ принимается часть тока ОКЗ (I_{31}, I_{32}, I_{33}), которая стекает с ЗУ ПС в землю или наоборот втекает в него. В этом случае выбор расчетного тока производится по отдельности для рабочих мест и для остальной территории ПС. Расчетный ток для рабочих мест определяется при замыканиях на ПС на напряжении, к которому относится рабочее место. При наличии на ПС распределительных устройств (РУ) нескольких номинальных напряжений, рабочие места выбираются для каждого из них и, соответственно, для каждого рабочего места определяется расчетный ток.

Для остальной территории ПС в качестве расчетного тока принимается наибольший ток, стекающий с ЗУ в землю, который может иметь место в режиме ОКЗ как на территории ПС на различных напряжениях, так и на отходящих от ПС ЛЭП различных напряжений.

Расчетный ток для определения напряжения на ЗУ принимается равным значению расчетного тока для остальной территории ПС.

Выбор расчетных токов и их распределение в электрической высоковольтной сети производится на основе анализа следующих случаев ОКЗ, приведенных на рис. 1 – рис. 4.

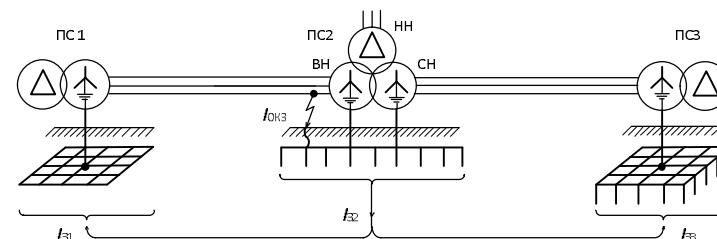


Рис. 1 – ОКЗ на высшем номинальном напряжении подстанции

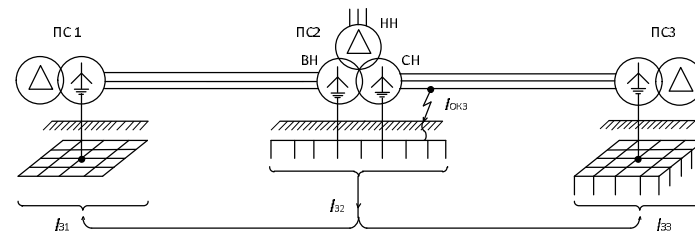


Рис. 2 – ОКЗ на среднем номинальном напряжении подстанции

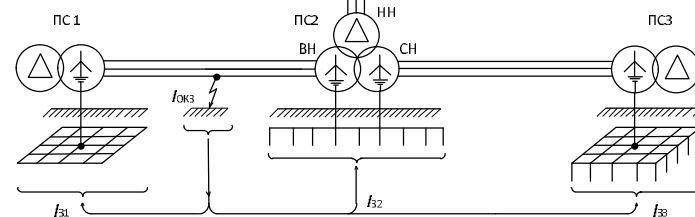


Рис. 3 – ОКЗ на высшем номинальном напряжении за пределами подстанции

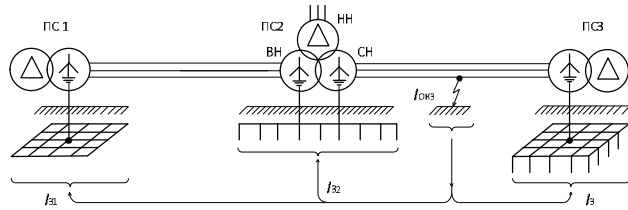


Рис. 4 – ОКЗ на среднем номинальном напряжении за пределами подстанции

Выполним расчеты сопротивления заземления системы “трос-опоры” по выше приведенным формулам и по схеме замещения системы в зависимости от числа опор n и сопротивления заземления $R_{оп}$ каждой опоры при средней длине пролета $l_{пр}=100$ м. В данном случае сопротивления заземления всех опор для простоты анализа принимаем одинаковыми. Полученные по схеме замещения системы “трос-опоры” результаты представлены на рис. 5.

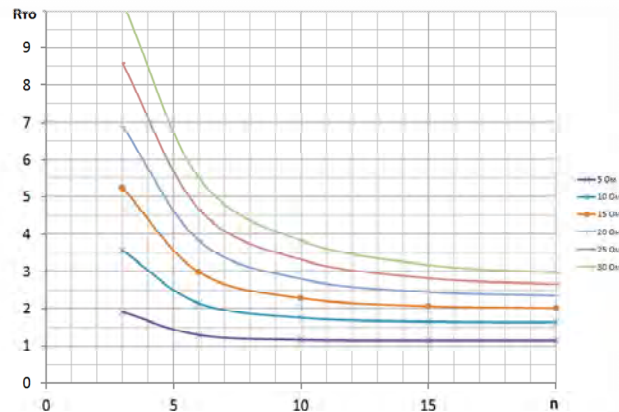


Рис. 5 – Зависимости сопротивления заземления системы “трос-опоры” от числа опор n и сопротивления заземления опор $R_{оп}$

Анализ результатов свидетельствует о том, что увеличение числа опор n во всех случаях приводит не только к снижению величины сопротивления заземления системы “трос-опоры”, но при этом, скорость этого снижения также уменьшается с ростом n .

Кроме того, зависимость $R_{то} = f(n)$ смещается тем выше, чем больше величина сопротивления заземления опор, т.е. доля тока ОКЗ, стекающего (втекающего) в систему “трос-опоры” уменьшается. При этом доля тока ОКЗ, стекающего с ЗУ ПС наоборот увеличивается.

Результаты расчетов зависимости $R_{то} = f(n)$ по формулам (1) – (3) представлены на рис. 6.

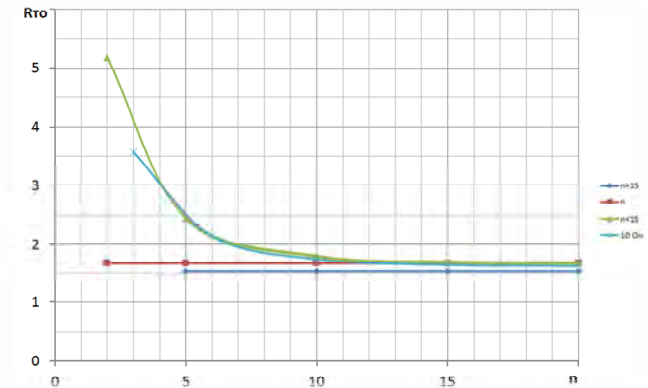


Рис. 6 – Зависимости сопротивления заземления системы “трос-опоры” от числа опор n при сопротивлении заземления опор $R_{оп}=10$ Ом

Сравнение этих кривых с кривой, полученной по схеме замещения, как истинной, показывает, что при длине пролета $l_{пр}=100$ м и величине сопротивления заземления опор $R_{оп} = 10$ Ом точность расчета по формулам имеет погрешность тем большую, чем меньше число опор. Например, при числе опор $n=5$ погрешность составляет 38,5%, при $n=15$ – 6,5%, при $n=20$ – 5,4%.

Аналогичные расчеты по формуле (2) дают 2%, -3%, и -3% соответственно, а по формуле (3) соответственно 33%, -1,64% и -2,8%. Как видим, формула (1) дает тем большее отличие от истинного значения сопротивления заземления системы “трос-опоры”, чем меньше число опор в системе.

Кроме того, выполненные исследования показали, что сопротивление заземления системы “трос-опоры” с увеличением длины одинаковых пролетов возрастает при любом значении сопротивления заземления опор $R_{оп}$, однако, чем больше это

сопротивление, тем выше располагается кривая $R_{\text{т.о}} = f(r_{\text{т.о}})$. Вместе с тем, рост числа опор n в системе при неизменной длине одинаковых пролетов приводит к смещению кривой $R_{\text{т.о}} = f(r_{\text{т.о}})$ в сторону меньших значений $R_{\text{т.о}}$. В исследованиях длина пролета варьировалась в диапазоне реально применяемых на практике длин, т.е. до 240 м.

Приведенные выше результаты получены для случая одной примыкающей к ПС ЛЭП. Аналогичные исследования выполнены и для большего числа N присоединенных к ПС линий ВЛ 110 кВ.

Результаты исследований также показали, что при числе подключенных к ПС линий $N > 1$ итоговое сопротивление заземления системы "трос-опоры" всех ЛЭП снижается, и сопротивление заземляющего устройства ПС становится меньше. Следует подчеркнуть, что итоговое сопротивление ЗУ ПС (сопротивление заземления системы "трос-опоры" всех ЛЭП и сопротивление заземлителя ПС) всегда должно быть равно или меньше величины нормируемого сопротивления, т.е. 0,5 Ом.

Выводы. Полученные результаты позволяют более точно определять значение расчетного тока ОКЗ в любой рассматриваемой точке электрической сети. Эти результаты необходимо учитывать при проектировании ЗУ ПС.

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 грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб. : ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.

Bibliography (transliterated): 1. .M. Bogatenkov, G. M. Imanov, V. E. Kizevetter *Tehnika vysokih naprjazhenij: Uchebnoe posobie dlja vuzov.* – S-Pb : Izd. PJeIPK 1998 Print. 2. Bazutkin V. V. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Izoljacija i perenaprjazhenija v jelektricheskikh sistemah: Uchebnik dlja vuzov* Moscow: Jenergoatomizdat, 1986. Print. 3. V. I. Gul', V. I. Nizhevskij, I. V. Homenko *Koordinacija izoljacji i perenaprjazhenija v jelektricheskikh vysokovol'tnyh setjah* Har'kov : JeDJeNA, 2009. Print. 4. Tihodeev N.N *Rukovodstvo po zashhite jelektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenaprjazhenij* SPb. : PJeIPK Mintopjenergo RF, 1999. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.315

В.В. ЧЕРКАШИНА, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПІ»

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПРИ "ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ" ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.

В статье показаны основные аспекты современной методологии проектирования воздушных линий, которые учитывают при "интеллектуализации" электрических сетей оптимизацию параметрического ряда сечений проводов и расширение технологического базиса их функциональных возможностей, что позволит выполнить переход линий от "пассивных" к активно-адаптивным объектам электрических сетей. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: воздушная линия, критериальный метод, активно-адаптивный объект, электрическая сеть, "интеллектуальная" сеть.

Введение. С ростом нагрузок и развитием мегаполисов электрические сети (ЭС) постепенно уходят от "пассивной" роли транспортных узлов энергосистемы. В перспективе ЭС – это сети наделенные "интеллектом", которые обладают активно-адаптивной способностью контролировать режимы работы и автоматически реагировать на изменение параметров, избегать энергетических блэкаутов, обеспечивая максимальный экономический эффект. Переход ЭС в активно-адаптивный формат позволит повысить системную надежность электросетевого комплекса, снизить потери и расход энергоресурсов, гибко регулировать перетоки мощности, обусловленные колебаниями генерации и потребления.

Ответственным элементом ЭС для транспорта и распределения электроэнергии являются воздушные линии (ВЛ), которые возможно использовать и для передачи дополнительной информации о параметрах режима работы в реальном времени, что соответствует "интеллектуализации" ЭС, а так же диктует необходимость нового подхода в методологии проектирования ВЛ для расширения их функциональных возможностей и формирования ВЛ как активно-адаптивного объекта.

Анализ последних исследований и публикаций. При глобализации мировой энергетики центральное место занимает концепции Smart Grid, в основу которой положена целостная и всесторонне согласованная система взглядов на роль и место электроэнергетики в настоящем и будущем, целей и требований к ее

развитию, подходов к их реализации и созданию необходимого технологического базиса [1, 2].

В таких условиях тенденция к расширению использования оптимизированных элементов ВЛ в вопросах проектирования ЭС является актуальной. Применение оптимизированных элементов в конструкции линий оставляют ВЛ "пассивными" объектами ЭС [1 - 3].

Согласно "интеллектуализации" ЭС следует, что ВЛ не должны быть "пассивным" объектом.

Учитывая условия развития ЭС еще при проектировании ВЛ необходимо учитывать то, что линии должны быть оснащены соответствующими средствами оценки, контроля и управления технологическим процессом транспорта и распределения электроэнергии в режиме "on-line". В ЭС уже применяются технические разработки, которые в режиме "on-line" осуществляют контроль параметров и текущего состояния ВЛ с учетом метеоданных [4 - 7].

Оснащение ВЛ соответствующими средствами оценки, контроля и управления технологическим процессом транспорта и распределения электроэнергии в режиме "on-line" взаимосвязано с конструкцией линий. Поэтому на современном этапе при проектировании ВЛ необходимо решать задачи, которые должны не только определять экономически целесообразные параметры и режимы работы ВЛ на сегодняшний день, но также и учитывать перспективы их развития, которые характеризуются изменением электрических нагрузок и расширением функциональных возможностей линий.

Цель статьи. Сформировать основные аспекты современной методологии проектирования воздушных линий, которые учитывают при "интеллектуализации" электрических сетей оптимизацию параметрического ряда сечений проводов и расширение технологического базиса их функциональных возможностей, что позволит выполнить переход линий от "пассивных" к активно-адаптивным объектам.

Материалы исследований. На сегодня существующие " типовые " проектные решения рассматривают ВЛ как " пассивные " объекты, т.е не учитывают оснащение линий соответствующими средствами оценки, контроля и управления технологическим процессом транспорта и распределения электроэнергии в режиме " on-line ". Применение различных сосредоточенных средств оценки, контроля и управления не решают вышеприведенную проблему так как ВЛ остаются " пассивным " объектом [1].

"Интеллектуализация" ЭС предусматривает проектирование ВЛ как активно-адаптивных объектов. Такие условия диктуют необходимость расширения и использования в вопросах проектирования ВЛ современных устройств оценки и контроля параметров и технического состояния объекта, что наибольшей степенью проявится при использовании системного подхода, который заключается во взаимосвязи проектирования и функционирования ЭС. Основой, которого является оптимизация параметрического ряда сечений проводов, которая отражает возможность использования типовых конструктивных решений и типовых технологических процессов при проектировании, что так же позволит частично решить и вопросы снижения неоднородности сети [4].

Для этих исследований был применен критериальный метод, позволяющий в определённой мере обособить параметрический ряд сечений проводов и использована современная математическая модель ВЛ, основное отличие которой заключается в изменении аналитической связи инвестиционных вложений в ВЛ с сечением провода [4, 6].

Научные исследования относительных темпов изменения нагрузок ВЛ на основании статистической обработки позволили получить результаты, которые показали, что наиболее приемлемый коэффициент нарастания шкалы сечений проводов близкий к 2. Приняв данную информацию за основу, было получено значение сечений проводов для разных классов напряжения, что позволяет сформировать оптимальные сечения проводов при проектировании объекта [4].

Задачи оптимизации элементов конструкции ВЛ относятся к технико-экономическим задачам в электроэнергетической отрасли.

При решении подобного рода задач критериальным методом [6] определяются экономически целесообразные значения параметров оптимизации

$$x_{j0} = x(R_a, A_i); \quad (1)$$

$$y_{j0} = e(R_a, A_i), \quad (2)$$

где A_i - обобщенные константы, несущие определенную исходную информацию; R_a - критерии подобия, зависящие от исходной информации.

Так как исходная информация об исследуемом объекте используется с определенной погрешностью, то при анализе объекта желательно знать, как влияет на функцию цели отклонение параметров

оптимизации от своих экономически целесообразных значений. Считают модель устойчивой, если малые отклонения её параметров ведут к незначительным отклонениям функции цели.

Для исследования чувствительности параметров к изменению информации с учетом изменения во времени целевая функция дисконтных затрат в критериальной форме имеет вид:

$$Z = A_1 F^{0,25} + A_2 F^{-1}, \quad (3)$$

Коэффициенты A_1 A_2 зависят от изменений во времени следующим образом

$$A_1 = \frac{A_1'}{P}, \quad A_2 = \frac{A_2'}{P}, \quad (4)$$

где P - функция изменения плотности нагрузки.

При решении технико-экономических задач критериальным методом большое значение имеет величина отклонения дисконтных затрат от точки условного минимума, определяющая область допустимых изменений оптимизируемых параметров, в пределах которого варианты исследуемого объекта будут экономически равнозначны, а исследуемый объект экономически устойчив к изменению этих параметров [3].

При этом вопрос оптимизации параметрического ряда сечения проводов ВЛ в значительной степени влияет на срок реконструкции, под которым понимают время замены проводов с целью экономически эффективного транспорта и распределения электроэнергии, а так же снижения технологических потерь [7].

Однако, обособленно оптимизация конструкции не решает вопросов связанных с повышением "интеллекта" линий, потому что ВЛ остаются "пассивными" объектами ЭС. Поэтому, при проектировании ВЛ необходимо учитывать то, что линия должна быть оснащена соответствующими средствами оценки, контроля и управления технологическим процессом транспорта и распределения электроэнергии в режиме "on-line" [3 - 5].

Учет таких разработок при проектировании ВЛ позволит выполнить переход линии с "пассивных" в активно-адаптивные объекты ЭС, что позволит: контролировать реальное техническое состояние ВЛ на основании разработанных методик с использованием соответствующих датчиков; выполнять оценку предельных значений длительных и кратковременных токов нагрузки; управлять режимами токовой нагрузки ВЛ в соответствии с реальными данными о термической стойкости проводов ВЛ; регулировать перетоки

мощности по ЭС; контролировать уровень технологических потерь; соблюдать габариты ВЛ; корректировать режимы работы ЭС.

Исходя из вышеизложенного следует, что формирование современной методологии проектирования ВЛ должно состоять из двух этапов: на первом этапе целесообразна оптимизация параметрического ряда сечений проводов с учетом перспективы функционирования ВЛ, что так же позволит частично решить и вопросы снижения неоднородности сети; на втором этапе целесообразно предусмотреть оснащение этих линий дополнительными элементами оценки и контроля, что переводит их в активно-адаптивные объекты ЭС.

Вывод. Основными аспектами методологии проектирования воздушных линий при "интеллектуализации" электрических сетей является оптимизация параметрического ряда сечений проводов и учет соответствующих средств, которые расширяют технологический базис их функциональных возможностей за счет дополнительной информации о параметрах в режиме "on-line", что позволит выполнить переход линий от "пассивных" к активно-адаптивным объектам электрических сетей.

Список литературы: 1. Кобец Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова - М.: ИАЦ Энергия, 2010.-208 с. 2. Толишаков А.В. SMART GRID: развитие, практика, проблемы / А.В. Толишаков // Энергонадзор, 2014, № 1 - С. 53., № 2 – С.54. 3. Лежнюк П.Д. Повышение эффективности управления режимами электрических сетей на базе мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды / П.Д. Лежнюк, Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина и др. // Электрические сети и системы.-Киев: ТОВ "Гнозис"– 2012. – №5. – С. – 39-46. 4. <http://praci.vntu.edu.ua/> Lezhniuk P.D. Unification of overhead lines in the conditions of the market of twoparty agreements and balancing electric energy y market / P.D. Lezhniuk, M.M. Cheremisin, V.V. Cherkashyna / Energetics and electrical engineering, 2013, № 4 – 8 с. 5. Тумов Н.Н. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии / Н.Н. Тумов, Н.М. Черемисин, П.Д. Лежнюк и др. – Праці інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонні контракти і балансууючого ринку. – 2009. – С.41–48. 6. Черемисин Н.М. Критериальный метод анализа технико-экономических задач в электрических сетях и системах. Учебное пособие / Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина– Харьков: Факт, 2014. – 88 с. 7. Черкашина В.В. Фактор времени в стратегии усовершенствования электрических сетей. / В.В. Черкашина – Електротехніка і Електромеханіка, 2014.–№3– С.65–68.

Bibliography (transliterated): 1. Kobec B.B. I.O. Volkova *Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii Smart Grid.*, - Moscow IAC Jenergija, 2010. Print 2. Tolshakov A.V. SMART GRID: razvitie, praktika, problemy *Jenergonadzor*, 2014. No.1 5 Print. 3. Lezhnjuk P.D. Povysenie jeffektivnosti upravlenija rezhimami jelektriqueskih setej na baze monitoringa parametrov vozdušnyh linij i okružhajushhej sredy // *Jelektriqueskie seti i*

sistemy.-Київ: 2012. No.5. 39-46.Print. 5. Titov N.N. Formirovanie vedomstvennoj sistemy sbora metodannyh v uslovijah jeffektivnogo optovogo rynku jelektroenergii Praci institutu elektrodinamiki NAN Ukraїni. Special'nyj vipusk. Energetichni rinky: perehid do novoї modeli rinku dvostoronnїi kontraktiv i balansujučogo rinku. 2009. 41–48. Print. 6. Cheremisin N.M. Kriterial'nyj metod analiza tehniko-jekonomicheskikh zadach v jelektricheskikh setjah i sistemah. Uchebnoe posobie / Khar'kiv: Fakt, 2014. Print. 7. Cherkashina V.V. Faktor vremeni v strategii usovershenstvovanija jelektricheskikh setej. Elektrotehnika i Elektromehanika, 2014. No. 3. 65–68.Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 678.7:621.315

О. В. ЧУЛЄЄВА, канд. техн. наук, головний спеціаліст з полімерних матеріалів, «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», Харків;
Л. Г. ВАСИЛЕЦЬ, канд. техн. наук, директор НТЦ ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», Харків.

ОСОБЛИВОСТІ МОДИФІКУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙ ПОЛІОЛЕФІНІВ, ЯКІ ЗДАТНІ ДО ЗШИВАННЯ ТА САМОСТІЙНОГО ЗАГАСАННЯ.

Отримано композиції поліолефінів, які здатні до зшивання та самостійного загасання. Показано, що змінюючи співвідношення між компонентами системи зшивання та антипіренів, можна отримати композиції поліолефінів, що забезпечують високі показники пожежної безпеки і високі ступені зшивання одночасно.

Ключові слова: композиції поліолефінів, які здатні до зшивання та самостійного загасання, кисневий індекс, ступінь зшивання, антипірени.

Постановка проблеми. Освоєння промислового виробництва сучасних конструкцій силових ізольованих проводів (СІП) вимагає застосування нових прогресивних полімерних матеріалів – композицій поліолефінів, що здатні до зшивання силанами, із заданим поєднанням властивостей. Суть методу полягає в щепленні органосилану до поліолефіну. Просторова структуризація модифікованого силаном полімеру здійснюється за рахунок утворення силоксанових ланок в процесі гідролізу під дією вологи, які потім конденсуються з утворенням — Si — O — Si — зв'язків і виділенням води. Композиції поліолефінів, структуровані за допомогою силанів, характеризуються підвищенням механічної міцності, термостійкості, покращенням електроізоляційних властивостей [1, 2].

Важливим фактором, який стримує впровадження цих полімерних матеріалів під час виробництва кабелів та кабельної продукції, є притаманна поліолефінам пожежна небезпека, що обумовлена горючістю та процесами, що її супроводжують, тобто спроможністю матеріалу до спалахування, та підтримання й розповсюдження горіння. В Україні згідно з вимогами правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та ДСТУ 4743:2007 «Проводи самоутримні ізольовані та захищені для повітряних ліній електропередавання. Загальні технічні умови» виникла необхідність створення композицій поліолефінів, що здатні до зшивання силанами,

© О. В. Чулєєва, Л. Г. Василюк, 2015

які самостійно загасають [3 – 7]. Під час розроблення та використання композицій поліолефінів, що здатні до зшивання силанами, необхідно застосувати сукупність засобів, які сприяють зниженню спроможності матеріалу спалахувати, підтримувати та розповсюджувати горіння.

