

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ХПИ»

Сборник научных трудов
Тематический выпуск
«Энергетика: надежность и
энергоэффективность»

3(2011)

Издание основано Национальным техническим университетом
«Харьковский политехнический институт» в 1999 году

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

Секретарь

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.;
Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.;
Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.;
Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;
М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.;
А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.;
И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Елифанов, канд. техн. наук, проф.;
Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
О.П. Качанов, канд. техн. наук, проф.;
В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С.И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;
В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.;
О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.;
В.И. Николаенко, канд. техн. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.;
В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;
М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;
Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Государственное издание Свидетельство
Госкомитета по информационной поли-
тике Украины КВ № 5256 от 2 июля
2001 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:

А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь:

Н.В. Рудевич, канд. техн. наук.

С.В. Артюх, д-р техн. наук, проф.;
А.Х. Горелик, д-р техн. наук, проф.;
В.Е. Бондаренко, д-р техн. наук, проф.;
А.В. Безпрозванных, д-р техн. наук, доц.;
А.П. Лазуренко, канд. техн. наук, доц.;
К.В. Махотило, канд. техн. наук, доц.;
С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук, доц.;

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,
ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ».
Каф. ЭИКТ, тел. (0572) 7076380.

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПИ» – № 3. – 2011. – 196 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів, аспірантів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов, аспирантов.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ ХПИ»;

Протокол № 2 від 08.02.2011 р.

© Національний технічний університет «ХПИ», 2011

О. Є. ТВЕРИТНИКОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

**ПОЧАТКОВИЙ ЕТАП СТАНОВЛЕННЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ФАКУЛЬТЕТУ ХАРКІВСЬКОГО
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ІНСТИТУТУ (1921-1930 рр.)
(до 90-річчя створення електротехнічного факультету ХТІ)**

Детально проаналізовано етап формування системи підготовки інженерів на електротехнічному факультеті ХТІ. Проведено оцінку діяльності професора П.П. Копняєва і визначено його вклад у створення факультета.

Детально проаналізовано етап формування системи підготовки інженерів на електротехнічному факультеті ХТІ. Проведено оцінку діяльності професора П.П. Копняєва і визначено його вклад у створення факультета.

The detail research of the forming stage of the training engineers' system was conducted on the base of electrical engineering faculty of KhPI. The estimation of Professor P. Kopnyayev's activity was carried out and determined its contribution to the creation of the faculty.

Становлення електротехнічної галузі наприкінці ХІХ – початку ХХ ст., потребувало фахівців-електриків різних кваліфікацій. Виникла необхідність у спеціальній електротехнічній освіті. У статті поставлено мету шляхом узагальнення архівних документів показати особливості організації наукової роботи і навчального процесу на електротехнічному факультеті Харківського технологічного інституту (ХТІ) та визначити внесок професора П. П. Копняєва в розвиток електротехнічної науки і освіти України.

Ще на початку своєї педагогічної діяльності (1903 р.) в технологічному інституті П. П. Копняєв розробив проект організації самостійного електро-технічного факультету (ЕФ). У 1907 р., 1912 р., 1914 р. вчений здійснив нові спроби з його організації. 26.11.1920 р. на підставі рішення наради Народного комітету професійної освіти України було створено комісію під керівництвом професора П. П. Копняєва. До складу комісії входили: викладачі ХТІ В. О. Із'юров, В. М. Кияниця, інженер В. А. Радциг і представник Ради студентів Ф. А. Ступель. Метою комісії була організація самостійного електротехнічного факультету, створення нових навчальних планів. Факультет було відкрито 21.01.1921 р. Деканом призначили П. П. Копняєва [1, спр. 93].

Варто відзначити, що перший в Україні електротехнічний факультет було відкрито в Київському політехнічному інституті 1