Ціль роботи. Аналіз особливостей модифікування композицій поліолефінів які здатні до зшивання та самостійного загасання.

Основні результати. Під час проведення досліджень використовували поліолефіни (поліетилен низької густини (LDPE), лінійний поліетилен низької густини (LLDPE); антипірени, що є сумішами органічних сполук хлору або брому та Sb_2O_3 в співвідношенні 3:1; системи зшивання з використанням вінілтриметоксисилану. Характеристики матеріалів наведено в табл. 1 – 3.

Таблиця 1 – Характеристики поліолефінів

Показник	Поліетилен низької густини LDPE	Лінійний поліетилен низької густини LLDPE	Лінійний поліетилен низької густини LLDPE
Густина, $кг/м^3$	$918,5 \pm 15$	$920,0 \pm 15$	$920,0 \pm 15$
Показник текучості розплаву $г/10$ хв, 463 К, $21,6$ Н	$2,0 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$

Таблиця 2 – Характеристики антипіренів

Показник	ХОС	БОС
Вміст, %:		
– брому	–	83
– хлору	70	–
Температура плавлення, К	349	578,4
Температура розкладення, К	623	753

Таблиця 3 – Характеристики триокиси сурми

Показник	Норма
Густина, $кг/м^3$	519
Температура плавлення, К	928
Температура кипіння, К	1729
Масова доля триокису сурми, %, не менше ніж	98,7
Масова доля вологи, % не більше ніж	0,1

Система зшивання, яка містить вінілтриметоксисилан, ініціатор та каталізатор зшивання, вводилась в полімерну матрицю у вигляді 40 %

концентрату на полімерній основі. Таким чином отримували сухий концентрат силану (СКС) [8]. СКС вводили в композицію під час нанесення полімерної ізоляції на струмопровідну жилу в процесі виготовлення кабельної продукції. Композиції поліолефінів 1 – 6 (табл. 4) виготовлялись з використанням лінії компаундування компанії ERMAFA на базі двошнекового екструдера BTS 50-35D з діаметром шнеку (D), що дорівнює 0,05 м та відношенням довжини шнеку до діаметру (L/D), що дорівнює 35. Зразки самоутримних ізолюваних проводів марки СІПн 2x35 виготовляли використовуючи композиції поліолефінів 1 – 6 на лінії ізолювання компанії ROSENDAHL на базі екструдера RE 1 – 120 ARZ з діаметром шнеку (D), що дорівнює 0,03 м та відношенням довжини шнеку до діаметру (L/D), що дорівнює 30.

Таблиця 4 – Композиції поліолефінів

Композиція	Інгредієнти
1	LDPE + антипірен (ХОС + Sb_2O_3)
2	LLDPE (ІТП 3,0) + антипірен (ХОС + Sb_2O_3)
3	LLDPE (ІТП 2,0) + антипірен (ХОС + Sb_2O_3)
4	LDPE + антипірен (БОС + Sb_2O_3)
5	LLDPE (ІТП 3,0) + антипірен (БОС + Sb_2O_3)
6	LLDPE (ІТП 2,0) + антипірен (БОС + Sb_2O_3)

Досліджували вплив окремих компонентів антипіренів, а також параметрів процесу на зшивання поліолефінів. Спочатку визначали як змінюється значення кисневого індексу (КІ) в залежності від вмісту антипіренів. Кисневий індекс визначали відповідно до [7]. Результати надані на рис. 1.

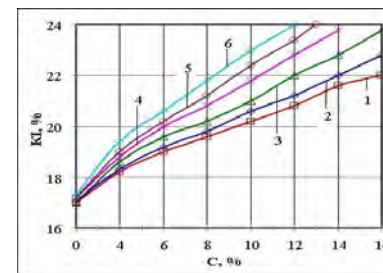


Рис. 1. – Залежність кисневого індексу (КІ) від вмісту антипірену (С) композицій 1 – 6

Ефективність вогнезахисної дії суміші триокису сурми зі сполуками галогену визначається співвідношенням сурми та галогену,

доступністю сполуки галогену, та характером продуктів розкладення. Суміші сполук галогенів, які виділяють кислоту цього галогену, за значення співвідношення галогену та сурми 3:1 створюють виключно галогенід сурми (III). В той час, коли співвідношення є меншим, або якщо головним продуктом розкладення є елементарний галоген, утворюється суміш галогеніду та галогенокису сурми. Згідно з рис. 1 КІ підвищується зі збільшенням кількості антипірену усіх полімерних композицій. КІ вище під час використання лінійних поліетиленів низької густини (LLDPE) в порівнянні з поліетиленом низької густини (LDPE), а також під час використання в якості антипіренів сумішей БОС та Sb_2O_3 . Таким чином, у композицій, що здатні до зшивання та містять суміші сурми та сполуки галогену з більшою температурою плавлення і розкладення, значення КІ вищі ніж у композицій, які мають нижчі значення температур плавлення і розкладення сполуки галогену.

Викликає інтерес дослідження зміни спупіно зшивання полімерних композицій в залежності від кількості антипіренів. Ступінь зшивання оцінювали за значенням фракції гелю згідно з методикою [9]. Для зшивання полімерних композицій витримували зразки кабельної продукції у воді за температури 363 К. Результати випробувань наведено на рис. 2.

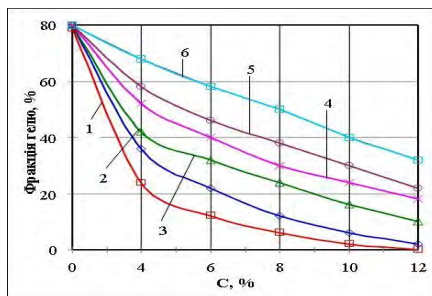


Рис. 2. – Залежність ступеню зшивання (фракція гелю) від вмісту антипірену (C) композицій 1 – 6, в кожній з яких концентрація СКС дорівнює 2,5 %

Як показали дані, які попередньо отримано, з підвищенням вмісту антипіренів в композиціях з однаковим вмістом СКС, що дорівнює 2,5 %, ступінь зшивання (фракція гелю) знижується. Особливо різке зниження спостерігається для зразків, де в якості антипірену використано суміш ХОС та Sb_2O_3 (криві 1, 2, 3) та менш різке під час

використання суміші БОС та Sb_2O_3 (криві 4, 5, 6). Вивчення характеристик полімерних композицій на оболонках проводів марки СІПн проводили за методиками згідно ДСТУ 4743:2007. Результати наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Характеристики композицій поліолефінів

Назва характеристики	Вимоги ДСТУ 4743:2007	Значення характеристик для композиції №					
		1	2	3	4	5	6
Міцність під час розтягування до випробування на старіння, МПа, не менше ніж	12,5	14,0	15,0	16,0	14,5	16,0	17,5
Відносне видовження у разі розриву до випробування на старіння, %, не менше ніж	200	350	400	450	375	420	475
Відхил значення міцності під час розтягування після випробування на старіння в термостаті за температури $(135 \pm 3)^\circ\text{C}$ протягом 168 год, %, не більше ніж	± 25	± 5	± 10	± 10	± 7	± 11	± 12
Відхил значення відносного видовження у разі розриву після випробування на старіння в термостаті за температури $(135 \pm 3)^\circ\text{C}$ протягом 168 год, %, не більше ніж	+ 25	+ 2	+ 5	+ 7	+ 5	+ 10	+ 10
Відносне видовження після витримування протягом 15 хв за температури $(200 \pm 3)^\circ\text{C}$ і розтягуювального напруження 0,2 МПа, %, не більше ніж	175	175	170	170	150	50	10

Продовження таблиці 5

Залишкове відносне видовження після зняття напруження та охолодження, %, не більше ніж	15	15	13	12	10	5	2
Водопоглинання після витримування протягом 336 год у воді за температури (85 ± 2) °С, яке характеризується зміною маси, мг/см ² , не більше ніж	1	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,25
Усадка після витримування в термостаті за температури (130 ± 3) °С протягом 1 год, %, не більше ніж	4	4	3,7	3,5	3,5	3,3	3,1
Стійкість до продавлювання в разі дії температури (90 ± 2) °С протягом 4 год, яку характеризують глибиною продавлювання, %, не більше ніж	50	50	48	47	45	25	20
Вміст нерозчинної фракції (гель-фракції) для проводів СІПн, %, не менше ніж	50	50	52	55	55	65	70

Висновки. Таким чином при модифікації композицій поліолефінів, які здатні до зшивання та самостійного загасання, біфункціональними кремнійорганічними сполуками (силанами), галогенвмісними антипіренами та триоксидом сурьми цілком доцільно визначити оптимальні концентрації інгредієнтів для кожної композиції.

При перевищенні кількості антипіренів (суміші галогеновмісних сполук та сурьми) можлива недостатня ступінь зшивання композицій поліолефінів.

За показниками вмісту кількості гелю після зшивання та кисневого індексу визначили, що з метою зниження горючості вимог нормативної документації композицій поліолефінів, які здатні до зшивання силанами, повинні вміщувати від 8 % до 12 % суміші ХОС та Sb₂O₃, або від 3 % до 6 % суміші БОС та Sb₂O₃.

Список літератури: 1. Чулеєва О.В., Золотарьов В.М. та інші. Здатна до зшивання композиція. – Патент України на винахід № 84011//Бюл. № 17. – 2008; 2. Чулеєва О.В., Золотарьов В.М. та інші. Здатна до зшивання композиція. – Патент України на винахід № 84144 //Бюл. № 18. – 2008; 3. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. – М.: «Химия», 1976. – 160 с; 4. Селихов Н.А. Антипирены: современные технологические аспекты производств и применения, анализ рыночной конъюнктуры. – Черкассы, 2007. – 57 с; 5. Правила улаштування електроустановок. Видання 3-тє, перероблене і доповнене. – Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с; 6. ДСТУ 4743:2007 Проводи самоутримні ізолювані та захищені для повітряних ліній електропередавання; 7. ДСТУ 4809:2007 Ізолювані проводи та кабелі. Вимоги пожежної безпеки та методи випробування; 8. Чулеєва Е. В., Золотарёв В. М., Пахаренко В. А. Разработка составов и способов получения концентратов для производства сшиваемых полиолефиновых композиций // Пластические массы. – 2009. – № 10. – С 41-46; 9. Рабочая методика РМИ-К-28-47 Определение содержания нерастворимой фракции вулканизированного полиэтилена // ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ».

Bibliography (transliterated): 1. Chuleeva O.V., Zolotar'ov V.M.. Zdatna do zshivannja kompozicija.. – 2008. Print. 2. Chuleeva O.V., Zolotar'ov V.M. ta inshi. Zdatna do zshivannja kompozicija. 2008 Print.. 3. Kodolov V.I. Gorjuchest' i ognestojkost' polimernyh materialov. – Moscow Himija, 1976. Print. 4. Selihov N.A. Antipireny: sovremennye tehnologicheskie aspekty proizvodstv i primenenija, analiz rynochnoj kon'junktury. Cherkassy, 2007. Print. 5. Pravila ulashtuvannja elektroustanovok. Vidannja 3-te, pereroblene i dopovnene. – Minpalivenergo Ukraїni, 2010. Print. 6. DSTU 4743:2007 Provodi samoutrimni izol'ovani ta zahishheni dlja povitrjanih linij elektroperedavannja; 2007 Print. 7. DSTU 4809:2007 Izol'ovani provodi ta kabeli. Vimogi pozhezhnoi bezpeki ta metodi viprobuvannja 2007 Print. 8. Chuleeva E. V., Zolotar'ov V. M., Paharenko V. A. Razrabotka sostavov i sposobov poluchenija koncentratov dlja proizvodstva sshivaemyh poliolefinovyh kompozicij Plasticheskie massy. – 2009. No. 10. 41-46 Print

Поступила (received) 29.04.2015

С. Ю. ШЕВЧЕНКО канд. техн. наук, профессор НТУ «ХП».
Б. Ф. ЕРМОЛЕНКО зав. лаб. НТУ «ХП»
Д. О. ДАНИЛЬЧНКО ассистент НТУ «ХП»
С. И. ДРИВЕЦКИЙ ассистент НТУ «ХП»

ПОРАЖАЕМОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ЗАЩИЩЕННЫМИ ПРОВОДАМИ ГРОВОИМИ РАЗРЯДАМИ

Целью статьи является определение, экспериментальным путем на крупномасштабных моделях, вероятности прямого удара молнии в ВЛ с защищенными проводами при различных конфигурациях моделей. Результаты экспериментов позволили опровергнуть гипотезу об отсутствии прямых ударов в защищенные провода воздушных линий. Проведенные исследования позволяют предположить, что грозопоражаемость воздушных линий с защищенными проводами существенно ниже грозопоражаемости линий традиционного исполнения.

Ключевые слова: молниезащита, прямой удар молнии, распределительные сети, защищенные провода

Постановка проблемы. Качество обеспечения потребителей электроэнергией непосредственно зависит от надежности работы распределительных электрических сетей, которые являются ключевым звеном в системе электроснабжения. Для повышения эффективности, технического уровня и безопасности распределительных сетей необходимо использование новых научно обоснованных технических решений и технологий. Одной из основных причин аварий и нарушений в распределительных сетях являются грозовые перенапряжения на воздушных линиях (ВЛ), вызывающие импульсные перекрытия, разрушения изоляторов, приводящие к дуговым замыканиям, сопутствующим повреждениям оборудования и отключениям линий. Однако, действовавшие нормы не предусматривали какой-либо специальной защиты от грозовых перенапряжений ВЛ с неизолированными проводами напряжением до 20 кВ, за исключением случаев защиты отдельных точек ВЛ с ослабленной изоляцией или с повышенными требованиями по надежности.

Такое состояние вопроса грозозащиты распределительных ВЛ было следствием исторически сложившегося признания неизбежности их грозовых аварийных отключений и повреждений в силу отсутствия

© С. Ю. Шевченко, Б. Ф. Ермоленко, Д. О. Данильченко, 2015

эффективных и экономически доступных технических средств. Однако с началом массового применения на распределительных ВЛ защищенных проводов возникла необходимость принятия обязательных технических мер по их грозозащите.

Анализ публикаций. Особенностью проблемы грозозащиты защищенных воздушных линий (ВЛЗ) является то, что в случае отсутствия специальных мер, при грозовом перекрытии изолятора линии, сопровождаемом пробоем твердой изоляции провода, образующаяся с большой вероятностью дуга промышленной частоты не имеет возможности перемещаться по проводу (как при голых проводах) и горит в месте пробоя изоляции до момента отключения линии [1,3]. Это может привести к порче изоляции провода, повреждению изолятора линии и к пережогу провода, что подтверждается опытом эксплуатации линий с изолированными проводами. Поскольку на линии с неизолированными проводами дуга под воздействием электродинамических сил способна перемещаться одним из своих концов вдоль провода, фактор повреждения провода вследствие теплового воздействия дуги был малозначим и никак не влиял на формирование концепции грозозащиты ВЛ. В случае же ВЛЗ предотвращение пережога провода становится главным условием, определяющим необходимость обязательного применения тех или иных грозозащитных мер [2].

Цель статьи. Определение, экспериментальным путем на крупномасштабных моделях, вероятности прямого удара молнии в ВЛ с защищенными проводами при различных конфигурациях моделей.

Метод решения. Исследование и разработка способов и устройств, которые бы предотвращали пережог проводов при воздействиях перенапряжений, на сегодня являются востребованными в Украине в связи с тем что техническая политика в области электроэнергетики предусматривает масштабное использование защищенных проводов при новом строительстве и реконструкции линий электропередачи. В связи с этим группа специалистов Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» совместно с фирмой «СИКАМ Украина» приступила к исследованиям возможности повышения грозоупорности линий с защищенными проводами.

В некоторых литературных источниках высказывается предположение, что вероятность прямого удара в провод ВЛЗ отсутствует. Для проверки этой гипотезы были выполнены экспериментальные исследования вероятности удара молнии в провод

ВЛЗ для различных условий. В лаборатории сверхвысоких напряжений кафедры «Передача электрической энергии» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» была создана модель ВЛ позволяющая смоделировать линию с голыми или защищенными проводами. Эта модель дает возможность выполнить эксперименты для определения вероятности прямого удара молнии в ВЛЗ и ВЛ при различных геометрических параметрах линий. В качестве источника высокого напряжения использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) с максимальным напряжением 2.4 МВ, внешний вид которого приведен на рисунке 1.

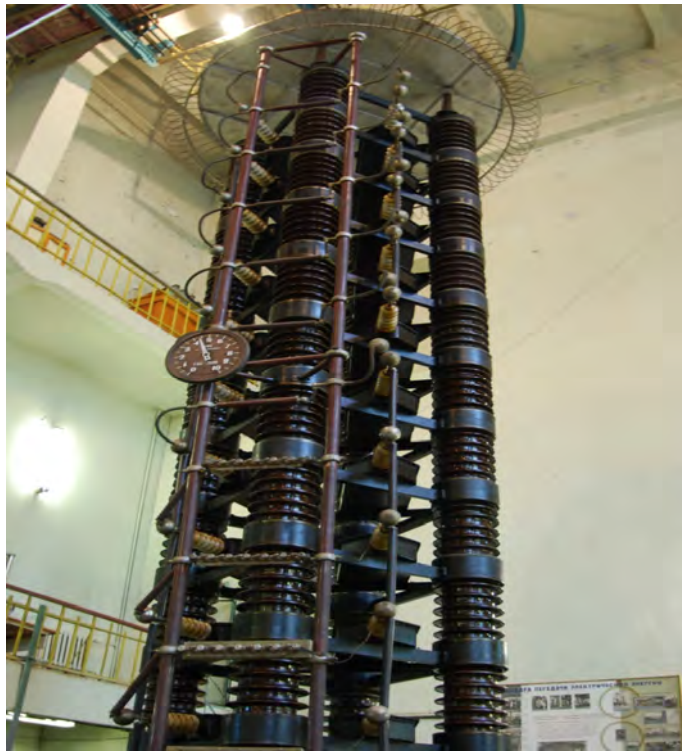


Рис. 1 – Генератор импульсных напряжений 2,4 МВ.

Общий вид модели приведен на рисунке 2.

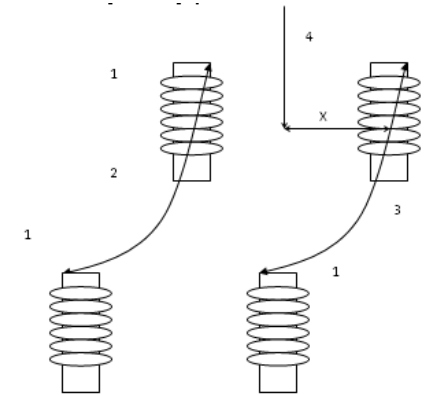


Рис. 2 – Общий вид модели. 1 опорный изолятор, 2 голый провод, 3 защищенный провод, 4 электрод имитирующий молнию, X расстояние от электрода имитирующего молнию до защищенного провода .

Высота ориентировки лабораторной искры может быть определена исходя из того, что высота ориентировки молнии при высотах объектов поражения до 30 метров составляет $5h_n$ [5]. Поэтому высота ориентировки лабораторной искры определяется как:

$$h_m = 5h_n / 30 = 1,3 \text{ м}$$

где, h_m - модельная высота подвеса провода;

h_n – высоты до точки подвеса проводов

В первой серии экспериментов было выполнено сравнение вероятности прямого удара молнии в провода, для линий на которых одновременно подвешены и защищенные и голые провода. Параметры модели имели следующие значения: электрод находился на высоте 1,3 метра от поверхности «земли», на высоте 20 см от поверхности «земли» были подвешены изолированный и голый провод, на расстояние 90 см друг от друга, электрод имитирующий молнию устанавливался строго посередине между проводами. По результатам 100 опытов все разряды пришлись в голый провод. Такой результат позволяет сделать вывод о повышенной грозоупорности линий с защищенными проводами.

Вторая серия экспериментов была выполнена на аналогичной модели линий на которых одновременно подвешены и защищенные и голые провода. Основным отличием этой серии экспериментов было то, что электрод имитирующий молнию устанавливался на расстоянии

30 см от защищенного и 60 см от голого. Такое расположение электрода имитирующего молнию позволяет исследовать вероятность прямого удара в провода линий при возникновении канала молнии в произвольном месте пространства. Параметры модели имели те же значения, что и в первой серии экспериментов. Было выполнено четыре серии экспериментов по 100 опытов в каждой, полученные результаты выглядят следующим образом, в двух сериях экспериментов, 70 ударов пришлось в голый провод и 30 ударов в защищенный, в одной 68 ударов в голый провод и 32 в защищенный и в последней 73 в голый провод и 27 в защищенный. Из полученных результатов видно что вероятность прямого удара в защищенный провод составляет 30% от общего количества ударов. При расположении электрода имитирующего молнию вне плоскости модели появляются разряды в землю, что подтверждает правильность выбора параметров модели.

В третьей серии экспериментов было выполнено сравнение вероятности прямого удара молнии для линий на которых одновременно подвешены и защищенные и голые провода. Параметры модели были аналогичны первым двум экспериментам. А электрод имитирующий молнию устанавливался строго над защищенным проводом. Было выполнено 5 серий по 100 опытов каждая. В двух из них вероятность прямого удара в защищенный провод составила 50% от общего количества ударов, в последующих сериях вероятность колебалась в пределах 47 – 51 %.

В четвертой серии экспериментов определялась вероятность удара молнии в защищенный провод при равенстве расстояний от провода до электрода имитирующего молнию и от указанного электрода до земли. Высота подвеса электрода и провода были теми же, что и в предыдущих экспериментах. Было проведено четыре серии по 100 опытов каждая. Вероятность удара в защищенный провод изменялась в пределах от 26% до 32% от общего количества ударов.

При выполнении пятой серии экспериментов определялась вероятность удара молнии в голый провод при равенстве расстояний от провода до электрода имитирующего молнию и от указанного электрода до земли. Высота подвеса электрода и провода были теми же, что и в предыдущих экспериментах. Было проведено 3 серии по 100 опытов каждая. Вероятность удара в голый провод изменялась в пределах от 70% до 72% от общего количества ударов.

Обсуждение результатов. В процессе проведения экспериментов была выявлена отличная от нуля вероятность

поражения защищенного провода, что опровергает гипотезу о невозможности прямого удара в такой провод. При условии расположения электрода имитирующего молнию строго посередине между голым и защищенным проводами, не были зафиксированы разряды в защищенный провод модели. В случае смещения электрода имитирующего молнию в сторону защищенного провода увеличивается вероятность его поражения. Если электрод имитирующий молнию расположен ближе к защищенному проводу чем к голому (в опыте расстояние от голого провода до оси электрода составляло 70% от общего), защищенный провод поражен с вероятностью 30%. Самым тяжелым случаем, с точки зрения поражаемости провода был случай расположения электрода имитирующего молнию над защищенным проводом. Защищенный провод поражен с вероятностью 50%. При расположении электрода имитирующего молнию на равных расстояниях от защищенного провода и электрода имитирующего молнию вероятность поражения провода приблизительно равна 30%, а при такой же конфигурации модели для голого провода вероятность его поражения равна 70%. Такие результаты дают возможность предположить, что защищенные провода будут подвержены прямым ударам молнии в два раза реже чем голые. Это позволит существенно увеличить расчетную грозоупорность линий с защищенным проводом. На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод что, зона захвата голого провода в 3 раз превышает зону захвата защищенного провода. Этот факт иллюстрирует существенное снижение расчетной площади с которой вероятны прямые удары молнии в линию с защищенными проводами. Указанная площадь, наряду с количеством грозových часов и протяженностью линии, используется при расчетах числа прямых ударов молнии в линию $N_{\text{пум}}$. Ее снижение приводит к пропорциональному уменьшению расчетного $N_{\text{пум}}$ и соответственно к увеличению грозоупорности линии с защищенными проводами.

Выводы.

1. Результаты экспериментов позволили опровергнуть гипотезу об отсутствии прямых ударов в защищенные провода воздушных линий.

2. Проведенные исследования позволяют предположить, что грозопоражаемость воздушных линий с защищенными проводами существенно ниже грозопоражаемости линий традиционного исполнения.

3. Полученные результаты указывают на необходимость проведения дальнейших исследований грозопоражаемости воздушных линий с защищенными проводами.

Список літератури. 1. Г. В. Подпоркин Современная грозозащита распределительных воздушных линий 6, 10 кВ длинно-искровыми разрядниками, / Г. В. Подпоркин, А. Д. Сиваев // – 2006. – Электро. – №1. С. 15 – 18. 2. Г. В. Подпоркин Защита компактных ВЛ 10 кВ от грозовых индуктированных перенапряжений, / Г. В. Подпоркин, В. Е. Пильщиков, А. Д. Сиваев // Энерго-инфо. – 2007, – №. 4. С. 12-15. 3. Г. В. Подпоркин Система защиты ВЛ 35 кВ с защищенными проводами от грозовых перенапряжений и их пережога, / Г. В. Подпоркин, Е. С. Калакутский // Энергетик. – 2006. – №10. – с. 19-22. 4. Александров Г.Н., Исследование грозопоражаемости воздушных линий на крупномасштабных моделях. / Александров Г.Н., Подпоркин Г.В., Лысков Ю.И., Шевченко С.Ю. // Электричество. – 1991. – №1. С.35 - 38. 5. Базелян Э.М. Инженерные и физические основы молниезащиты. / Базелян Э.М. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с

Bibliography (transliterated): 1. G. V. Podporkin, A. D. Sivaev Sovremennaja grozozashhita raspredelitel'nyh vozdushnyh linij 6, 10 kV dlinno-iskrovymi razrjadnikami, *Jelektro*, 2006, No. 1. 15 -18 Print. 2. G. V. Podporkin, V. E. Pil'shhikov, A. D. Sivaev Zashhita kompaktnyh VL 10 kV ot grozovyh induktirovannyh perenaprzazhenij, *Jenergo-info*. 2007. No. 4. 12-15 Print. 3. G. V. Podporkin, E. S. Kalakutskij Sistema zashhity VL 35 kV s zashhishhjonnyimi provodami ot grozovyh perenaprzazhenij i ih perezhoga, *Jenergetik*, 2006, No. 10, 19-22. Print. 4. Aleksandrov G.N., Podporkin G.V., Lyskov Ju.I., Shevchenko S.Ju. Issledovanie grozoporazhaemosti vozdushnyh linij na krupnomasshtabnyh modeljah. *Jelektrichestvo* 1991, No.1. 35-38 Print. 5. Bazeljan Je.M *Inzhenernye i fizicheskie osnovy molniezashhity*. Moscow Jenergoatomizdat, 1986. Print

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.314

С. Ю ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, профессор НТУ «ХПИ».

СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО ДЛЯ АНАЛІЗУ ЙОГО РОБОТИ ПРИ ПОРУШЕННЯХ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖІ

Метою даної роботи є визначення схем заміщення ОПН в режимах довгострокового прикладення робочої напруги, які дозволять виконувати аналіз їх роботи в умовах порушень якості електричної енергії. Наведена схема заміщення ОПН враховує компоненти необхідні для аналізу режиму роботи обмежувача перенапруг в цілому в області вольт амперної характеристики, що стосується струмів витоку. Такий аналіз дозволить уточнити вибір ОПН враховуючи його роботу у зоні струмів витоку вольт амперної характеристики, де він працює найбільше часу.

Ключові слова: обмежувач перенапруг нелінійний, схема заміщення

Постановка проблеми. Одним з важливих питань при виборі та експлуатації обмежувачі перенапруг нелінійних (ОПН) є вибір найбільшої робочої напруги, яка дозволить ОПН достатній час витримувати її дію. На сьогодні значення найбільшої припустимої напруги визначають за значенням аналогічної напруги електричної мережі де встановлено ОПН. Такий підхід буде давати хороші результати тільки тоді, коли в мережі, що розглядається не можливі відхилення якості електричної енергії від тих що зазначені у нормативних документах для даного класу напруги. Такі відхилення можуть бути викликані наявністю в електричній мережі гармонічних коливань або вірогідними підвищеннями напруги до рівнів при яких час безаварійної роботи ОПН може суттєво скоротитися[12]. Для аналізу подібних режимів роботи ОПН необхідно мати відповідні алгоритми та схеми заміщення, які дозволять проаналізувати параметри, що впливають на їх нормальну роботу та дозволять скоротити аварійність.

Аналіз публікацій Схеми заміщення ОПН достатньо детально розглянуті в літературі[2,3,4,5,6,7,8,9]. Існує декілька визнаних та рекомендованих схем заміщення, які добре відображають роботу ОПН в режимах протікання по ним достатньо великих струмів та дозволяють з великою точністю розрахувати залишкові напруги ОПН. Подібні розрахунки, з успіхом, використовують при аналізі різноманітних перенапруг в електричній мережі[6,7,8,9,10,11,13,14].

© С. Ю. Шевченко, 2015

Однак слід зауважити, що подібні схеми не враховують ту обставину, що ОПН мають три ділянки вольт амперної характеристики на яких змінюється властивості ОПН від діелектрика до провідника. Такі зміни обумовлені електрофізичними властивостями ОПН, у якого при переході до робочої зони вольт амперної характеристики (ВАХ) ємність зменшується до мулевих значень.

Ціль статті. Метою даної роботи є визначення схем заміщення ОПН в режимах довгострокового прикладення робочої напруги, які дозволять виконувати аналіз їх роботи в умовах порушень якості електричної енергії.

Метод рішення. Основним критерієм нормальної роботи ОПН протягом тривалого часу є його спроможність розсіювати енергію яка проходить скрізь нього протягом всього строку експлуатації. Значення такої енергії в режимах струмів витоку визначається діелектричними втратами в матеріалі варисторів ОПН. Ця обставина а також те що ОПН конструктивно представляє з себе конденсатор дозволяє провести аналіз втрат в ньому виходячи з визначення втрат в матеріалі з якого він виготовлений.

Для вивчення діелектричних втрат будь якого діелектрика, необхідно розглянути конденсатор з цим матеріалом в колі змінного струму [1], що відповідає представленню ОПН в області струмів витоку в якості конденсатора. Реальний конденсатор має деяку ємність C , в ньому розсіюється деяка потужність P , а кут зсуву фаз між струмом і напругою дорівнює φ . Еквівалентна схема реального конденсатора буде містити ідеальний конденсатор та активний опір, включений паралельно або послідовно з конденсатором. Для варистора в таку схему необхідно додати нелінійний опір. Однак в області струмів витоку він буде дорівнювати безкінечності (струм провідності по варистору дорівнює нулю) тому не вплине на подальші висновки. За цією ознакою розглянемо два види еквівалентної схеми: паралельну і послідовну. Параметри цих еквівалентних схем повинні бути вибрані так, щоб витрачена в них активна потужність дорівнювала потужності втрат P , а струм випереджав би напругу на кут φ .

Послідовна схема заміщення варистора та її векторна діаграма зображені на рис. 1 та рис. 2

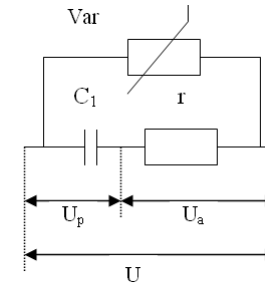


Рис. 1 – Послідовна схема заміщення варистора у зоні струмів витоку

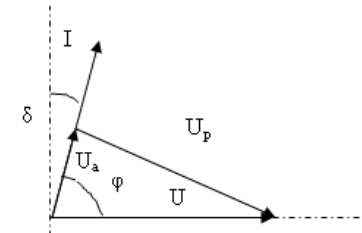


Рис. 2 – Векторна діаграма варистора при послідовній схемі заміщення.

Активна складова напруги U_a збігається по фазі з струмом, реактивна складова напруги U_p відстає від струму на кут 90 градусів. Якщо напруги в трикутнику напруг розділити на модуль вектора струму I , то отримаємо трикутник опорів.

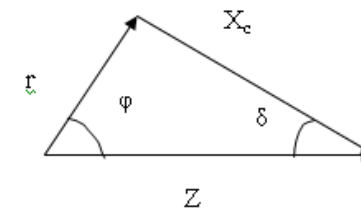


Рис. 3 – Векторна діаграма струмів паралельної схеми

З трикутника опорів отримуємо вираз для $\text{tg } \delta$

$$\text{tg } \delta = \frac{r}{X_c} = \omega r C_1,$$

де ω - кругова частота; C_1 - ємність послідовної схеми заміщення

Величина потужності, що розсіюється для послідовної схеми заміщення:

$$P = UI \cos \varphi = U \frac{U}{Z} \frac{r}{Z} = \frac{U^2 r}{x_c^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x_c^2 \left[1 + \frac{r^2}{x_c^2} \right]} = \frac{U^2 r}{x_c^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)} = \frac{U^2 \omega C_1 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (1)$$

Паралельна схема заміщення варистора і векторна діаграма струмів та напруг зображені на рис. 3 та рис. 4

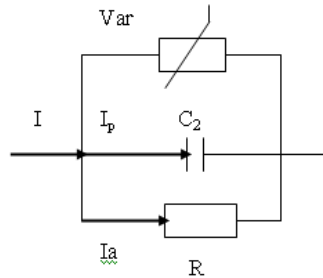


Рис. 4 – Паралельна схема заміщення варистора

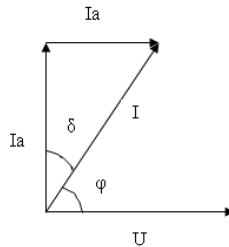


Рис. 5 – Векторна диграма варистора при паралельній схемі заміщення. З трикутника струмів визначимо вираз для $\operatorname{tg} \delta$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{U}{RU \omega C_2} = \frac{1}{R \omega C_2} \quad (2)$$

Для паралельної схеми заміщення величина потужності, що розсіюється дорівнює

$$P = UI \cos \varphi = UI \sin \delta = U \frac{I_a}{\cos \delta} \sin \delta = U \frac{U}{x_p} \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_2 \operatorname{tg} \delta \quad (3)$$

Вирази для розсіювання потужності відповідно до формул (1) і (3) не збігаються. Це пов'язано з тим, що еквівалентні схеми вводяться умовно, не пояснюючи повністю механізму діелектричних втрат. Так

як розсіювана в діелектрику потужність не може залежати від обраної схеми заміщення, то різнитися будуть параметри різних схем заміщення. Ємності й активні опори паралельної і послідовної схем заміщення пов'язані між собою виразами:

$$C_2 = \frac{C_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right)$$

Для оксидноцинкових легуваних варисторів з яких складається ОПН квадрат тангенса кута діелектричних втрат малий у порівнянні з одиницею і параметри схем заміщення збігаються. А ось величина $\operatorname{tg} \delta$ для діелектрика від обраної схеми заміщення не залежить. Але цей показник залежить від природи матеріалу, частоти прикладеної напруги і температури навколишнього середовища. Таким чином, слід зазначити, що схема заміщення варистора є нелінійною, параметри її елементів істотно залежать від температури і частоти прикладеної напруги.

Враховуючи що ємність та величина $\operatorname{tg} \delta$ діелектриків мають залежність від частоти, у схему заміщення варистора, для запобігання резонансним явищам, необхідно додати індуктивність, яка обумовлена індуктивністю шин, що приєднані до ОПН. Цей індуктивний опір представлений на схемі рис 6 індуктивністю L. Відповідними розрахунками має бути визначена довжина ошиновки яка буде призводити до виникнення резонансу на тій чи іншій частоті, та видані рекомендації що до запобігання подібним явищам.

Досить значимою може бути величина втрат потужності від струмів, які протікають по вологій поверхні ОПН в процесі експлуатації в районах з великою ступеню забрудненості атмосфери, однак вона не може бути визначальною при виборі ОПН тому що впливає на його тепловий баланс тільки через температуру поверхні, яка при великих значеннях струму витоку може зростати на декілька градусів. Такі втрати в схемі заміщення рис. 6 враховує введений паралельно опір $R_{\text{вит}}$.

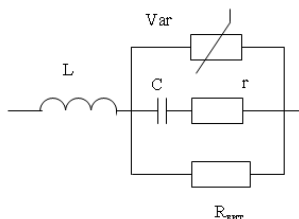


Рис. 6 – Повна схема заміщення ОПН

Наведена на рис. 6 схема заміщення ОПН враховує компоненти необхідні для аналізу режиму роботи обмежувача перенапруг в цілому в області вольт амперної характеристики, що стосується струмів витоку. Такий аналіз дозволить уточнити вибір ОПН враховуючи його роботу у зоні струмів витоку вольт амперної характеристики, де він працює найбільше часу. Нажаль при наявності великої кількості робіт по вивченню характеристик оксидноцинкових керамік досить складно визначити параметри ОПН в цілому, тому що кожний виробник має свою технологію їх вироблення, що призводить до великих розбіжностей параметрів. Можна навести приклад ємності, яка буде залежати від конструктивного виконання електродів та способу виконання контакту між електродами та варисторами. Ці обставини на наш погляд ілюструють необхідність детального вивчення параметрів ОПН у зібраному стані різних виробників для визначення параметрів схеми заміщення.

Висновки:

1. Наведені прості для використання схеми заміщення ОПН, які дозволяють проводити аналіз роботи ОПН у зоні струмів витоку вольт амперної характеристики.
2. Параметри схем заміщення можуть суттєво відрізнитися для ОПН одного класу напруги з іншими однаковими характеристиками, за рахунок технологічних особливостей вироблення.
3. Необхідні дослідження параметрів ОПН різних виробників з метою визначення параметрів схеми заміщення, що дозволить підвищити надійність роботи ОПН та електричних мереж в цілому.

Список літератури: 1. Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Стахов С.В.. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с 2. Хинрихсен Фолькер. Siemens. Металлооксидные ограничители. Основы. – АО «Сименс», 2000.– 111 с. 3. IEEE Working Group 3.4.11: “Modeling of metal oxide surge arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1992; 7(1):302-309. 4. Darveniza. M, Roby. D, Tumma. LR, “Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current

on metal oxide arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1994; 9:764-771. 5. Darveniza. M, Tumma. LR, Richter. B, Roby. D, “Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1997; 12:1168-1175. 6. ABB MWK Surge Arrester Datasheet, Medium Voltage Products & Systems 7. Magro. MC, Giannettoni. M, Pincetti. P, “Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies”, IEEE Transactions on Power Delivery 2004; 19:1692-1695. 8. Pincetti. P, Giannettoni. M.: “A simplified model for zinc oxide surge arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1999; 14(2):393-398. 9. Exlim. Техническая информация. Руководство по выбору высоковольтных ограничителей перенапряжений производства фирмы АББ. – ЗАО АББ УЭТМ, 1996. – 24 с. 10. СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47:2011 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування. 11. СОУ-Н МВВ 40.1-00100227-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках. 12. Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С., Жданов Р.В. Работа средств защиты от перенапряжения при наличии в электрических сетях высших гармоник. Электротехника та електромеханіка. – Харків, 2014. – №4. 13. Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. Правила выбора. ABB High Voltage Technologies Ltd. – Швейцария, Ветинген, май, 1994. 14. Металлооксидные ограничители перенапряжений. Выбор ограничителей перенапряжений и их применение в распределительных сетях среднего напряжения: Информация Тайко Электроникс Райхем Гмбх. – Киев, 2011. – 18 с. 15. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Bibliography (transliterated): 1. Zevke G.V, Ionkin P.A. Netushil, Stahov S.V *Osnovi teorii chepey: Uchebnik dlaj vuzov*. Moscow Energoatomizdat, 1989. Print. 3. *IEEE Working Group* 3.4.11: “Modeling of metal oxide surge arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1992; 7(1):302-309. 4. Darveniza. M, Roby. D, Tumma. LR, “Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current on metal oxide arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1994; 9:764-771. 5. Darveniza. M, Tumma. LR, Richter. B, Roby. D, “Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1997; 12:1168-1175. 6. ABB MWK Surge Arrester Datasheet, Medium Voltage Products & Systems 7. Magro. MC, Giannettoni. M, Pincetti. P, “Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies”, IEEE Transactions on Power Delivery 2004; 19:1692-1695. 8. Pincetti. P, Giannettoni. M.: “A simplified model for zinc oxide surge arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery 1999; 14(2):393-398. 9. Tehnicheskaja informacija. Rykovodstvo po vibory ogranicitelaj perenaprjazzenij firmi ABB. 1996 Print. 10. Obmezhuвачи perenaprug nelinijni. naprugoju 110 – 750 kV. Nastanova sh’odo vibory. 2011 Print.. 12. Grib O.G., Shevchenko S.U., Gapon D.A., Ierusalimova T.S., Zdanov R.V. Rabota sredstv pfschini ot perenaprjazzenij pri nalichii v tletricheakih setjah visshih garmonik *Elektrotehnika ta elektromehaniка*. 2014. No 4. 13. *Vibor ispitanija i primenenie . Metalooksidnih ograniciteluj perenaprjazzenija v aetjah srednego naprjazzenija. ABB High Voltage Technologies Ltd. – 1994. 14. Metalooksidnie ograniciteli perenaprjazzenija . Vibor i primenenie . Metalooksidnih ograniciteluj perenaprjazzenija v aetjah srednego naprjazzenija: Informachija Tayko electronics Rayhem GmbH. Kiev, 2011. Print. 15. *Elektricheskaja energija. Sovmeatimost tehničeskikh sredstv elektromagnitnaja. Normi kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzenija obshego naznachenija*. 2013 Print*

Поступила (received) 29.04.2015

А.А. ПЕТКОВ, д-р техн. наук, с.н.с., проф. НТУ "ХПИ", Харьков

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ ГИТ НА МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА

В работе решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости максимального значения импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока. Полученные соотношения позволяют при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи производить: расчеты максимальное значение импульса тока, формируемого ГИТ; определять необходимые значения одного из параметров элементов разрядной цепи ГИТ при известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока, а также при модификации нагрузки. Выведены соотношения для определения проектных допусков максимального значения импульса тока.

Ключевые слова: генератор импульсов тока, емкостной накопитель энергии, максимальное значение тока

Постановка проблемы. Современные технические средства, содержащие радио- и электротехнические компоненты, проходят испытания на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов. При этом возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды и длительности. Для этой цели создаются генераторы импульсов тока (ГИТ) с большой запасаемой энергией, сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Учитывая, что испытаниям подвергаются различные объекты, к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока предъявляются различные требования, что предопределяет необходимость постоянного совершенствования методов расчета разрядных цепей ГИТ.

Анализ публикаций. Одним из основных параметров импульса тока, нормируемых при испытаниях, является его максимальное значение. Как известно [1], в разрядной цепи (РЦ) ГИТ, эквивалентная схема которой представима RLC -контуром (см.рис.1), в зависимости от соотношения параметров контура могут протекать импульсы тока трех видов: апериодического, критического (предельного апериодического) и колебательного затухающего. В общем случае для любого соотношения параметров контура определение максимального значения импульса сводится к следующей процедуре [1]. Из решения

© А. А. Петков, 2015

дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в RLC -контуре, определяется аналитическое выражение для тока $i(t)$. Далее из условия равенства нулю первой производной от тока, находится время достижения максимального значения тока t_{\max} , подстановка которого в общее выражение дает максимальное значения тока $I_{\max} = i(t_{\max})$.

Данная процедура многоступенчата и практически неудобна, особенно для оперативной оценки максимального значения тока. В [2] приведены соотношения для вычисления нормированного максимального значения тока, применение которых также требует определенных преобразований. Поэтому для упрощения расчетов предлагаются приближенные соотношения, получаемые из общего выражения импульса тока для предельных вариантов соотношения параметров элементов РЦ.

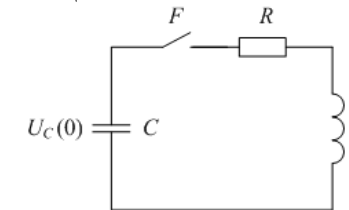


Рис. 1 – Эквивалентная схема РЦ ГИТ. $U_C(0)$, C , L , R – зарядное напряжение ЕНЭ, емкость батареи ЕНЭ, эквивалентная индуктивность РЦ, эквивалентное активное сопротивление РЦ; F – коммутатор

В [3] указано, что для апериодического импульса тока при $r = R/\sqrt{L/C} \geq 60$ максимальное значение тока определяется по соотношению

$$I_{\max} = U_C(0)/R. \quad (1)$$

Максимальное значение колебательного затухающего импульса тока, с погрешность не превышающей 1% при $r = R/\sqrt{L/C} \leq 0,012$, можно определить по выражению [4]

$$I_{\max} = U_C(0)/\sqrt{L/C}. \quad (2)$$

Для критического разряда $r = R/\sqrt{L/C} = 2$, исходя из материалов [1, 2], можно получить точную формулу для определения максимума тока в импульсе в виде

$$I_{\max} = (2/e)U_C(0)/R. \quad (3)$$

В виду того, что при изготовлении элементов РЦ неизбежны отклонения от расчетных значений параметров, реальные АВП импульса тока также будут отличаться от расчетных значений. В этом случае важен вопрос о связи допусков АВП импульса тока с допусками параметров элементов РЦ. Однако для РЦ ГИТ, применительно к определению допусков на величину максимального значения тока, имеется информация лишь для ограниченной области соотношения параметров элементов РЦ ($2 \leq r \leq 30$) [5].

Цель работы. Получение упрощенных соотношений для определения максимального значения тока в импульсе и проектных допусков на его величину в разрядной цепи испытательного устройства с емкостным накопителем энергии.

Материалы и результаты исследований. Используя общую методику определения максимального значения тока в импульсе [1] и методы аппроксимации и нелинейного программирования [6], можно показать, что с погрешностью, не превышающей 1%, максимальное значение апериодического импульса тока описывается следующим выражением

$$I_{\max} = AU_C(0)R^{B-1}L^{-0,5B}C^{0,5B}, \quad (4)$$

где при $2 \leq r \leq 4$ $A = 0,623$; $B = 0,25$; при $4 \leq r \leq 10$ $A = 0,756$; $B = 0,108$; при $10 \leq r \leq 60$ $A = 0,92$; $B = 0,021$;

для колебательного импульса тока – соотношением вида

$$I_{\max} = AU_C(0)R^B L^{-0,5(B+1)} C^{0,5(B+1)}, \quad (5)$$

где при $0,012 \leq r \leq 0,05$ $A = 0,91$; $B = -0,02$; при $0,05 \leq r \leq 0,2$ $A = 0,766$; $B = -0,079$; при $0,2 \leq r \leq 0,5$ $A = 0,621$; $B = -0,21$; при $0,5 \leq r \leq 1$ $A = 0,55$; $B = -0,38$; при $1 \leq r \leq 2$ $A = 0,551$; $B = -0,57$;

Объединяя известные (1) – (3) и полученные соотношения (4) и (5), можно предложить следующую общую формулу для определения максимального значения тока

$$I_{\max} = AU_C(0)R^\alpha L^\beta C^{-\beta}, \quad (6)$$

где значения коэффициентов A , α , β приведены в табл. 1, размерность величин $U_C(0)$, C , L , R , I_{\max} в СИ.

Соотношение (6) позволяет рассчитать с погрешностью не более 1% максимальное значение импульса тока, формируемого ГИТ при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи. Возможно также решение обратной задачи – определения необходимого значения одного из параметров элементов РЦ ГИТ при

известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока (например, сохранение максимального значения тока при изменении нагрузки). Учитывая, что ГИТ с большой запасаемой энергией содержит сотни и даже тысячи конденсаторов, которые могут в процессе эксплуатации выходить со строя и отключаться системой защиты, соотношение (6) может быть использовано для диагностики состояния конденсаторной батареи – определению емкости батареи по изменению величины тока (при исправных остальных элементах РЦ ГИТ).

Таблица 1 – Коэффициенты обобщенного выражения максимального значения тока

r	A	α	β
$0 \leq r \leq 0,012$	1	0	-0,5
$0,012 \leq r \leq 0,05$	0,91	-0,02	-0,49
$0,05 \leq r \leq 0,2$	0,766	-0,079	-0,4605
$0,2 \leq r \leq 0,5$	0,621	-0,21	-0,395
$0,5 \leq r \leq 1$	0,55	-0,38	-0,31
$1 \leq r \leq 2$	0,551	-0,57	-0,215
$2 \leq r \leq 4$	0,623	-0,75	-0,125
$4 \leq r \leq 10$	0,756	-0,892	-0,054
$10 \leq r \leq 60$	0,92	-0,979	-0,0105
$60 \leq r \leq \infty$	1	-1	0

Выражение (6) является положительной функцией четырех аргументов. Этот факт позволяет использовать соотношения для вычисления относительного отклонения функции нескольких аргументов, приведенные в [7]. Предполагая малость относительного отклонения аргументов, для определения относительного отклонения максимального значения импульса тока от его номинального значения получим соотношение:

$$\delta I_{\max} = \delta U_C(0) + |\alpha| \delta R + |\beta| (\delta L + \delta C), \quad (7)$$

где $\delta U_C(0)$, δR , δL , δC – относительное отклонение соответственно зарядного напряжения ЕНЭ, эквивалентного активного сопротивления РЦ эквивалентной индуктивности РЦ и емкости батареи ЕНЭ.

Предположим, что имеет место равенство отклонений $\delta X = \delta U_C(0) = \delta R = \delta L = \delta C$. Тогда из соотношения (7), с учетом данных табл. 1, для всего диапазона соотношения параметров РЦ имеем

$$\delta I_{\max} = \delta X(1 + |\alpha| + 2|\beta|) = 2\delta X. \quad (8)$$

Из (8) видно, что при равных отклонениях параметров элементов РЦ, отклонение максимального тока превышает их в два раза.

На практике величина отклонения R , L и C определяется конструкцией и технологией изготовления элементов РЦ, а зарядного напряжения $U_C(0)$ – погрешностью системы измерений и автоматики и, с учетом уровня современной элементной базы и технических решений, может быть достаточно малым, наперед заданным значением.

Предположим, что имеет место равенство следующих отклонений $\delta Y = \delta R = \delta L = \delta C$. Тогда из соотношения (7), с учетом данных табл. 1, для всего диапазона соотношения параметров РЦ имеем

$$\delta I_{\max} = \delta U_C(0) + \delta Y(|\alpha| + 2|\beta|) = \delta U_C(0) + \delta Y. \quad (9)$$

Соотношения (7) – (9) выведены в предположении малости $\delta U_C(0)$, δR , δL , δC . Произведем некоторую оценку применимости этих соотношений. В качестве критерия выберем отношение величин $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$, определенных непосредственным расчетом и вычисленных исходя из (9).

На рис. 2 показаны результаты вычисления коэффициента $K = (\delta I_{\max} - \delta U_C(0))^* / (\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$, где $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))^*$ – значение, определенное непосредственным расчетом с использованием всех возможных комбинаций отклонений δR , δL , δC при их равенстве $\delta Y = \delta R = \delta L = \delta C$, а $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$ значение, определенное исходя из выражения (9).

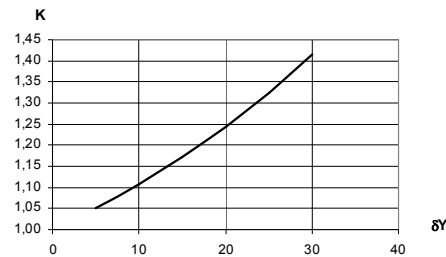


Рис. 2 – Влияние величины отклонения параметров элементов схемы на точность расчета относительного отклонения величины тока

Как видно из рисунка, при больших отклонениях параметров элементов РЦ ($\delta Y > 15\%$), отклонение максимального тока от номинального значения, рассчитанное по (9) может существенно отличаться от значений, полученных непосредственным расчетом. Полученные данные позволяют разграничить сферу применимости различных методов расчета.

Учитывая, что относительные отклонения величин элементов РЦ ГИТ являются фактически нормируемыми допусками при их изготовлении, предложенные соотношения описывают получаемые допуски максимального значения импульса тока и могут быть использованы в процессе их проектирования РЦ ГИТ.

Выводы.

1. Решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости максимального значения импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока.

2. Полученные соотношения позволяют при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи производить расчеты максимальное значение импульса тока, формируемого ГИТ; определять необходимые значения одного из параметров элементов РЦ ГИТ при известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока, а также при модификации нагрузки.

3. Выведены соотношения для определения проектных допусков максимального значения импульса тока

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований и проектирования высоковольтных испытательных устройств.

Список литературы: 1. Теоретические основы электротехники. Том 2. / [Демирчан К.С., Неман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.]. Санкт-Петербург : Питер, 2003 – 572 с. 2. Кузюкин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении / И.П. Кузюкин – М. : Энергия, 1980. – 136 с. 3. Петков А.А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока / А.А. Петков // Электротехника. – 1993. - №5. – С. 69 – 71. 4. Петков О.О. Розрахунок і проектування резистивно-індуктивних елементів високовольтних імпульсних установок : навч. посіб. / О.О.Петков. – Х. : Вид-во "Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 196 с. ISBN 978-617-687-010-4. 5. Петков А.А. Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 68 – 71. 6. Бартіш М. Я. Дослідження операцій: підручник. Ч.4 : Нелінійне програмування / М. Я. Бартіш, І. М. Дудзяний. — Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. І.Франка, 2011. — 208 с. 7. Копченова Н.В. Вычислительная математика в примерах и задачах / Н.В. Копченова, И.А. Марон. – М. : Наука, 1972. – 367 с.

Bibliography (transliterated): 1. Demirchan K.S., Neman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Vol 2.* Sankt-Peterburg. Piter. 2003. Print. 2. I.P. Kuzhekin *Ispytatelnyye ustanovki i izmereniya na vyisokom napryazhenii.* Moscow. Energiya, 1980. Print. 3. Petkov A.A. Raschet parametricheskoj nadezhnosti generatora impulsov toka. A.A. Petkov. *Elektrotehnika.* 1993. No 5. 69 - 71. Print. 4. Petkov O.O. *Rozrahnok i proektuvannya rezistivno-induktivnih elementiv visokovolnih impulsnih ustanovok.* Kharkov. Vid-vo "Pidruchnik NTU "KHPI", 2014. Print. 5. Petkov A.A. Raschet dopuskov razryadnyh cepej vysokovolnyh impulsnyh ispytatelnyh ustrojstv *Elektrotehnika i elektromehaniika.* – 2008. No 6. 68 – 71. Print. 6. Bartish M. Ya. I. M. Dudzyanij *Doslidzhennya operacij: pidruchnik.* Ch.4 : Nelinijne programuvannya, Lviv. Vidavnichij centr LNU im. I.Franka, 2011. Print. 7. Kopchenova N.V. I.A. Maron. *Vychislitel'naya matematika v primerah i zadachah* Moscow. Nauka, 1972. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

УДК 621.314

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;
Д. М. БАКЛАЙ, аспірант НТУ «ХПІ»;
Т. Г. ГОРОЖАНКІНА, магістр, НТУ «ХПІ»

АНАЛІЗ ГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ХАРГ

У статті виконаний порівняльний аналіз відомих графічних методів, які використовуються для розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Наведені алгоритми побудови й процедури прийняття рішень усіх відомих методів. Проаналізовані способи завдання координат, способи завдання діагностичного об'єкта й кількість дефектів, що розпізнаються за допомогою аналізованих методів. На основі аналізу відомих графічних методів інтерпретації результатів ХАРГ встановлено, що всі розглянуті методи можна розділити: за способом представлення об'єкта, що діагностується, по способу завдання координат, по кількості розпізнаваних дефектів. На основі виконаного аналізу запропоновані основні напрямки по вдосконаленню графічних методів.

Ключові слова: дефект, графічний образ, розчинені в маслі газу, трикутник Дюваля, метод фірми GATRON, метод Дорненбурга, метод ETRA, логарифмічний метод номограм, пеллосткова діаграма.

Вступ. В наш час, для визначення типу дефекту, прогнозованого за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів (ХАРГ), крім аналітичних методів, заснованих на аналізі відносин пар газів, використовуються й графічні методи розпізнавання. Дані методи відрізняються як по кількості й типу розпізнаваних дефектів, так і по способах завдання координат і уявлення об'єкта, що діагностується. Очевидно, що використання різних методів, при розпізнаванні типу дефекту, може привести до постановки різних діагнозів. У зв'язку із цим виникає об'єктивна необхідність в аналізі існуючих графічних методів інтерпретації результатів ХАРГ.

Аналіз публікацій. У діючому в Україні нормативному документі [1], для розпізнавання типу дефекту, крім відносин пар газів, рекомендується використовувати графічні образи дефекту, трикутник Дюваля та квадрат ETRA. У методиці, що діє в РФ [2], рекомендовані до використання графічні образи дефектів. У країнах ЄС [3], також використовуються графічні методи розпізнавання типу дефекту, наприклад, трикутник фірми GATRON, у Канаді широке поширення одержав трикутник Дюваля [4] і т.д. Найбільш повний опис основних

© О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, Т. Г. Горожанкіна, 2015

методик по інтерпретації результатів ХАРГ наведено в роботах [3, 4]. В [5] виконаний порівняльний аналіз вірогідності поставлених діагнозів при використанні графічних образів дефектів і відносин пар газів. Незважаючи на значну кількість публікацій, у яких, описуються графічні методи розпізнавання, деякі питання, пов'язані з аналізом принципів побудови цих методів, залишаються неосвітленими, що й послужило приводом до написання даної статті.

Ціль статті. У даній статті наведені результати порівняльного аналізу графічних методів розпізнавання типу прогнозованого дефекту за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

Основний матеріал. Розглянемо найбільш відомі графічні методи розпізнавання.

Трикутник Дюваля. Це перший приклад підходу до визначення характеру дефекту не розрахунково-логічним, а графічним методом. Даний діагностичний метод був розроблений в 1974 р. відомим канадським фахівцем М. Дювалем в енергетичній компанії Hydro-Quebec [3, 4]. Метод дозволяє за значеннями концентрацій трьох газів (C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4) побудувати точку на графіку, представленому у вигляді трикутника (див. рис. 1). Площа трикутника, за методикою Дюваля, розділена на сім зон. Кожна зона відповідає певному типу дефекту трансформатора. Усього розглядається сім дефектних станів: \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_3 , \mathcal{E}_4 , $\mathcal{E}T$, T_2 , T_3 і T_4 . По приналежності точки конкретній зоні визначається вид дефекту.

Спочатку розглянемо, як будується трикутник Дюваля. По-перше, цей трикутник рівносторонній. На кожній стороні відкладається відносно значення вмісту певного газу, яке може змінюватися від 0 до 100% за годинниковою стрілкою. При цьому сума значень концентрацій усіх газів ухвалюється за 100%, а процентні концентрації кожного газу визначаються від цієї суми. По-друге, при нанесенні границь зон дефектів лінії проводяться паралельно відстаючій стороні трикутника, тобто якщо точка береться на стороні CH_4 , то пряма із цієї точки проходить паралельно стороні C_2H_2 , якщо точка береться на стороні C_2H_4 , то – паралельно стороні CH_4 і т.д. По-третє, для проведення ліній і визначення відповідних зон використовуються значення, наведені в табл. 1. У результаті зазначених побудов виходить трикутник Дюваля (див. рис. 1).

При практичному використанні даного методу необхідно знайти процентний вміст кожного газу, відкласти його на відповідній стороні трикутника й з кожної точки провести три лінії паралельно відстаючій

стороні, які перетнуться в одній точці. Місце розташування цієї точки визначить зону й дефект, що діагностується.

Таблиця 1 – Координати границь зон дефектів

Код	Дефект	Сторона трикутника	Точка, %
\mathcal{E}_1	Часткові розряди з низькою щільністю енергії	CH_4	98
\mathcal{E}_3	Розряди малої потужності	C_2H_4 C_2H_2	23 13
\mathcal{E}_4	Розряди великої потужності	C_2H_4 C_2H_2	23, 40 13, 29
$\mathcal{E}T$	Розрядний і термічний дефект	C_2H_4 C_2H_2	40, 50 4, 13, 15, 29
T_2	Термічний дефект у діапазоні низьких температур (150–300°C)	C_2H_4 C_2H_2	20 4
T_3	Термічний дефект у діапазоні середніх температур (300–700°C)	C_2H_4 C_2H_2	20, 50 4
T_4	Термічний дефект високої температури (>700°C)	C_2H_4 C_2H_2	50 15

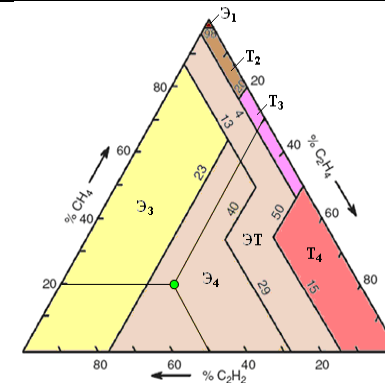


Рис. 1 – Трикутник Дюваля

Розглянутий метод не тільки наочно показує «місце» дефекту, але й дозволяє спостерігати за траєкторією його розвитку, коли через певний час робиться декілька ХАРГ і одержувані точки послідовно наносяться на трикутник. У якості недоліку методу можна назвати неповне використання діагностичної інформації, одержуваної в результаті ХАРГ.

Метод фірми GATRON. Цей метод був розроблений у німецькій фірмі GATRON GmbH [3]. Він ґрунтується на аналізі семи газів, розчинених у трансформаторному маслі. Тут, крім звичних водню, метану, ацетилену, етилену й етану, розглядаються пропілен (C_3H_6) і пропан (C_3H_8). Даний підхід застосовується в системах моніторингу силових трансформаторів у ряді європейських країн. Як і в «Трикутнику Дюваля» інтерпретація результатів хроматографічного аналізу виконується шляхом геометричної побудови точки на площині рівностороннього трикутника, який у даній методиці називається газовим трикутником дефектів (fault gas triangle) (див. рис. 2).

Діагностування тільки по трьом газам у методиці Дюваля, як ми вже відзначали, у деяких випадках може привести до помилок при визначенні виду дефекту, тому що при аналізі не розглядається водень і інші гази. У методиці фірми GATRON набір газів досить представницький, але оскільки мова йде про сторони трикутника, то тут пропонується такий підхід:

- одна сторона трикутника закріплюється за H_2 ;
- друга – за C_2H_2 ;
- нарешті, третя – за сумою газів, яку позначимо як CH_4+ .

Під CH_4+ розуміється зважена сума вуглеводневих газів CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , і C_3H_8 . Вона може бути обмірювана безпосередньо датчиком при моніторингу або отримана підсумовуванням результатів повного хроматографічного аналізу.

Також як і в методиці Дюваля сума H_2 , C_2H_2 і CH_4+ ухвалюється за 100%. За результатами ХАРГ визначаються частки (у відсотках) кожної із трьох величин і потім відкладаються на відповідних сторонах трикутника. Після цього проводяться прямі паралельно відстаючої (якщо рухатися за годинниковою стрілкою) стороні трикутника. Усі лінії, як і в Дювалі, перетнуться в одній точці.

У даному методі визначаються наступні види дефектів: \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_3 , \mathcal{E}_4 , T_2 , T_3 і T_4 і, крім того, раніше не розглянутий дефект за назвою «перетікання масла з бака контактора РПН», який позначимо як ПМ.

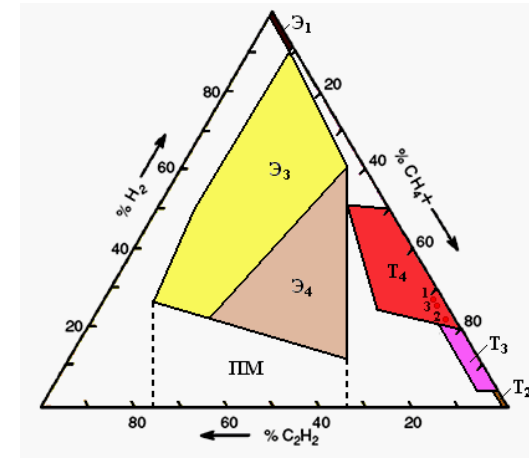


Рис. 2 – Трикутник фірми GATRON: – приклади діагностичних точок

Метод Дорненбурга. У цьому методі використовується побудова залежностей C_2H_2/C_2H_4 від CH_4/H_2 , і від C_2H_4/C_2H_6 , у подвійному логарифмічному масштабі [4], окремі зони на графіку відповідають областям: термічної деградації, дугових і часткових розрядів (див. рис. 3).

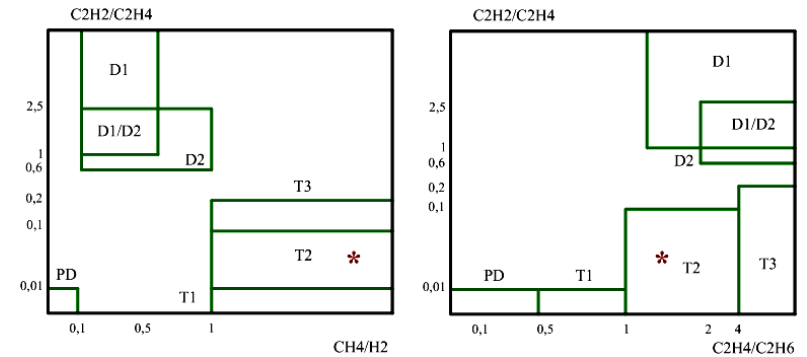


Рис. 3 – Зони розподілу дефектів по Дорненбургу: PD – часткові розряди; D1 – розряди низької енергії; D2 – розряди високої енергії; T1 – термічні дефекти при $T < 300^\circ C$; T2 – термічні дефекти при $T = 300-700^\circ C$; T3 – термічні дефекти при $T > 700^\circ C$

Метод недостатньо чітко розрізняє дефекти, але дає можливість використовувати гази з газового реле.

Метод ETRA. Цей метод був розроблений у компанії Electra Technology Research Association (Японія) [1, 3]. Для виявлення характеру дефекту аналізуються відносини трьох газів: C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 . На відміну від двох попередніх методів у цьому випадку будується не трикутник, а квадрат, на двох сторонах якого наносяться нерівномірні шкали. У площі квадрата виділені зони, що відповідають тому або іншому виду дефекту. Механізм виділення зон наочно видний з рис. 4

Алгоритм визначення виду дефекту досить простий:

- розраховуються відносини C_2H_2/C_2H_6 і C_2H_4/C_2H_6 ;
- по осі абсцис у масштабі відкладається значення відносини C_2H_4/C_2H_6 , а по осі ординат – значення відносини C_2H_2/C_2H_6 ;
- точка перетинання перпендикулярів, відновлених з отриманих точок, вкаже на зону, що відповідає тому або іншому виду дефекту.

Якщо концентрація C_2H_2 менше, чим границя його визначення, то цей газ вважається відсутнім. Відношення C_2H_2/C_2H_6 у цьому випадку не розраховується, а умовно ухвалюється рівним 0,005. При цьому в устаткуванні можна діагностувати тільки термічні дефекти.

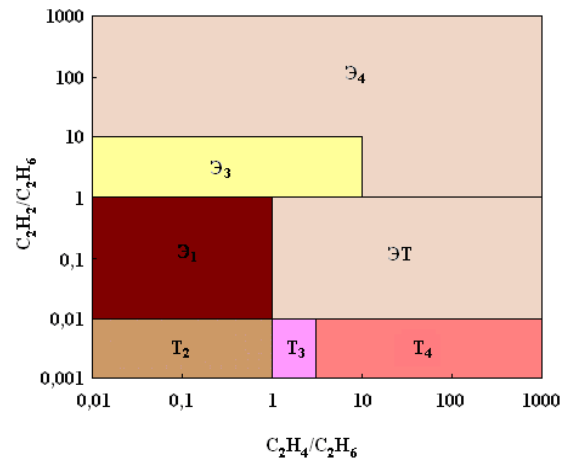


Рис. 4 – Квадрат ETRA

Логарифмічний метод номограм. Був розвинений J. O. Church в 1980 р. Цей метод базується на критерії ключового газу. У методі

графічно представлені як газові концентрації, так і засобу інтерпретації дефектів. Номограма складається з ряду вертикальних логарифмічних шкал, що представляють концентрації окремих газів (див. рис. 5).

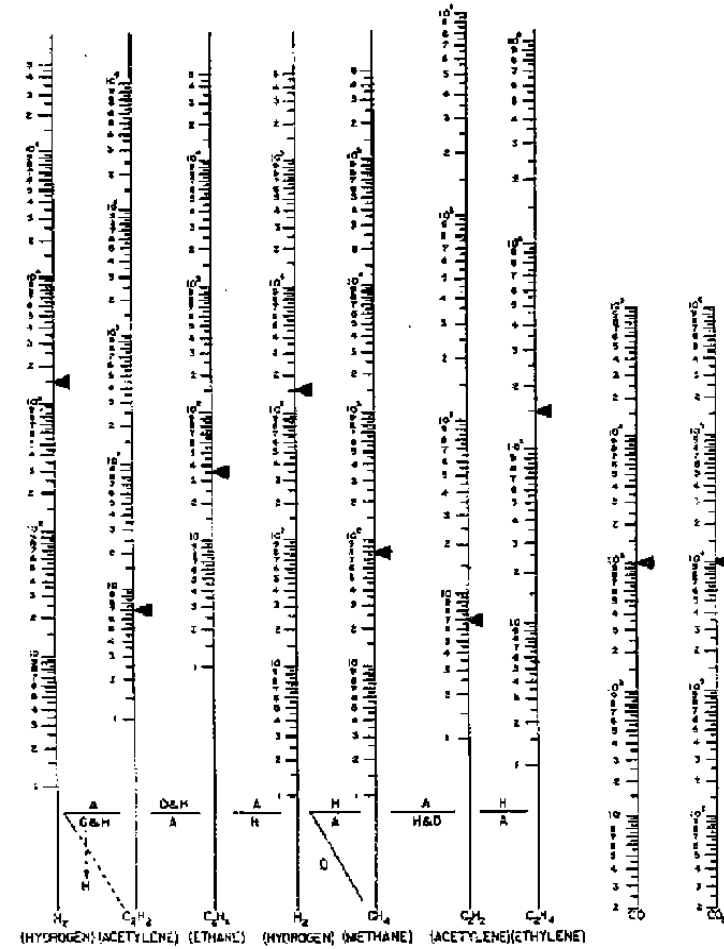


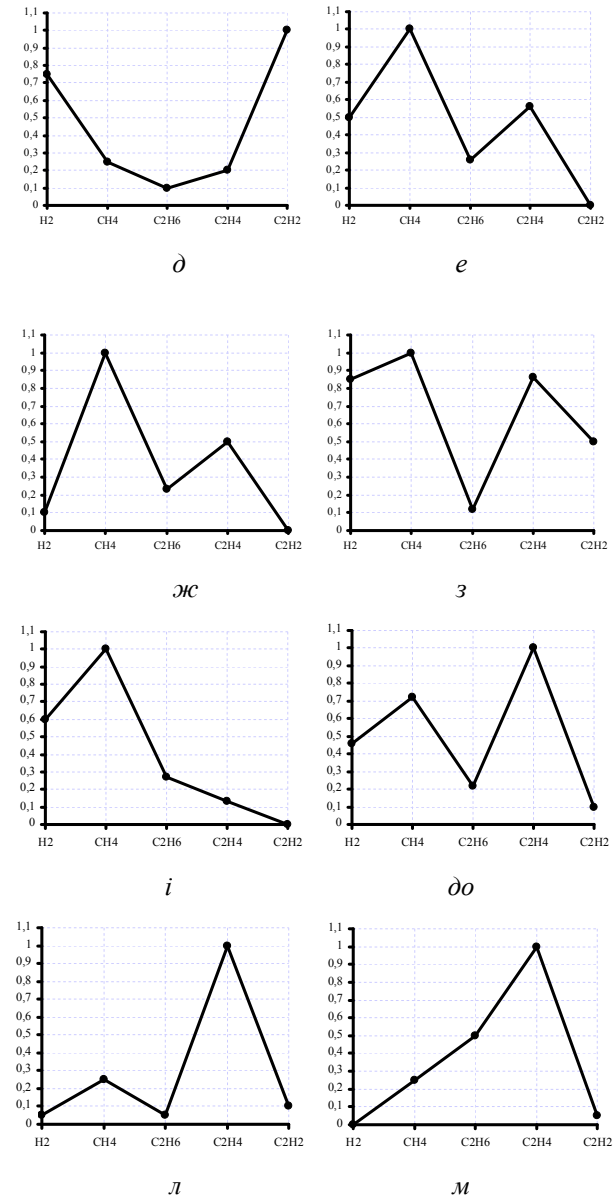
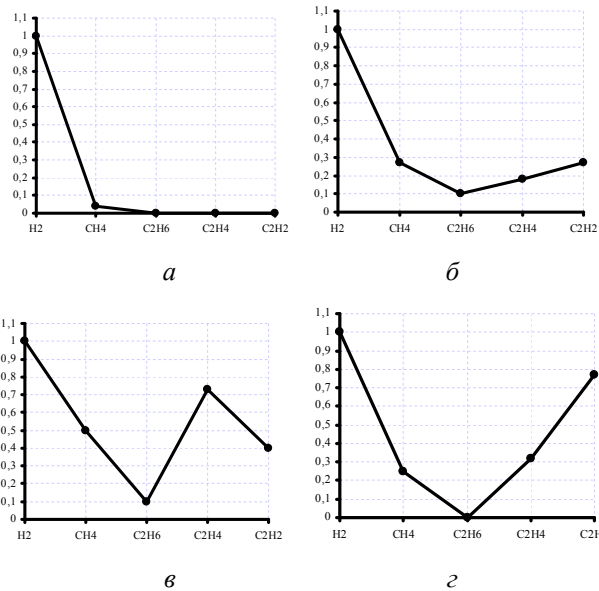
Рис. 5 – Логарифмічна номограма

У цьому методі між сусідніми шкалами проведені прямі лінії, що з'єднують точки, що представляють значення концентрацій газів. Нахили цих ліній – діагностичні критерії для визначення типу

ушкодження. Ключ у підставі діаграми між двома осями вказує на тип дефекту для цих двох осей [4].

Візуальне порівняння нахилів лінійних сегментів із ключами, даними в основі номограм, необхідно для ідентифікації типу дефекту (перегрів, дуга або часткові розряди). Кожному вертикальному масштабу стрілкою привласнене граничне значення. Ця методика може застосовуватися, якщо хоча б одне зі значень перевищує граничне [4]. Недоліком цього методу є бідність діагностичного висновку, тому що ідентифікувати можна розвиток тільки трьох основних дефектів.

Графічні образи дефектів. Даний метод графічної побудови образів різних дефектів у силових трансформаторах також був запропонований японськими дослідниками [1, 3]. Ці образи будуються по концентраціях п'яти газів: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 . Метод був розроблений на основі практичного досвіду зіставлення фактично виявлених дефектів з концентраціями газів, отриманими за допомогою ХАРГ. Слід зазначити, що ці образи будують для устаткування, у якому концентрації деяких або хоча б одного газу перевищують граничні значення.



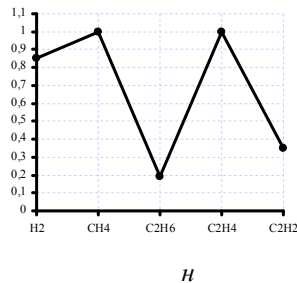


Рис. 6 – Графічні образи дефектів: *a* – часткові розряди; *б* – розряди великої енергії; *в* – іскріння, повзучий розряд; *г*, *д* – дуга; *е*, *ж* – нагрівання низької температури; *з* – нагрівання, що переходить в дугу; *і* – нагрівання, що переходить в ЧР; *до*, *л* – нагрівання високої температури; *м*, *н* – нагрівання, що переходить в розряди

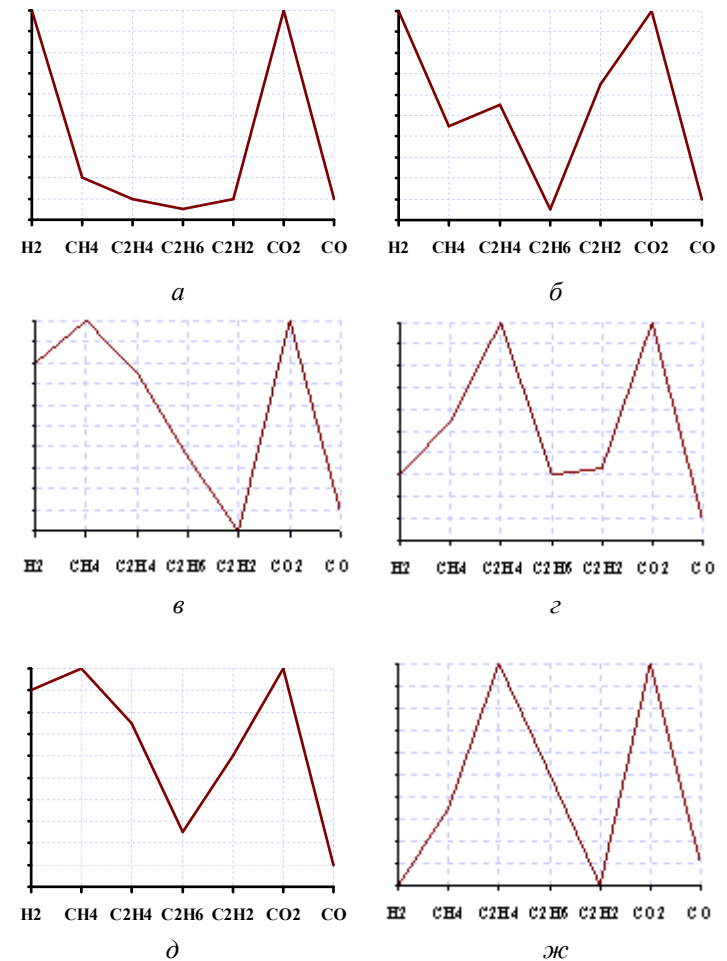
Приведемо алгоритм побудови графічного образу дефекту:

1. За результатами ХАРГ серед усіх газів вибирають той, який має найбільшу абсолютну концентрацію.
2. Визначають величину відносини кожного газу до газу, що має найбільшу концентрацію. Відношення газу з найбільшою концентрацією ухвалюється за одиницю, відношення інших газів будуть менше одиниці.
3. Будується графік образу дефекту, на якому по осі абсцис розміщують гази строго в наступному порядку: H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, а по осі ординат відкладають обчислене відношення для кожного із цих газів. Отримані точки з'єднують лінією.
4. Порівнюють отриманий графік з тестовими образами й вибирають той, де досягається максимальний збіг. Цей образ і визначає вид дефекту.

Порівнюючи отриманий образ дефекту з образами відомих дефектів, відносимо його до того чи іншого виду. Під час порівняння образів враховують, який газ має максимальну концентрацію й співвідношення між окремими газами.

На рис. 6 [6], наведені відносні (наведені до найбільшого) значення концентрацій газів для ряду дефектів, отримані оцифрованою номограм, рекомендованих міжнародної енергетичною комісією. У них крім газів вуглеводневого ряду й водню використовуються оксид і діоксид вуглецю. Дані гази використовуються для визначення

ушкодження основної ізоляції трансформаторів. Графіки на рис. 6 наведені без ушкодження твердої ізоляції.



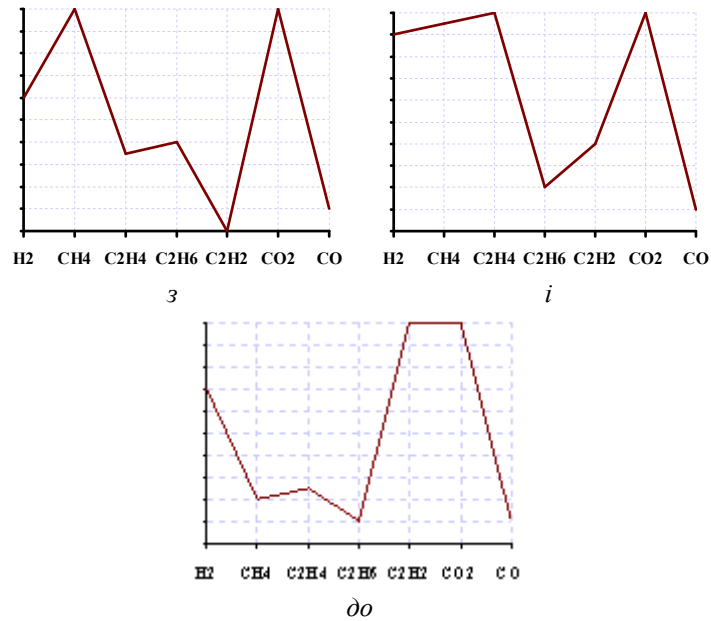


Рис. 7 – Діаграми дефектів: *a* – частковий розряд; *б* – іскровий або дуговий розряд; *в, з* – перегрів; *д, е* – перегрів з можливим переходом у дуговий розряд; *ж, з* – перегрів з можливим переходом у частковий розряд; *до* – дуговий розряд;

Пелюсткова діаграма. Серйозна робота з інтерпретації ХАРГ проведена колективом фахівців Уральського Федерального університету.

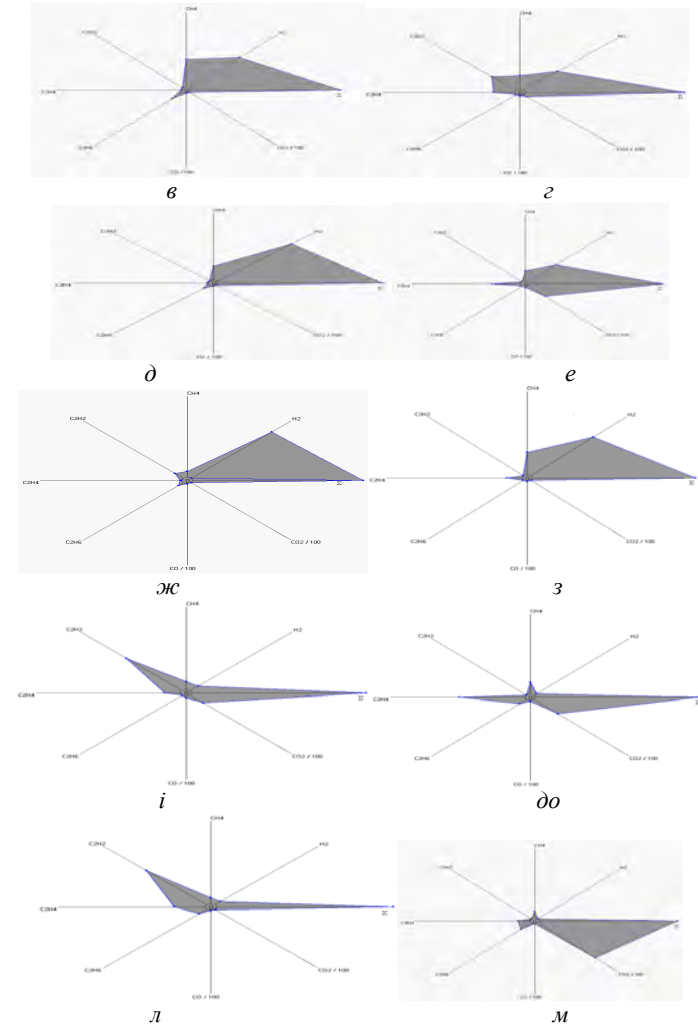
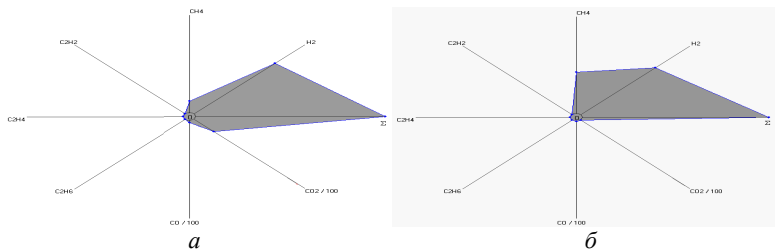


Рис. 8 – Пелюсткові діаграми за результатами ХАРГ, для різних типів дефектів: *a* – ЧР низької енергії, старіння; *б* – ЧР високої енергії; *в* – ЧР високої енергії, і низькотемпературне нагрівання; *г* – тепловий пробій ізоляції; *д* – ЧР і низькотемпературне нагрівання (X-Visk); *е* – ЧР низької енергії й високотемпературне нагрівання; *ж* – Іонізаційний пробій ізоляції; *з* – ЧР високої енергії й високотемпературне нагрівання; *и* – Сильний розряд (дуга); *до* – Високотемпературне нагрівання, старіння ізоляційних матеріалів; *л* – Сильні розряди й високотемпературне нагрівання; *м* – Високотемпературне нагрівання в результаті ферорезонансу;

Для визначення характеру дефекту пропонується відображати стан об'єкта на основі результатів ХАРГ у вигляді 8-мі пелюсткової діаграми [7], де по семи променям відкладаються значення концентрацій газів, а по восьмому променю – їх сума, яка розраховується по формулі

$$S = \sum_{n=1}^5 K_i + m(K_{CO} + K_{CO_2}),$$

де K_i – концентрації водню й вуглеводневих газів;
 m – коефіцієнт масштабування (звичайно $m=0,01$);
 K_{CO} – концентрація CO;
 K_{CO_2} – концентрація CO₂.

Попередньо на пелюстковій діаграмі формується образ, що відповідає ДЗ (ПДЗ). Припустимі значення вибираються залежно від відзначених вище конструктивних особливостей і строку експлуатації устаткування. Потім на відповідних променях діаграми відображаються отримані з ХАРГ концентрації всіх газів. Отриманий образ дефектного стану устаткування необхідно зіставити з деяким набором еталонних зображень. Для їхнього одержання були проаналізовані численні випадки результатів ХАРГ і наступних фактів розтину трансформаторів 35-500 кВ. Після вивчення зібраних матеріалів було складено 14 видів еталонних діаграм, що відображають дефекти електричного й термічного характеру різної сили прояву (див. рис. 8).

У методиці розроблена спеціальна процедура порівняння отриманого зображення дефектного стану з еталонними образами, що припускає масштабування отриманого зображення, обчислення заходів близькості й споріднення, визначення коефіцієнта небезпеки й інших характеристик. Для цього пропонується спеціальна комп'ютерна програма.

У роботі [8] на основі аналізу великої кількості експериментальних даних методом пелюсткових діаграм для поліпшення використовуваного методу було запропоновано:

- 1) змінити масштаб концентрації чадного газу з 1:100 на 1:1;
- 2) забрати вісь сумарного значення концентрацій газів, тому що це вимагає додаткових розрахунків і не впливає на кінцевий результат (див. рис. 9).

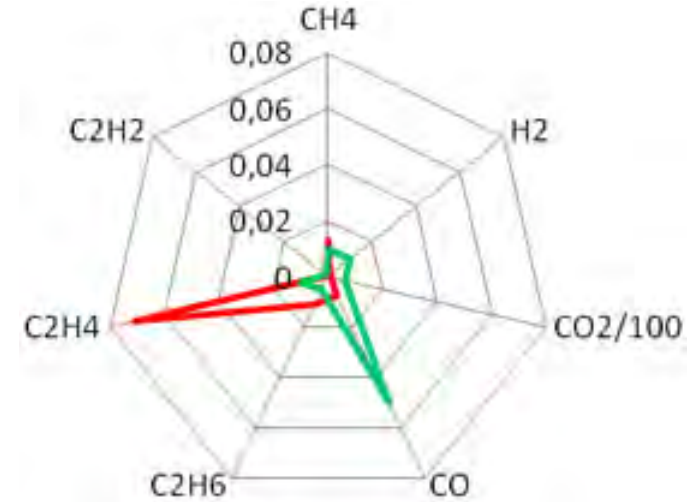


Рис. 9 – Удосконалена пелюсткова діаграма

Аналіз результатів. Наведений вище опис графічних методів інтерпретації ХАРГ, дозволяє класифікувати відомі методи по наступних основних ознаках:

1. Спосіб представлення об'єкта, що діагностується.

Усі розглянуті методи, по способу представлення об'єкта, що діагностується, можна розділити на дві групи. До першої групи, ставляться методи, у яких об'єкт представлений у вигляді точки в області діагнозів. До них відносяться трикутник Дюваля, трикутник GATRON, прямокутник Дюваля, і квадрат ETRA. Границі областей діагнозів устанавлюються, або шляхом аналітичних обчислень, або на основі аналізу експлуатаційних даних. Рішення про тип дефекту ухвалюється, візуально по розташуванню точки, алгоритмічно по мінімуму діагностичної відстані. Основним недоліком такого підходу, є неповне використання діагностичної інформації через обмеження візуального сприйняття простору ознак.

До другої групи відносяться методи, у яких об'єкт, що діагностується, представляється у вигляді геометричної фігури. Це графічні образи дефектів, пелюсткові діаграми і т.д. У цьому випадку для ухвалення рішення потрібна наявність еталонних об'єктів, із задалегідь устанавленими типами дефектів. Як правило, еталонні об'єкти виводять на основі аналізу експлуатаційних даних. Дані методи не мають обмежень за обсягом, використовуваної діагностичної

інформації, але вимагають великої кількості даних по дефектному устаткуванню.

2. Спосіб завдання координат.

Основою методу ХАРГ служить те, що будь-який термічний або електричний процес, що розвивається в трансформаторному маслі або в основній ізоляції, викликає її розкладання з виділенням газів, які, залежно від їхнього коефіцієнта розчинності можуть повністю залишатися в маслі або частково виділятися в обсяг газу над маслом. Кожному виду термічних або електричних процесів відповідає строго певний спектр газів. У зв'язку із цим у якості координат у графічних методах інтерпретації результатів ХАРГ використовують як, значення концентрацій газів, так і їх відносини. Проаналізуємо кожний з відомих способів завдання координат.

Концентрації газів. Використання безпосереднє значень концентрацій газів як координат для графічної інтерпретації результатів ХАРГ, має місце тільки в пелюсткових діаграмах І. В. Давиденко й у логарифмічному методі номограм. Основними недоліками даного підходу є: необхідність побудови діаграм для кожного виду устаткування (оскільки значення концентрацій газів значимо відрізняються для різного виду устаткування) і складність реалізації, наприклад для побудови пелюсткової діаграми І. В. Давиденко використовується спеціальна програма.

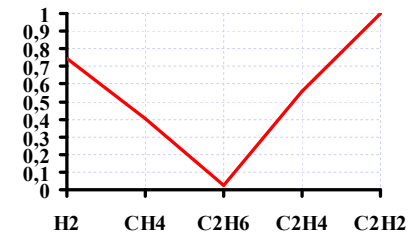
Відносини пар газів. Використовуються в методиках Дорненбурга й ЕТРА. Слід зазначити, що дані методи є неповною графічною візуалізацією аналітичних методів інтерпретації результатів ХАРГ, заснованих на використанні відносин пар газів. Основним недоліком даних методів є неповне використання діагностичної інформації, оскільки в якості координат використовуються відносини тільки двох пар газів, а мінімальне число відносин, рекомендоване в [1, 2] дорівнює трьом.

Процентний вміст газів. Використовується в трикутниках Дювала й GATRON і до деякої міри в графічних образах дефектів. На думку авторів, це найбільш природній спосіб завдання координат, оскільки він відбиває співвідношення між концентраціями всіх газів у даній пробі.

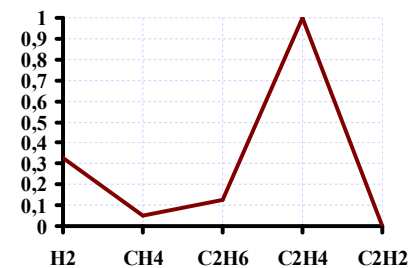
3. Кількість розпізнаваних дефектів. Найбільше число дефектів 13, дозволяють розпізнати метод графічних образів і пелюсткові діаграми. Більшість із аналізованих методів дозволяє розпізнати 7 найбільш характерних типів дефектів. Примітно, що в жодному із графічних методів, за винятком пелюсткових діаграм, немає області

відповідної до бездефектного стану, що зайвий свідчить про те, що й при відсутності дефекту, співвідношення між газами можуть ухвалювати значення, характерні для дефектного стану.

Основні напрямки вдосконалення. В [6] відзначається, відсутність збігів серед моделей дефектів, опублікованих різними авторами. Більше того, у частині публікацій спостерігаються значні розбіжності в співвідношеннях концентрацій газів однотипних дефектів. Крім того існує ще одна важлива проблема, яка мало озвучується у відкритому друці. Справа в тому, що ріст концентрацій газів у маслі силових трансформаторів, може бути викликаний не тільки розвитком дефекту, але й цілим рядом експлуатаційних впливів. Наприклад, короткими замиканнями, перенапружками, перевантаженнями і т.д. На рис. 10 наведені графічні образи дефектів, побудовані за значеннями концентрацій газів, для двох трансформаторів у яких виявлено перевищення концентраціями газів, значень відповідних до рівня 2 [1].



а



б

Рис. 10 – Графічні образи дефектів, побудовані по концентраціях газів, розчинених у маслі трансформаторів, що не мають дефектів: а – ТДТН 31,5/110/35/6, б – ТРДН 25/110/10

Перший образ (див. рис. 10 а) відповідає дуговому розряду в маслі. Але як показав аналіз, перевищення концентрацій газів у трансформаторі ТДТН 31,5/110/35/6 було викликано впливом атмосферної перенапруги. Другий образ (див. рис. 10 б) відповідає високотемпературному перегріву й розрядам. Але причиною росту концентрацій газів виявилось порушення контактних з'єднань на низькій стороні трансформатора. Як видно з наведених прикладів, графічні образи дефектів не дозволяють розпізнавати причину газовиділення, що є дуже важливим недоліком.

У зв'язку із цим для вдосконалення графічних методів інтерпретації пропонується визначити причини подібних розбіжностей і на основі виконаного аналізу синтезувати графічний метод розпізнавання, який би дозволив більш вірогідно розпізнавати тип дефекту. На думку авторів, подібне вдосконалення можливо, за рахунок обліку особливостей газоутворення в маслі негерметичного й герметичного устаткування й максимальному обліку факторів, що впливають на інтенсивність процесів газовиділення.

Висновки. На основі аналізу відомих графічних методів інтерпретації результатів ХАРГ встановлено, що всі розглянуті методи можна розділити:

1. По способу представлення об'єкта, що діагностується, можна розділити на дві групи. До першої групи, ставляться методи, у яких об'єкт представлений у вигляді точки в області діагнозів. До другої групи ставляться методи, у яких об'єкт, що діагностується, представляється у вигляді геометричної фігури;

2. По способу завдання координат, діляться на методи, у яких координати представлені значеннями концентрацій газів, відношенням пар газів і процентним вмістом газів;

3. По кількості розпізнаваних дефектів. Найбільше число дефектів 13, дозволяють розпізнати метод графічних образів і пелюсткові діаграми. Більшість із аналізованих методів дозволяє розпізнати 7 найбільш характерних типів дефектів. При цьому, у жодному із графічних методів, за винятком пелюсткових діаграм, немає області відповідної до бездефектного стану;

При вдосконаленні графічних методів інтерпретації результатів ХАРГ, слід прагнути не тільки до максимального збігу поставленого діагнозу з дійсним, але й розпізнавати причини газовиділення в маслі.

Список літератури: 1. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с; 2.

Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 28 с. – (Отраслевой руководящий документ действует с 01.01.2001); 3. Попов Г.В. Вопросы диагностики силовых трансформаторов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 176 с; 4. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев – М. НЦ ЭНАС, 2002 г. – 216 с.; 5. Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю. Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Енергетика: надійність і енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №17– С. 180–189; 6. Захаров А.В. Алгоритм оптимального принятия решения о состоянии аппарата при диагностировании силовых маслонаполненных трансформаторов / А.В. Захаров // Новое в российской энергетике. – 2001. – N 3 – С. 27 – 34; 7. Давиденко И.В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: Автореф. дис. доктора техн. наук / «Уральский государственный технический университет – ПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – Екатеринбург: 2009. – 45 с; 8. Касимова И.Х. Оценка нового метода интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в трансформаторном масле газов // Онлайн Электрик: Электротехника. Новые технологии, 2012.–URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=6>.

Bibliography (transliterated): 1. Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u izoljacijnomu masli SOU-N EE 46.501:2006. – Kiïv. – 2007. Print 2. Metodicheskie ukazanja po diagnostike razvivajushihhsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenyh v masle: RD 153-34.0-46.302-00. Moscow NC JeNAS, 2001. Print. 3. Popov G. V. Voprosy diagnostiki silovyh transformatorov/ FGBOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina». Ivanovo, 2012. Print. 4. Alekseev B. A. Kontrol' sostojanija (diagnostika) krupnyh silovyh transformatorov M. NC JeNAS, 2002 Print. 5. Shutenko O. V., Baklaj D. N., Ostrikova T. A., Mel'nik N. Ju. Analiz dostovernosti raspoznavanija tipov defektov transformatorov pri ispol'zovanii otnoshenij par gazov i graficheskijh obrazov Visnik NTU «KHPİ». Tematichnij vipusk: Energetika: nadijnist' i energoeftivnist'. – Kharkiv: NTU «KHPİ», 2013. No. 17.180–189 Print 6. Zaharov A. V. Algoritm optimal'nogo prinjatija reshenija o sostojanii apparata pri diagnostirovanii silovyh maslonapolnennyh transformatorov. Novoe v rossijskoj jenergetike. 2001. No. 3. 27 – 34 Print. 7. Davidenko I. V. Razrabotka sistemy mnogoaspektnoj ocenki tehničeskogo sostojanija i obslužhivanija vysokovol'tnogo maslonapolnennogo jelektrooborudovanija: Ekaterinburg: 2009. Print. 8. Kasimova I. H. Ocenka novogo metoda interpretacii rezul'tatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v transformatornom masle gazov Onlajn Jelektrik: Jelektrojenergetika. Novye tehnologii, 2012.– URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=6>.

Поступила (received) 29.04.2015

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»
Т.Ю. АНТОНЕЦЬ, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків;

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО ОПОРУ ПОВІТРЯ В КОНКРЕТНИХ УМОВАХ ПРОКЛАДАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз відведення тепла з поверхні кабелю у оточуюче повітря для високовольтних силових кабелів із зшитою поліетиленою ізоляцією на напругу 110 кВ. Співставлено внесок відведення тепла шляхом конвекції із внеском відведення тепла шляхом випромінювання з поверхні кабелю. Виконано аналіз залежності коефіцієнта теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі як суми коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k і коефіцієнта теплопередачі випромінюванням α_b від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Робота направлена на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: Високовольтні силові кабелі, відведення тепла в повітрі, конвекція, випромінювання, пластмасова ізоляція.

Постановка проблеми. Високовольтні кабелі з пластмасовою ізоляцією мають цілий ряд характерних особливостей, які необхідно враховувати при визначенні їх спроможності до навантаження та перевантаження: більші, ніж у традиційних кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює одножилну конструкцію кабелю, підвищена гранично допустима температура ізоляції (до 90 °С), суттєва залежність теплопровідності і теплоємності ізоляції від температури. Тому стандартні методи визначення теплових характеристик цих кабелів в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] нами запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Для високовольтних кабелів, з пластмасовою ізоляцією характерними є більші, ніж у традиційних кабелів, площі перерізу жил і товщини ізоляції. В такому разі використовують метод зосереджених теплоємностей [2]. Найпростіша модель нагрівання кабелю за застосування цього методу є сумою двох експонент:

© Л. А. Щебенюк, Т. Ю. Антонєць, 2015

$$\tau = P \cdot [S_g \cdot (1 - e^{-g \cdot l}) + S_f \cdot (1 - e^{-f \cdot l})]$$
, де g, f – постійні складові кінетики нагрівання кабелю. При визначенні параметрів цього співвідношення визначальним для кабелю, прокладеного у повітрі, є тепловий опір повітря в конкретних умовах прокладання, який за [3], в першу чергу, визначається діаметром кабелю і коефіцієнтом α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі, який за відсутності інформації про його значення в конкретних умовах прокладання рекомендовано приймати як постійну величину [4].

Ціль і задачі дослідження. Проаналізувати розрахунком залежність коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі від конкретних умов прокладання, зокрема від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Визначити можливість використання α в теплових розрахунках високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією як незмінного параметру. Перевірити експериментально розраховане для конкретного кабелю АПвЭгП 1×500 – 110 значення коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі.

Основний матеріал дослідження. Відведення тепла з поверхні кабелю у повітрі визначається процесами конвекції і випромінювання [5]. Тому коефіцієнт теплопередачі є відповідною сумою:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b, \quad (1)$$

де α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією; α_b – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням. α_k визначається питомою теплопровідністю повітря $\lambda = 0,025$ Вт/(м К), діаметром кабелю d і значенням критерію Нуссельта Nu , яке в свою чергу визначається порядком добутку двох інших критеріїв теплофізики, а саме критерію Грассофа Gr і Прандтля Pr [5]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda / d; \quad (2)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta\Theta_s \cdot d^3 \cdot g / \nu^2; \quad (3)$$

$$Pr = \nu \cdot c / \lambda, \quad (4)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $\beta = 1/T_{cp}$, K^{-1} , де T_{cp} – середня абсолютна температура повітря навколо кабелю;

$\Delta\Theta_s$ – різниця температур поверхні кабелю Θ_s і довкілля Θ_{oc} : $\Theta_s - \Theta_{oc}$;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

ν – кінематична в'язкість повітря, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

C_1, m – параметри критерію Нуссельта, які залежать від добутку двох інших критеріїв теплофізики, а саме критерію Грасгофа Gr і Прандтля Pr , і в широкому діапазоні значень $Gr \cdot Pr \in [5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7]$ дорівнюють $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$ [5]. Залежність коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ (суттєво залежить від умов прокладання кабелю) в діапазоні діаметрів $d \in [25 \cdot 10^{-3} \text{ м} \dots 95 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$ ілюструє рис.1. Видно, що із збільшенням діаметра кабелю зменшується конвективна складова відведення тепла з поверхні кабелю у повітрі. Для кабелів з діаметром, більшим 80 мм, α_k слабо залежить від діаметра, нелінійно залежить від температури поверхні і складає від $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ до $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Оскільки критерій Нуссельта є пропорційним $\Delta\Theta_s^m$, то для даного d , якщо λ суттєво не змінюється при зміні температури поверхні, α_k лінійно залежить від $\Delta\Theta_s^m$, що ілюструє рис.2.

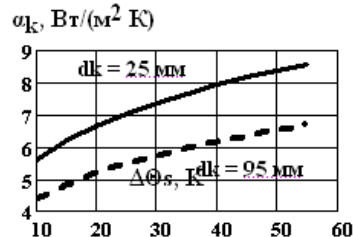


Рис.1 – Залежності коефіцієнта теплопередачі конвекцією в повітрі α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для одиночно прокладених на вільному повітрі кабелів діаметром $dk = 25 \text{ мм}$ і $dk = 95 \text{ мм}$ за температури довкілля $\Theta_{oc} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

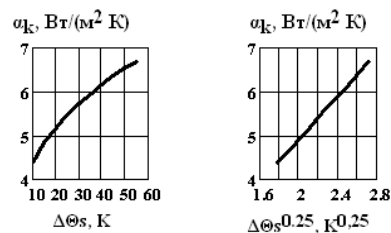


Рис.2 – Залежності коефіцієнта теплопередачі конвекцією в повітрі α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ (а) та від $\Delta\Theta_s^m$ (б) для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю діаметром $dk = 95 \text{ мм}$ за температури довкілля $\Theta_{oc} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$: коефіцієнт пропорційності h_k є для даного dk постійною величиною.

Відповідний коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності визначається формулою:

$$\alpha_k = h_k \cdot \Delta\Theta_s^m \quad (5)$$

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 \text{ г } v^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda/d \quad (6)$$

і вимірюється в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^{5/4})$. Важливо те, що h_k залежить тільки від теплофізичних параметрів середовища і діаметру кабелю, і в широкому діапазоні значень $Gr \cdot Pr \in [5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7]$ [5] не залежить від температури поверхні кабелю. Складова відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням визначається законом Стефана-Больцмана за яким потужність випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна абсолютній температурі у четвертому степені. В кабельній техніці коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням визначають за формулою [5]:

$$\alpha_v = \varphi \cdot \varepsilon_t \cdot C_0 \Theta, \quad (7)$$

де φ – коефіцієнт розташування нагрітого тіла в довкіллі; для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю $\varphi = 1$;

ε_t – приведений коефіцієнт теплового випромінювання, що є функцією коефіцієнтів чорноти і відповідних площ поверхні нагрітого тіла і твердого тіла довкілля:

$$\varepsilon_t = [\varepsilon_1^{-1} + (F_1/F_0) \cdot (\varepsilon_0^{-1} - 1)]^{-1}, \quad (8)$$

ε_1 для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю дорівнює коефіцієнту чорноти нагрітого тіла (кабелю ε_1 і для полімерного зовнішнього покриття знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

C_0 – постійна випромінювання абсолютно чорного тіла (постійна Стефана-Больцмана),

$$C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4);$$

Θ – функція різниці абсолютних температур поверхні нагрітого тіла T_p і довкілля T_{oc} :

$$\Theta = (T_p^4 - T_{oc}^4) / (T_p - T_{oc}). \quad (9)$$

Порівняння (7) і (9) свідчить про те, що коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_v , як і коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k , є функцією різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Відповідно для одиночно прокладеного на вільному повітрі кабелю формулу (6) можна записати так:

$$\alpha_v = \varepsilon_1 \cdot C_0 \Delta\Theta_s^{-1} \cdot [(\Theta_{oc} + \Delta\Theta_s + 273)^4 - (\Theta_{oc} + 273)^4], \quad (10)$$

Θ_{oc} – температура довкілля в $^\circ\text{C}$.

Залежність коефіцієнта відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_b за (10) від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ наведено на рис.3.

Цей рисунок свідчить про те, що хоча складова випромінювання з поверхні кабелю в діапазоні реальних значень $\Delta\Theta_s$ залежить майже лінійно (див. рис.3 а) від різниці температур між поверхнею кабелю і температурою повітря в оточуючому середовищі, але відповідна похідна функції (10) (рис.3 б) не є постійною і теж залежить від $\Delta\Theta_s$.

Якщо подібно до (5) виразити (10) як функцію $\Delta\Theta_s^m$, то похідна функції є сталою (рис.3 в) і складова випромінювання з поверхні кабелю може бути записана так:

$$\alpha_b = h_b \cdot \Delta\Theta_s^m, \quad (11)$$

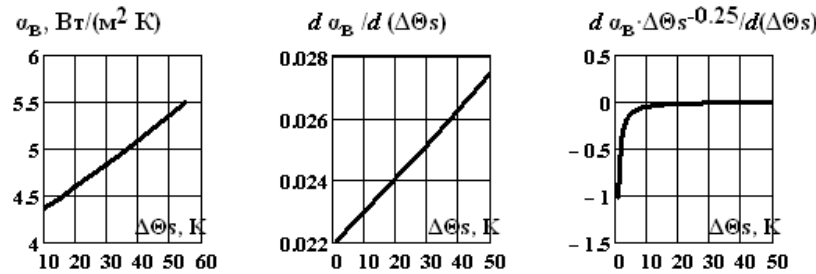


Рис.3 – Залежність коефіцієнта відведення тепла з поверхні кабелю випромінюванням α_b за (10) (а) та відповідна похідна функції (10) (б) від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$

В (11) коефіцієнт h_b визначається формулою:

$$h_b = \varepsilon_1 \cdot C_0 \Delta\Theta_s^{-(m+1)} \cdot [(\Theta_{oc} + \Delta\Theta_s + 273)^4 - (\Theta_{oc} + 273)^4], \quad (12)$$

в такому разі (1) має бути представлена так:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b = (h_b + h_k) \cdot \Delta\Theta_s^m = h \cdot \Delta\Theta_s^m. \quad (13)$$

Це співвідношення дозволяє аналізувати внесок кожного з двох основних процесів охолодження кабелю, що ілюструє рис.4.

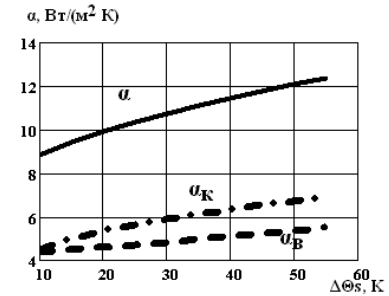


Рис.4 – Залежність коефіцієнта теплопередачі з поверхні одного кабелю діаметром 85 мм у повітрі як сума коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k і коефіцієнта теплопередачі випромінюванням α_b від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$; температура повітря $\Theta_{oc} = 10^\circ\text{C}$

Ці дані свідчать, що, по-перше, для кабелів відносно великого діаметру внеском конвекції і випромінювання в охолодження кабелю в повітрі не можна знехтувати (для відносно малих діаметрів внесок конвекції суттєво більший, див. рис.1).

По-друге, коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k і коефіцієнт теплопередачі випромінюванням α_b збільшуються із збільшенням різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Однак коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k збільшується швидше.

По-третє, коефіцієнт α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі є параметром залежним від конкретних умов прокладання, зокрема нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр.

В той же час саме коефіцієнт h в (13) для відносно великих діаметрів є достатньо незмінним параметром (див. рис.5) і його визначення і одночасне визначення значення різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ може бути використаним в теплових розрахунках кабелю у повітрі в конкретних умовах застосування.

Аналіз розбіжності між чисто розрахунковим за (6) і (12) значенням h і розрахунком, виконаним на основі кривої нагрівання кабелю (див. рис.5) показав, що при визначенні h тепловим розрахунком в режимі нагрівання кабелю найбільшу похибку спричиняє вибір середньої температури Θ_{sg} жили кабелю у режимі нагрівання. Крива нагрівання є нелінійною, а значення Θ_{sg} необхідне для оцінки потужності виділення тепла.

На рис.6 наведено результати використання в теплових розрахунках в режимі нагрівання кабелю різних способів оцінки Θ_{sr} і порівняння їх з чисто розрахунковим за (6) і (12) значенням h . Значення Θ_{sr} знаходяться в діапазоні від 55 °С до 70 °С.

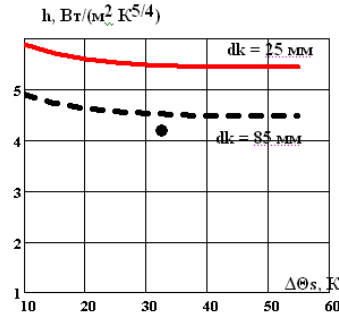


Рис.5 – Залежність від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для коефіцієнта h в залежності $\alpha = h \cdot \Delta\Theta_s^m$ (13), яка визначає тепловий опір навколишнього середовища кабелю діаметром dk у повітрі: температура повітря 10 °С, чорна точка – оцінка значення h , визначена тепловим розрахунком кабелю АПВЭГП 1×500 – 110 на основі кривої нагрівання

Перше (55 °С), визначене як середнє між початковою ($\Theta_1 = \Theta_c = 10$ °С) і максимальною експериментально визначеною температурою $\Theta_2 = 105$ °С плюс перегрів τ_1 кабелю за перші чверть години («швидка» експонента за методом зосереджених теплоємностей, внесок якої в подальшому не змінюється). Таке значення значно менше за реальне, оскільки означало би майже лінійний нагрів.

Більше (70 °С) – це експериментально визначена температура мідного екрану, накладеного поверх системи ізоляції кабелю, яка включає напівпровідні екрани поверх жили, поверх ізоляції і саму ізоляцію. Ця температура визначена після тривалого нагрівання в режимі, близькому до стаціонарного.

Середнє значення є найбільш прийнятним, оскільки визначене як середнє між експериментально визначеною температурою мідного екрану і температурою, визначеною за методом зосереджених теплоємностей.

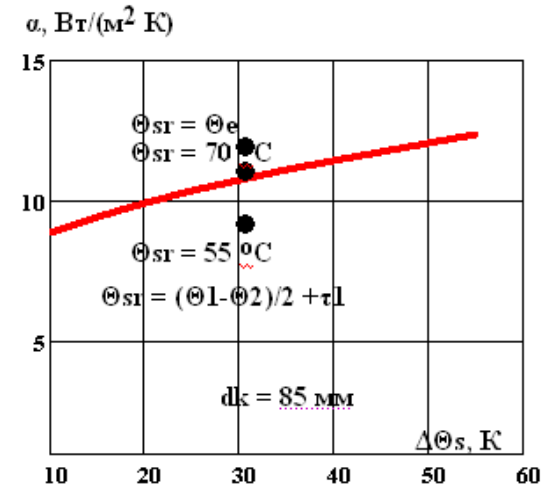


Рис.6 – Залежність від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ для коефіцієнта α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі:
– крива розрахована за (13);
– точки оцінки значення α , визначені тепловим розрахунком кабелю АПВЭГП 1×500 – 110 на основі розрахунку кривої нагрівання і експериментального визначення її характерних значень

Висновки. 1) Залежність коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ суттєво залежить від умов прокладання кабелю. 2) Для кабелів з діаметром, більшим 80 мм, коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k слабо залежить від діаметра, нелінійно залежить від температури поверхні і складає від 4 Вт/(м² К) до 7 Вт/(м² К). Для даного діаметра α_k лінійно залежить від кореню четвертого степеня різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s^{1/4}$. 3) Складову випромінювання з поверхні кабелю доцільно виразити як залежність від кореню четвертого степеня різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s^{1/4}$. 4) Для кабелів відносно великого діаметру внеском випромінювання в охолодженні кабелю в повітрі не можна знехтувати (для відносно малих діаметрів внесок конвекції суттєво більший). 5) Коефіцієнт α теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі є параметром залежним від конкретних умов прокладання, зокрема нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр.

б) Коэффициент пропорциональности между коэффициентом α теплопередачи и значениями разницы температур поверхности кабелю и докільця $\Delta\Theta_s$ для відносно великих діаметрів є достатньо незмінним параметром і його визначення і одночасне визначення $\Delta\Theta_s$ може бути використаним в теплових розрахунках кабелю у повітрі в конкретних умовах застосування.

Список літератури: 1. *Щебенюк Л.А.*, До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. / *Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антонеч* // Вісник НТУ «ХПІ». – НТУ «ХПІ», 2011. – № 42. – С. 43 – 46. 2. *Ларина Э.Т.* Силовые кабели и кабельные линии. / Э. Т. Ларина – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.. 3. ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. КАБЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНІ. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1 – 1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коefficient навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення. 4. *В. П. Карпушенко* / Силові кабелі низької та середньої напруги // *В. П. Карпушенко Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антонеч, О. А. Науменко, Х.* : Регіон-інформ 2000, 374 с.

Bibliography (transliterated): 1. L.A. Shhebenjuk, T.Ju. Antonec'. Do vyznachennja propusknoji sprognoznoji visokovol'tnih silovih kabeliv z plastmasovoju izoljacieju. *Vistnik NTU «KHPI»*. 2011. No. 42. 43 – 46. Print. 2. Je.T. Larina. *Silovye kabeli i kabel'nye linii* Moscow. Jenergoatomizdat, 1984. Print.. 3. DSTU IEC60287-1-1:2012. KABELI ELEKTRICHNI. Obchislennja nominal'noi sili strumu. Chastina 1 – 1. Spivvidnoshennja dlja obchislennja nominal'noi sili strumu (koeficient navantazhennja 100 %) i obchislennja vtrat. Zagal'ni polozhennja. 4. V. P. Karpushenko, L. A. Shhebenjuk, Ju. O. Antonec', O. A. Naumenko *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugi*, Kharkiv. Region-inform. 2000. Print. 5. V.M. Leonov, I.B. Peshkov, I.B. Rjazanov, S.D. Holodnyj *Osnovy kabel'noj tehniki*: Moscow. Izdatel'skij centr «Akademija», 2006. Print..

Поступила (received) 18.10.2014

УДК 621.315

А.С. ФЕДЯЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КОНТРОЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ ЗОН АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Состояние образцов кабелей, эксплуатируемых в различных зонах атомных электростанций, а также, образцов, хранившихся на складе, оценивается путем измерения тангенсов углов диэлектрических потерь изоляционных промежутков. Указанные параметры отличаются для кабелей, находившихся в разных условиях эксплуатации. Измеряя tg δ после ускоренного радиационно-термического старения и увлажнения можно выявить процессы старения изоляции кабелей.

Ключевые слова: Контрольные кабели, атомные электростанции, тангенс угла диэлектрических потерь, ускоренное старение, изоляция.

Введение. Кабели КПЭТИ используются в системе внутриреакторного контроля тепло- и энерговыделения атомных электростанций и работают как под защитной оболочкой ядерного реактора, в так называемой *гермозоне*, так и за защитной оболочкой, в так называемой *чистой зоне*. В силу присутствия в конструкции материалов повышенной термической и радиационной стойкости (радиационноостойкого полиэтилена, полиимиды), кабели КПЭТИ могут длительно (15000 ч) эксплуатироваться в диапазоне температур от -5 до 100°C и кратковременно (до 40 ч) выдерживать увеличение температуры до 150°C.

Кабели, проложенные в гермозоне ядерного реактора, находятся в условиях воздействия высокого уровня радиации, а также, повышенной влажности. Кабели, проложенные в чистой зоне, таким воздействиям не подвергаются. Техническое состояние образцов кабелей из гермозоны и чистой зоны должно быть различно. Также, по-разному они должны реагировать на ускоренное радиационно-термическое старение.

Цель работы – сравнительный анализ состояния изоляции кабелей гермозоны и чистой зоны ядерного реактора по величинам тангенсов углов диэлектрических потерь в исходном состоянии, а также в процессе ускоренного радиационно-термического старения и увлажнения. В обследовании участвовали три образца контрольных

©А. С. Федяй, 2015

кабелей КПЭТИ. Образец КПЭТИ-I отобран с кабельной трассы гермозоны ядерного реактора, образец КПЭТИ-II – с чистой зоны, образец КПЭТИ-III хранился на складе.

В исходном состоянии измерялись тангенсы углов диэлектрических потерь по одной из схем совокупных измерений «две жилы вместе относительно экрана пары» на частотах 0,1, 1 и 10 кГц (на рис. 1 показаны синим маркером \circ , Δ , $+$ на частотах 0,1, 1, 10 кГц соответственно).

Величины тангенсов углов диэлектрических потерь указанных изоляционных промежутков образца кабеля с гермозоны составляют 0,5 – 1 % на частоте 0,1 кГц, 0,23 – 0,50 % на частоте 1 кГц, 0,10 – 0,19 % на частоте 10 кГц. Высокий уровень значений $\text{tg}\delta$ свидетельствует о том, что изоляция кабеля КПЭТИ-I состарена и увлажнена.

Величины $\text{tg}\delta$ для образца кабеля с чистой зоны существенно меньше, как меньше и разброс параметров для различных симметричных пар: 0,13 – 0,18 % на частоте 0,1 кГц, 0,10 – 0,13% на частоте 1 кГц, 0,06 – 0,08% на частоте 10 кГц.

Большая разница между величинами $\text{tg}\delta$ для двух кабелей различных зон ядерного реактора может свидетельствовать о разном техническом состоянии образцов. Разброс измеренных величин $\text{tg}\delta$ на всех частотах для первого образца свидетельствует о том, что влага, сконденсированная в кабеле, могла стекать, скапливаясь вблизи изоляции пар, находящихся внизу конструкции, в то время, как для верхних пар влияние на величину $\text{tg}\delta$ оказывал только конденсат на поверхности изоляции. Чувствительность измерения к капиллярным явлениям здесь исключается, в силу выбранной схемы измерений «две жилы вместе относительно экрана пары». При такой схеме силовые линии поля не захватывают капилляр, образованный соприкасающимися изолированными жилами, а, пронизывая изоляцию пар радиально, отходят на общий экран [1]. Особо чувствительной к процессам увлажнения оказывается частота 0,1 кГц, на которой $\text{tg}\delta$ обусловлен потерями при колебаниях молекул воды. На этой частоте тангенс угла диэлектрических потерь сильно завышен для образца кабеля с гермозоны. На частоте 10 кГц преобладают потери, вызванные низкомолекулярными продуктами деградации изоляции. Как видно на рисунке 1, и на высокой частоте потери для кабеля с гермозоны выше в два раза в сравнении с кабелем с чистой зоны.

Величины $\text{tg}\delta$ для образца кабеля, хранившегося на складе, и для образца кабеля из чистой зоны оказались одного порядка. Разброс измеренных величин $\text{tg}\delta$ на всех частотах для кабеля КПЭТИ-III может

свидетельствовать об увлажнении, в результате которого влага стекла и скапливалась в одной части конструкции (по механизму образца КПЭТИ-I). Однако образец кабеля со склада напитал меньше влаги, чем образец с гермозоны. Это связано как с условиями эксплуатации кабелей в гермозоне (относительная влажность 70 %), так и с сильной гигроскопичностью состаренной изоляции.

Таким образом, входной контроль состояния изоляции кабелей выявил сильное увлажнение кабеля с гермозоны (повышенный $\text{tg}\delta$ на всех частотах). Образцы кабелей с чистой зоны и со склада похожи по техническому состоянию, однако, образец со склада увлажнен сильнее (по-видимому, в неотапливаемом помещении склада влага конденсируется на поверхности изоляции и стекает в одну часть конструкции).

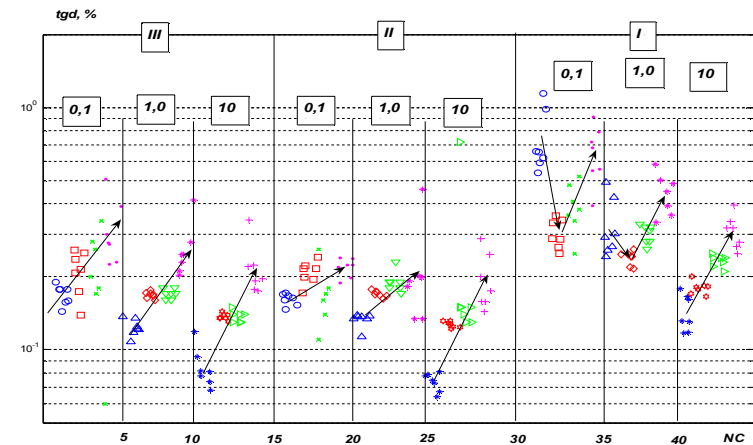


Рис. 1 - Изменение $\text{tg}\delta$ группы $C_{1,2-e}$ образцов кабелей КПЭТИ-I (с гермозоны), КПЭТИ-II (с чистой зоны), КПЭТИ-III (после 16 лет хранения на складе) в процессе испытаний (обозначено стрелками): исходное состояние (показано синим маркером на всех частотах); радиационно-термическое старение (красный маркер); выдержка во влагокамере в течение 4 суток (зеленый маркер); выдержка во влагокамере в течение еще 10 суток (сиреневый маркер).

После этапа входного контроля образцы кабелей были подвергнуты ускоренному старению, которое включало: воздействие повышенной температуры 150 ± 2 °C (продолжительностью до 40 ч);

механические изгибающие воздействия (10 и 50 циклов знакопеременных перегибов на угол 90° с радиусом перегиба, равным 5 и 15 диаметров кабеля соответственно); облучение электронами до поглощенной дозы 30 Мрад; повторное воздействие указанной повышенной температуры.

После ускоренного старения проведено повторное измерение характеристик (на рис. 1 показаны красным маркером \square , \diamond , \star на частотах 0,1, 1, 10 кГц соответственно).

Для образца кабеля с гермозоны наблюдается уменьшение $\text{tg}\delta$ на частотах 0,1 и 1 кГц, что свидетельствует о выпаривании влаги из конструкции. На 10 кГц, напротив, потери увеличиваются из-за накопления продуктов распада изоляции, вследствие прогрессирующих процессов старения.

Величины тангенсов углов диэлектрических потерь образца кабеля с гермозоны составляют 0,23 – 0,38 % на частоте 0,1 кГц, 0,20 – 0,28 % на частоте 1 кГц, 0,18 – 0,20 % на частоте 10 кГц.

Для образца кабеля с чистой зоны после ускоренного старения наблюдается увеличение $\text{tg}\delta$ на всех частотах. Это свидетельствует о деградации изоляции. Величины $\text{tg}\delta$ составляют: 0,17 – 0,23 % на частоте 0,1 кГц, 0,17 – 0,19 % на частоте 1 кГц, 0,12 – 0,13 % на частоте 10 кГц. Разброс параметров уменьшился на частотах 1 и 10 кГц, что может быть связано с подсушкой кабеля. Кроме того, сближение свойств изоляции жил в паре может служить индикатором состаренности кабеля [2]. Изоляция пары, долгое время находящейся под воздействием одних и тех же факторов старения (или соответствующего ускоренного старения), претерпевает одинаковые изменения.

Образец кабеля со склада на ускоренное старение отреагировал так же, как и образец с чистой зоны.

Следующий тип испытаний включал два этапа выдержки во влажной камере в течение четырех и десяти суток (на рис. 1 зеленый и сиреневый маркер, соответственно).

После увлажнения $\text{tg}\delta$ увеличился для всех кабелей на всех частотах. Разброс параметров также увеличился, что подтверждает предположение о неравномерном распределении влаги внутри конструкции, вследствие стекания.

Выводы. Сравнительный анализ образцов кабелей, отобранных с гермозоны, чистой зоны и хранившихся на складе показал, что для образцов, извлеченных с чистой зоны и хранившихся на складе, характерны невысокие исходные значения $\text{tg}\delta$ (до 0,2 %), которые

увеличиваются в процессе ускоренного старения и увлажнения. Для образца кабеля гермозоны характерны высокие значения $\text{tg}\delta$ (до 1 %) в исходном состоянии, что свидетельствует о том, что образец в большей степени увлажнен и состарен. Воздействие повышенной температуры и радиации образца чистой зоны и со склада вызывает рост $\text{tg}\delta$, что связано с процессами старения. А для образца с гермозоны (в худшем исходном техническом состоянии) обнаружено уменьшение $\text{tg}\delta$ на частотах 0,1 и 1 кГц, что свидетельствует о выпаривании влаги, и сравнительно небольшой рост $\text{tg}\delta$ на 10 кГц, что может означать замедление процессов окисления, которое наблюдается для более старых образцов.

Испытания во влажной камере показали, что для увлажненных образцов наблюдается разброс параметров $\text{tg}\delta$ вследствие неравномерного распределения влаги в конструкции.

Список литературы. 1. Федяй А. С. Диэлектрические потери изоляционных промежутков экранированной витой пары / А. С. Федяй // Вісник НТУ «ХПІ». – НТУ «ХПІ», №34. - 2006. – с 28 – 35. 2. Набока Б.Г. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС. / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, А.С. Штангей // Электротехника и Электромеханика. - №3–2005. с. 80–82.

Bibliography (transliterated): 1. Fedjaj A. S. Diielektricheskie poteri izoljacionnyh promezhutkov jekranirovannoj vitoj pary. *Bulletin of NTU «KHPi»*. No. 34. 2006. 28 – 35. Print 2. Naboka B.G., Besprozvannyh A.V., Shtangej A.S. Parametry chastichnyh emkostej kak indikator sostojanija kontrol'nyh kabelej AJeS. *Jelektrotehnika i Jelektromehanika*. No. 3–2005. 80–82. Print.

Поступила (received) 29.04.2015

РЕФЕРАТИ

УДК 621.22–546

Визначення точності моделювання системи управління оборотними гідроагрегатами Дністровської ГАЕС / С.Ф. Артюх, І.І. Червоненко, С.В. Борщів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 3–9. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2224-0349.

Запропоновано структуру нової системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами ГАЕС, що працюють зі змінною частотою обертання, що дає можливість підвищити їх ККД. Проведено порівняльний аналіз перехідних процесів отриманих на математичній моделі і даних отриманих в результаті пусконаладжувальних робіт гідроагрегату Дністровської ГАЕС.

Ключові слова: оборотний гідроагрегат, ККД, змінна частота обертання, регулятор.

УДК 620.92

Передумови до створення енергогенеруючих вузлів гібридного типу на базі альтернативних джерел енергії / С.Ф. Артюх, К.В. Махотіло, К.В. Сапельніков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 10–17. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Широке впровадження альтернативних джерел енергії дає можливість створювати в енергосистемах гібридні енергогенеруючі вузли, які можуть суттєво покращувати режими їх роботи, підвищувати надійність електропостачання споживачів і стати учасниками конкурентного сектора енергоринку. У статті визначено передумови для створення таких енерговузла і намічені завдання, що вимагають наукового вирішення.

Ключові слова: гібридний енергогенеруючий вузол, поновлювані джерела енергії, електроенергетична система.

УДК 621.316.9

Моделювання напрямленого дистанційного захисту лінії електропередач в програмному комплексі PSCAD/MTDC/ В. В. Волохін, М. В. Петровський, О. О. Іванов, С. О. Іванов, О. І. Ігнатова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 35–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Моделювання напрямленого дистанційного захисту лінії електропередач реалізоване в програмному комплексі PSCAD/EMTDC, а також порівняно дві характеристики спрацювання дистанційного органу, а саме кругову і багатокутну. Розроблений алгоритм пускового органу, який завдяки контролю векторного приросту струмів зворотної послідовності запобігає фальшивим

спрацюванням при коливаннях електричної системи і асинхронному ході генераторів.

Ключові слова: моделювання, дистанційний захист, дистанційний орган, пусковий орган, коливання, асинхронний хід.

УДК 621.311

Система диспетчерського управління і контролю технологічними процесами на базі цифрових підстанцій / Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Лелека О.В., Гапон Д.А., Ієрусалімова Т.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 42–46. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349.

У сучасному суспільстві спостерігається різке підвищення вимог до ефективності енергозабезпечення широкого кола споживачів, забезпечення надійності енергопостачання та якості електричної енергії. Це може досягатися шляхом інтелектуалізації енергетичних мереж на основі положень концепції Smart Grid. Одним з основних сегментів цієї системи є цифрові підстанції, які дозволяють сьогодні модернізувати і розвивати енергетику. Рішення проблеми оптимізації виробництва, постачання і споживання електричної енергії можливе тільки при удосконаленні системи технологічного процесу на базі цифрових підстанцій, які складаються з сучасних інтелектуальних вимірювальних пристроїв.

Ключові слова: система, цифровий підстанція, диспетчеризація, діагностика, електроенергія, якість.

УДК 621.384.6

Перспективи застосування потужнострумових імпульсно-періодичних індукційних прискорювачів електронів в виробництві кабельно-провідникової продукції / А. Г. Гурін, Є. О. Корнілов, Р. С. Ложкін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 47–58. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2224-0349.

У статті розглянуто можливість застосування імпульсно-періодичних потужнострумових індукційних прискорювачів електронів у виробництві кабельно-провідникової продукції з ізоляцією з радіаційно-зшитого поліетилену. Проведено порівняльний аналіз з прискорювачами постійного струму і резонансними. Показано, що індукційні прискорювачі не поступаються по ефективності іншим типам прискорювачів, і мають перевагу завдяки можливості всебічного опромінення виробу пучком електронів, спрямованим до осі виробу, за один прохід через опромінюючий пристрій. Показано, що при великих потужностях дози, характерних для індукційних прискорювачів, теплове навантаження на опромінюваним поліетилен практично таке ж, як при використанні інших типів прискорювачів, і індукційні прискорювачі перспективні для опромінення виробів з великим

діаметром (приблизно від 1 см до 0,5 м). Це можуть бути дроти, кабелі та труби.

Ключові слова: імпульсно-періодичний потужнострумний індукційний прискорювач електронів; радіаційна зшивка поліетилену.

УДК 621.311

Обзор нормативної бази по системі smart grid /М.В.Житник// Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 3 (1175). – С. 59–64. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Пропонується розглянути систему smart grid, її історію виникнення та трансформацію до сучасного вигляду. Запропонована класифікація стандартів, яка відноситься до цієї системи для енергетичної галузі, розглянуті переваги при впровадженні, показники ефективності та оцінка ризиків. А також відображено, як поліпшити надійність за допомогою інтелектуальної енергомережі. Зроблені висновки, що SMART GRID, надає можливості більш ефективного управління ресурсами енергосистеми і їх автоматизації, що дозволяє об'єднати мережеві функції і оптимізувати процеси експлуатації енергосистеми.

Ключові слова: smart grid, автоматизована система управління, показник ефективності, надійність, оцінка ризиків.

УДК 621.625.032

Дослідження енергозберігаючого електромеханічного стенда на базі асинхронної машини для випробування двигунів внутрішнього згорання/ Г.І.Мельников/ О.О.Коротков/ О.С.Семіков// Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 65–72. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

У даній роботі розглядається випробувальна установка навантаження двигунів внутрішнього згорання, побудована на базі асинхронної машини і автономного інвертора напруги, що забезпечує передачу енергії в електромережу. Виконано синтез системи управління асинхронної машини 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 згорання, випробувальний стенд, автономний інвертор напруги, асинхронна машина.

УДК 621.315.2

Визначення електрофізичних параметрів напівпровідних екранів високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією / Р.П. Мотко, А.П. Пономарьова, С.О. Сокол // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика:

надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 73–80. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Розглянута інформація про методи оцінки електрофізичних параметрів напівпровідних екранів високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією. Визначення характеристик напівпровідних екранів – актуальна задача у практиці випробувань кабелів з високовольтною ізоляцією. Виконано аналіз впливу частоти на точність вимірювання електропровідності та діелектричної проникливості напівпровідних матеріалів. Проаналізовано вплив часткових розрядів на ізоляцію із зшитого поліетилену. Вказані причини виникнення часткових розрядів, а також методи по зменшенню амплітуди і повного їх вилучення. Досліджено спосіб вимірювання часткових розрядів. Співставлені дані різних джерел.

Ключові слова: високовольтний силовий кабель, напівпровідний екран, частковий розряд, полімерна ізоляція, зшитий поліетилен.

УДК 621.316.933

Вплив захищеного підходу на вибір розрахункового струму однофазного короткого замикання в електричних високовольтних мережах / І. В. Ніжевський, В. І. Ніжевський, С. К. Березка, Б. Іноятов, С. Наслідні // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 81–86. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.

Досліджений вплив довжини прольоту і числа опор захищеного підходу ліній електропередачі, що примикають до підстанції, на вибір розрахункового струму однофазного короткого замикання в електричній високовольтній мережі. Показано, що зростання довжини прольоту і (або) опору заземлителя опори збільшує опір заземлення системи “трос-опори”. Використання результатів досліджень дозволяє точніше визначати значення розрахункового струму однофазного короткого замикання.

Ключові слова: підстанція, заземлювач, система “трос-опори”, довжина прольоту, число опор, захищений підхід, вибір, розрахунковий струм, однофазне коротке замикання, аналіз

УДК 621.31

Вплив зміни параметрів розрядного кола ГПС на максимальне значення струму / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 114–120. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

У роботі вирішено завдання степеневого наближення з погрешністю, що не перевищує 1%, залежності максимального значення імпульсу струму у всій області зміни величин параметрів елементів розрядного кола генератора імпульсів струму. Отримані співвідношення дозволяють при будь-яких сполученнях значень параметрів елементів розрядного кола провадити розрахунки максимального значення імпульсу струму, формованого ГПС;

визначати необхідне значення одного з параметрів елементів розрядного кола ГІС при відомих значеннях параметрів інших елементів і максимального значення струму, а також при модифікації навантаження. Виведено співвідношення для визначення проектних допусків максимального значення імпульсу струму.

Ключові слова: генератор імпульсів струму, емнісний накопичувач енергії, максимальне значення струму.

УДК 621.315

Основні аспекти методології проектування повітряних ліній при "інтелектуалізації" електричних мереж / Черкашина В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 3 (1175). – С. 87–92. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

В статті сформовані основні аспекти сучасної методології проектування повітряних ліній, які враховують при "інтелектуалізації" електричних мереж оптимізацію параметричного ряду перерізів проводів та розширення технологічного базису функціональних можливостей повітряних ліній, що дозволить виконати перехід ліній від "пасивних" до активно-адаптивним об'єктів електричних мереж. Бібліогр.: 7 назв.

Ключеві слова: повітряна лінія, критеріальний метод, активно-адаптивний об'єкт, електрична мережа, "інтелектуальна" мережа.

УДК 621.315.2

До визначення теплового опору повітря в конкретних умовах прокладання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією / Л. А. Щербенюк, Т. Ю. Антоненко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 3 (1175). – С. 140–148. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.

Співставлено внесок відведення тепла шляхом конвекції із внеском відведення тепла шляхом випромінювання з поверхні кабелю. Виконано аналіз залежності коефіцієнта теплопередачі з поверхні кабелю у повітрі як суми коефіцієнта теплопередачі конвекцією α_k і коефіцієнта теплопередачі випромінюванням α_v від від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$. Робота направлена на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: високовольтні силові кабелі, відведення тепла в повітрі, конвекція, випромінювання, пластмасова ізоляція.

УДК 621.315

Діелектричні втрати в контрольних кабелях різних зон атомних електростанцій / А. С. Федяй // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 3 (1175). – С. 149–153. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349.

Стан зразків кабелів, що експлуатуються в різних зонах атомних електростанцій, а також, зразків, що зберігалися на складі, оцінюється шляхом

вимірювання тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних проміжків. Вказані параметри відрізняються для кабелів, що знаходилися в різних умовах експлуатації. Вимірюючи $\tan\delta$ після прискореного радіаційно-термічного старіння й зволоження можна виявити процеси старіння ізоляції кабелів.

Ключові слова: контрольні кабелі, атомні електростанції, тангенс кута діелектричних втрат, прискорене старіння, ізоляція.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.22–546

Определение точности моделирования системы управления обратимыми гидроагрегатами Днестровской ГАЭС / С.Ф. Артюх, И.И. Червоненко, С.В. Боршев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 3–9. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Предложена структура новой системы автоматического управления обратимыми гидроагрегатами ГАЭС, работающими с переменной частотой вращения, что дает возможность повысить их КПД. Проведен сравнительный анализ переходных процессов полученных на математической модели и данных полученных в результате пусконаладочных работ гидроагрегата Днестровской ГАЭС.

Ключевые слова: обратимый гидроагрегат, КПД, переменная частота вращения, регулятор.

УДК 620.92

Предпосылки к созданию энергосберегающих узлов гибридного типа на базе альтернативных источников энергии / С.Ф. Артюх, К.В. Махило, К.В. Сапельников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 10–17. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Широкое внедрение альтернативных источников энергии дает возможность создавать в энергосистемах гибридные энергогенерирующие узлы, которые могут существенно улучшать режимы их работы, повышать надежность электроснабжения потребителей и стать участниками конкурентного сектора энергорынка. В статье определены предпосылки для создания таких энергоузлов и намечены задачи, требующие научного решения.

Ключевые слова: гибридный энергогенерирующий узел, возобновляемые источники энергии, электроэнергетическая система

УДК 620.92

Моделирование направленной дистанционной защиты линии электропередач в программном комплексе PSCAD\MTDC / В. В. Волохин, М. В. Петровский, А. А. Иванов, С. А. Иванов, О. И. // Вісник НТУ «ХПІ».

Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 35–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Моделирование направленной дистанционной защиты линии электропередачи выполнено в программном комплексе PSCAD/EMTDC, а также проведено сравнение двух характеристик срабатывания дистанционного органа, а именно круговой и многоугольной. Разработан пусковой орган, который с помощью контроля векторного прироста токов обратной последовательности предотвращает фальшивые срабатывания при качаниях электрической сети и асинхронном ходе генераторов.

Ключевые слова: моделирование, дистанционная защита, дистанционный орган, пусковой орган, качания, асинхронный ход.

УДК 621.311

Система диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций / Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Лелека А.В., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С.. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 42–46. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349.

В современном обществе наблюдается резкое повышение требований к эффективности энергообеспечения широкого круга потребителей, обеспечение надежности энергоснабжения и качества электрической энергии. Это может достигаться путем интеллектуализации энергетических сетей на основе положений концепции Smart Grid. Одним из основных сегментов этой системы являются цифровые подстанции, которые позволяют сегодня модернизировать и развить энергетику. Решение проблемы оптимизации производства, снабжения и потребления электрической энергии возможно только при усовершенствовании системы технологического процесса на базе цифровых подстанций, которые состоят из современных интеллектуальных измерительных устройств.

Ключевые слова: система, цифровая подстанция, диспетчеризация, диагностика, электроэнергия, качество.

УДК 621.384.6

Перспективы применения высокопоточных импульсно-периодических индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 47–58. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2224-0349.

В статье рассмотрена возможность применения импульсно-периодических высокопоточных индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции с изоляцией из радиационно-сшитого полиэтилена. Проведен сравнительный анализ с ускорителями постоянного тока и резонансными. Показано, что индукционные

ускорители не уступают по эффективности другим типам ускорителей, и имеют преимущество перед ними благодаря возможности осесимметричного облучения изделия пучком электронов, направленным к оси изделия, за один проход через облучающее устройство. Показано, что при больших мощностях дозы, характерных для индукционных ускорителей, тепловая нагрузка на облучаемый полиэтилен практически такая же, как при использовании других типов ускорителей, и индукционные ускорители перспективны для облучения изделий с большим диаметром (примерно от 1 см до 0,5 м). Это могут быть провода, кабели и трубы.

Ключевые слова: импульсно-периодический высокопоточный индукционный ускоритель электронов; радиационная сшивка полиэтилена.

УДК 621.311

Обзор нормативной базы по системе smart grid / М.В.Житник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175). – С. 59–64. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Предлагается рассмотреть систему smart grid ее историю возникновения и трансформации к современному виду. Предложена классификацию стандартов, которая относится к этой системе для энергетической отрасли, рассмотрены плюсы при внедрении, показатели эффективности и оценка рисков. А также указано, как улучшить надежность с помощью интеллектуальной энергостемы. Сделаны выводы, что SMART GRID, предоставляет возможности более эффективного управления ресурсами энергосистемы и их автоматизации, позволяет объединить сетевые функции и оптимизировать процессы эксплуатации энергосистемы.

Ключевые слова: smart grid, автоматизированная система управления, показатель эффективности, надежность, оценка рисков.

УДК 621.625.032

Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе асинхронной машины 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», 2016. – № 3 (1175). – С. 65–72. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе асинхронной машины и автономного инвертора напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть. Выполнен синтез системы управления асинхронной машины 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 поддержание постоянного

момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, автономный инвертор напряжения, асинхронная машина.

УДК 621.315.2

Определение электрофизических параметров полупроводящих экранов высоковольтных силовых кабелей с полимерной изоляцией / Р.П. Мотко, А.П. Пономарева, С.А. Сокол Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 73–80. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349.

Рассмотрена информация о методах оценки электрофизических параметров полупроводящих экранов высоковольтных силовых кабелей с полимерной изоляцией. Определены характеристики полупроводящих экранов – актуальная задача в практике испытаний кабелей с высоковольтной изоляцией. Выполнен анализ влияния частоты на точность измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости полупроводящих материалов. Проанализировано влияние частичных разрядов на изоляцию из сшитого полиэтилена. Указаны причины возникновения частичных разрядов, а также методы по уменьшению амплитуды и полного устранения их. Исследован способ измерения частичных разрядов. Сопоставлены данные разных источников.

Ключевые слова: высоковольтный силовой кабель, полупроводящий экран, частичный разряд, полимерная изоляция, сшитый полиэтилен.

УДК 621.316.933

Влияние защищенного подхода на выбор расчетного тока однофазного короткого замыкания в электрических высоковольтных сетях / И. В. Нижевский, В. И. Нижевский, С. К. Березка, Б. Иноят, С. Насриддини // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 81–86. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.

Исследовано влияние длины пролета и числа опор защищенного подхода примыкающих к подстанции линий электропередачи на выбор расчетного тока однофазного короткого замыкания в электрической высоковольтной сети. Показано, что рост длины пролета и (или) сопротивления заземлителя опоры увеличивает сопротивление заземления системы «трос-опоры». Использование результатов исследований позволяет более точно определять значение расчетного тока однофазного короткого замыкания.

Ключевые слова: подстанция, заземлитель, система «трос-опоры», длина пролета, число опор, защищенный подход, выбор, расчетный ток, однофазное короткое замыкание, анализ

УДК 621.31

Влияние изменения параметров разрядной цепи ГИТ на максимальное значение тока / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 114–120. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

В работе решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости максимального значения импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока. Полученные соотношения позволяют при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи производить расчеты максимального значения импульса тока, формируемого ГИТ; определять необходимое значение одного из параметров элементов разрядной цепи ГИТ при известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока, а также при модификации нагрузки. Выведены соотношения для определения проектных допусков максимального значения импульса тока.

Ключевые слова: генератор импульсов тока, емкостной накопитель энергии, максимальное значение тока.

УДК 621.315

Основные аспекты методологии проектирования воздушных линий при "интеллектуализации" электрических сетей / В. В. Черкашина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 87–92. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

В статье показаны основные аспекты современной методологии проектирования воздушных линий, которые учитывают при "интеллектуализации" электрических сетей оптимизацию параметрического ряда сечений проводов и расширение технологического базиса их функциональных возможностей, что позволит выполнить переход линий от "пассивных" к активно-адаптивным объектам электрических сетей. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: воздушная линия, критериальный метод, активно-адаптивный объект, электрическая сеть, "интеллектуальная" сеть.

УДК 621.315.2

К определению теплового сопротивления воздуха в конкретных условиях прокладки высоковольтных силовых кабелей с пластмассовой изоляцией / Л. А. Щербенюк, Т. Ю. Антоненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 3 (1175). – С. 140–148. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

Выполнен анализ отведения тепла с поверхности кабеля в окружающий воздух для высоковольтных силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 110 кВ. Сопоставлен вклад отвода тепла путем конвекции с вкладом отведения тепла путем излучения с поверхности кабеля.

Выполнен анализ зависимости коэффициента теплопередачи с поверхности кабеля в воздухе как суммы коэффициента теплопередачи конвекцией α_k и коэффициента теплопередачи излучением α_b от разности температур поверхности кабеля и окружающей среды $\Delta\Theta_s$. Работа нацелена на создание метода определения допустимого тока таких кабелей в конкретных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: Силовые кабели, напряжение 110 кВ, отвод тепла в воздухе, конвекция, излучение, пластмассовая изоляция.

УДК 621.315

Диэлектрическиепотери в контрольных кабелях различных зон атомныхэлектростанций/ А. С. Федяй, // Вісник НТУ «ХПР». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПР», 2016. – № 3 (1175). – С. 149–153. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349.

Состояние образцов кабелей, эксплуатируемых в различных зонах атомных электростанций, а также, образцов, хранившихся на складе, оценивается путем измерения тангенсов углов диэлектрических потерь изоляционных промежутков. Указанные параметры отличаются для кабелей, находившихся в разных условиях эксплуатации. Измеряя $\tan\delta$ после ускоренного радиационно-термического старения и увлажнения можно выявить процессы старения изоляции кабелей.

Ключевые слова: Контрольные кабели, атомные электростанции, тангенс угла диэлектрических потерь, ускоренное старение, изоляция.

ABSTRACTS

The determination of modelling accuracy of the automatic control system for reversible hydropower supply units on hydroelectric pumped storage power plant "Dnestrovskaya" / S.F. Artyuh, I.I. Chervonenko, S.V. Borschev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 3–9. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2224-0349.

It was suggested the structure of new automatic control system for reversible hydropower supply unit with variable rotation speed for hydroelectric pumped storage power plant. This structure gives potentiality to increase their coefficient of efficiency under changes of water head. It has been done the comparative analysis of transients that were obtained using mathematical mode and derived data from testing and commissioning hydropower supply unit on hydroelectric pumped storage power plant «Dnestrovskaya». Based on simile it was estimated the accuracy of mathematical modeling. This made possible to hold extensive researches of all working modes of hydroelectric pumped storage power plant. Based on received results it has been proposed the practical implementation of automatic control system.

Keywords: reversible hydropower supply unit, coefficient of efficiency, variable rotation speed, controller.

Preconditions for creating of the hybrid power generating units on the basis of alternative energy sources / S.F. Artyuh, K. V. Mahotilo, K. V. Sapil'nikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 10–17. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.

The widespread adoption of alternative energy sources makes it possible to create hybrid power systems in the power generation units, which can significantly improve the modes of their work, to increase the reliability of electricity supply to consumers and to become parties of the competitive sector of the energy market. The paper defines the preconditions for the creation of such power units and scheduled tasks that require scientific decisions.

Keywords: Hybrid power efficient node, renewable energy sources, electric power system.

Modeling directional distance protection power lines in the software package PSCAD/MTDC / V. V. Volokhin, M. V. Petrovskiy, A. A. Ivanov, S. A. Ivanov, O. I. Ignatova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 35–41. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.

Distance protection is used in networks of complex configuration, which for reasons of safety and sensitivity cannot be used more simple overcurrent. This article demonstrate detailed distance protection scheme of power lines. Data are given about comparison of the circular and polygonal protection zone. The algorithm proposed in this paper prevents false triggered distance protection in a mode of asynchronous course, and swings in power system. It is show that the response time of the distance protection with polygonal protection zone response time is less than the distance protection with a circular protection zone. The simulation of the system is done by using PSCAD/EMTDC software.

Keywords: modeling, distance protection, remote organ, starting body, fluctuation, induction course.

System dispatch management and control of technological processes on the basis of digital substations // Gryb O., Shevchenko S, Leleka A., Gapon D., Ierusalimova T. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 42–46. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2224-0349.

In modern society there has been a dramatic increase in the performance requirements of energy supply a wide range of customers, ensuring reliability of supply and quality of electric energy. This can be achieved by intellectualization energy networks on the basis of the provisions of the Smart Grid concept. One of the main segments of this system are digital substation, which allow today to modernize

and develop power. The solution to the problem of optimization of production, supply and consumption of electric energy is possible only if the system improvement process based on digital substations, which consist of modern intelligent measuring devices.

Keywords: system, digital substation, scheduling, diagnosis, electric power, quality.

The application prospects of high-current pulsed induction electron accelerators in the production of cable wire products / A. G. Gurin, E. A. Kornilov, R. S. Lozhkin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 47–58. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2224-0349.

In the article, the possibility of application the pulsed high-current induction electron accelerators for the production of cable products with radiation cross-linked polyethylene insulation is considered. A comparative analysis of the induction accelerator with resonant accelerators and accelerators DC, used for these purposes are given. It is shown that induction accelerators are not inferior in effectiveness to other types of accelerators and have an advantage over them due to the possibility of an axisymmetric radiation produces a beam of electrons directed toward the axis of the product, in one pass through the irradiation device. It is shown that at the high dose rate characteristic of induction accelerators, the heat load on an irradiated polyethylene is practically the same as when using other types of accelerators. The article shows that induction accelerators promising for irradiation of products with a large diameter (about 1 cm to 0.5 m). These products may be wires, cables, and pipes.

Keywords: pulsed high-current induction electron accelerator; radiation cross-linking polyethylene.

Review of the regulatory framework for the system of smart grid / M.V.Zhytnyk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 59–64. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.

There have been proposed to watch how working smart grid system, historical chronology and transformation in modern look. A smart grid is a modernized electrical grid that uses analog or digital information and communications technology to gather and act on information such as information about the behaviours of suppliers and consumers in an automated fashion to improve the efficiency, reliability, economics, and sustainability of the production and distribution of electricity. Electronic power conditioning and control of the production and distribution of electricity are important aspects of the smart grid. Roll-out of smart grid technology also implies a fundamental re-engineering of the electricity services industry, although typical usage of the term is focused on the technical infrastructure. The smart grid represents the full suite of current and proposed responses to the challenges of electricity supply. In this article we can see

classification standards, which belong to this system for the energy industry, shows advantages when used, index of efficiency and estimation of risks. Also shows how to improve reliability using smart grid. After come to the upshot, then this system gives to possibility of more effective management the resources of grid and their automation, optimize the processes of exploitation of grid.

Keywords: smart grid, automation control system, index of efficiency, reliability, estimation of risks

Energy saving stand on the base of machine / G. I. Mel'nikov, O. O. Korotkov, O. S. Semikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 65–72. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.

The test set load of internal combustion engines, built on the basis of the asynchronous machine and the autonomous voltage inverter, capable of transmitting energy to the grid, is considered in this paper. The synthesis of a control system of the asynchronous machine and the autonomous voltage inverter, allowing to control the engine load torque regardless of the speed of the shaft and the reactive power network, is performed. 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, AC machine.

Determination of physical parameters of the semiconducting screens high voltage power cables with polymeric insulation / V. S. Motko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 73–80. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349.

Reviewed information on methods to estimate physical properties of the semiconducting screens high voltage power cables with polymeric insulation. Characterization of semiconducting screens – an urgent task in the practice tests of high voltage cables with insulation. The analysis of the influence of frequency on the accuracy of the measurement of conductivity and dielectric constant of semiconducting materials has executed. Analyzed the influence of partial discharges on the XLPE insulation. States the reasons for the occurrence of partial discharges, as well as methods for reducing the amplitude and eliminate them. Researched method of measuring partial discharges. Mapped data from different sources. The problem of determining the characteristics of the semiconducting screens need to be addressed depending on specific situations. In the case of the high-frequency range (for example: lightning impulse, the analysis of partial discharges) can be based on the data of the above method.

Keywords: high voltage power cable, semiconducting screen, partial discharge, polymer insulation, cross-linked polyethylene.

The effect of protective length on a choice of current of single-phase short circuit in electric high-voltage networks / I. V. Nizhevsky, V. I. Nizhevsky, S. K. Berezka, B. Inoyatov, S. Nasriddini // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 81–86. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.

On the base of calculations and studies the resistance grounding device substation changes consisting of the substation earthing system and earthing "wire-tower", depending on the parameters of the last ones is analyzed. The effect of the span length, the number of towers on a protective length each transmission lines to substations and on the selection of the rated current of single-phase short circuit in an electrical high-voltage networks. An increase in the span length and (or) resistance grounding device increases the resistance of "wire-tower". Studies carried out for the actual range of variation of the circuit parameters, showed that the resistance of the earth electrode substation substantially affects the distribution of single-phase short-circuit current in the circuit. Using the results of research can more accurately determine the value of the rated current of single-phase short circuit. The results are recommended to take into account in the design of grounding systems at substations.

Keywords: substation, grounding device, system "wire-tower", span length, the number of towers, protective length, choice, determined current.

Effect of changes in the parameters of the discharge circuit CPG on the maximum current / AA Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 114–120. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2224-0349.

Preparation simplified relations for determining the maximum value of the pulse current. Determination of the amount of current deviations from the nominal value in the discharge circuit of the test device. General methodology used to determine the maximum value of the current in the high voltage generator comprising capacitive energy storage. Applying the method of approximation of functions and non-linear programming. The relations that allow for any combination of values in the oscillator to produce estimates of maximum current pulse. The formulas for determining the maximum deviation of the current pulse. In this paper we solve the problem of the degree of approximation depending on the maximum value of the current pulse parameters of the discharge circuit for the entire range of their values. Approximation error does not exceed 1%. The relations obtained allow to determine the maximum value of the current pulse; its deviation from the nominal value; diagnosis of the capacitive energy storage.

Keywords: current pulse generator, capacitive energy storage, maximum current.

An account parameters of environment is in the tasks of planning air-tracks / Cherkashyna V.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 87–92. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2224-0349

During "intellekt" of electric networks air-tracks must be artiv - by addaptiv objects, that dictates the necessity of new approach for methodology of planning air-tracks. In the article the basic aspects of methodology of planning of air-tracks are presented during "intellekt" of electric networks. It is shown that forming of modern methodology of planning of air-tracks must consist of two stages: on the first stage optimization of self-reactance row of sections of wires is expedient taking into account the prospect of functioning of air-tracks, that similarly will allow partly to decide the questions of decline of heterogeneity of network; on the second stage it is expedient to envisage the equipment of these lines the additional elements of estimation and control, that extend the technological base of functional possibilities of lines due to additional information about parameters in the mode of "on-line", what the transition of lines will allow to execute from "passive" to the artiv-addaptiv objects electric networks.

Keywords: air-track, kriterial method, actively-adaptive object, electric network, "intellekt" network.

Determination of air thermal resistance for concrete conditions of operation of power cables with XLPE insulation / L. A. Shebenjuk, S. Ju. Antonec // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 140–148. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349

The analysis results definition the heat transfer coefficient of cables at direct voltages up to 110 kV. The heat transfer coefficient consist of : 1) the convection heat transfer between cable surface and the air region about it; 2) the radiation heat transfer. The radiation heat transfer described equation Stefan-Boltzmann and depend on kinematic viscosity of the air, the density of the air. The analysis results definition the convection heat transfer between cable surface emissivity and the air region about it to depend on difference temperature $\Delta\Theta$ s between cable surface emissivity and the air region about it. The work is devoted to creation of a method for calculation of the current rating of high-voltage cables in conditions function.

Key word: Power cable, voltages up to 110 kV, convection heat transfer, radiation heat transfer, polyethylene insulation.

Dielectric losses in the different zones of control cables nuclear power plant / A. S. Fedjaj // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 3 (1175). – P. 149–153. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2224-0349

In the nuclear reactor control system of heat and energy release of nuclear power plantsused radiation-resistant control cables with XLPE insulation. Monitoring of the technical condition of the cables is important for safety. It is proposed to control condition of the cablesby measuring the dielectric loss tangent of angles insulation spaces samples cables, which are selected from different parts of the cable ducts. Cables that are located in different areas of a nuclear reactor grows

old differently. Thus, samples of cables germozone aged more than cable samples from clean zone Accordingly, the different angles of the dielectric loss tangent for the cables that were in different conditions. Measuring tgδ after accelerated aging of radiation-thermal and moisture can reveal aging of cable insulation.

Keywords: Control cables, nuclear power plants, dielectric loss tangent, accelerated aging, insulation.

ЗМІСТ

<p><i>С.Ф. АРТЮХ, И.И. ЧЕРВОНЕНКО, С.В. БОРЩЕВ</i> Определение точности моделирования системы управления обратимыми гидроагрегатами днестровской ГАЭС.....</p> <p><i>С.Ф.АРТЮХ, К.В. МАХОТИЛО, К.В. САПЕЛЬНИКОВ</i> Предпосылки к созданию энергогенерирующих узлов гибридного типа на базе альтернативных источников энергии...</p> <p><i>В.Н. БАЖЕНОВ, ЭХСОНИ СУБХОН</i> Условия функционирования дистанционной защиты узловой схемы питания распределительной сети.....</p> <p><i>Ю. В. ВЛАДИМИРОВ, Д. О. МАЛИШЕВА</i> Доказ у прикладах неспроможності методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії вирішувати проблему КРП.....</p> <p><i>Ю. В. ВЛАДИМИРОВ</i> Звалища ТПВ як джерело поновлювальної енергії.....</p> <p><i>В. В. ВОЛОХІН, М. В. ПЕТРОВСЬКИЙ, С. Ю. ШЕВЧЕНКО О. О. ІВАНОВ, С. О. ІВАНОВ, О. І. ІГНАТОВА</i> Моделювання напрямленого дистанційного захисту лінії електропередач в програмному комплексі PSCAD\EMTDC.....</p> <p><i>О.Г. ГРИБ, С.Ю. ШЕВЧЕНКО, А. В. ЛЕЛЕКА, Д.А. ГАПОН, Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА</i> Система диспетчерского управления и контроля технологическими процессами на базе цифровых подстанций.....</p> <p><i>А. Г. ГУРИН, Е. А. КОРНИЛОВ, Р. С. ЛОЖКИН</i> Перспективы применения сильноточных импульсно-периодических индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции.....</p> <p><i>М.В. ЖИТНИК</i>, Обзор нормативної бази по системі SMART GRID.....</p> <p><i>Г.И. МЕЛЬНИКОВ, А.О. КОРОТКОВ, А.В. СЕМИКОВ</i>, Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе асинхронной машины для испытаний двигателей внутреннего сгорания.....</p> <p><i>Р.П. МОТКО, А.П. ПОНОМАРЕВА, С.А. СОКОЛ</i> Определение электрофизических параметров полупроводящих экранов высоковольтных силовых кабелей с полимерной изоляцией.....</p> <p><i>И.В.НИЖЕВСКИЙ, В.И. НИЖЕВСКИЙ, С.К. БЕРЕЗКА, И. БЕХРУЗ, С. НАСРИДДИНИ</i> Влияние защищенного подхода на выбор расчетного тока однофазного короткого замыкания в электрических высоковольтных сетях.....</p>	<p>3</p> <p>10</p> <p>18</p> <p>24</p> <p>31</p> <p>35</p> <p>42</p> <p>47</p> <p>59</p> <p>65</p> <p>73</p> <p>81</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<i>В.В. ЧЕРКАШИНА</i> , Основные аспекты методологии проектирования воздушных линий при "интеллектуализации" электрических сетей.....	87
<i>О. В. ЧУЛЄСВА, Л. Г. ВАСИЛЕЦЬ</i> Особливості модифікування композицій поліолефінів, які здатні до зшивання та самостійного загасання.....	91
<i>С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Б.Ф. ЄРМОЛЕНКО, Д.О. ДАНИЛЬЧЕНКО, С.І. ДРИВЕЦЬКИЙ</i> Поражаемость воздушных линий распределительных сетей с защищенными проводами грозowymi разрядами.....	100
<i>С. Ю. ШЕВЧЕНКО</i> Схема заміщення обмежувача перенапруг нелінійного для аналізу його роботи при порушеннях якості електроенергії в мережі.....	107
<i>А. А. ПЕТКОВ</i> , Влияние изменения параметров разрядной цепи ГИТ на максимальное значение тока.....	114
<i>О. В. ШУТЕНКО, Д. М. БАКЛАЙ, Т. Г. ГОРОЖАНКІНА</i> Аналіз графічних методів розпізнавання типу дефекту за результатами ХАРГ.....	121
<i>Л.А. ЦЕБЕНЮК, Т.Ю. АНТОНЕЦЬ</i> До визначення теплового опору повітря в конкретних умовах прокладання високовольтних силових кабелів із пластмасовою ізоляцією.....	140
<i>А.С. ФЕДЯЙ</i> Диэлектрические потери в контрольных кабелях различных зон атомных электростанций.....	149
<i>РЕФЕРАТИ</i>	154
<i>РЕФЕРАТЫ</i>	159
<i>ABSTRACTS</i>	164

Збірник наукових праць

Серія:

Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 3 (1175)

Науковий редактор д-р техн. наук, проф. А. Г. Гурин,
Технічний редактор асистент Костюков І. О.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: Харків, 61002 вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра ЕІКТ.
Тел.: тел. (0572) 7076380; e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru

Обл.-вид № 53–13.

Підп. до друку 28.09.2015 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта
видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

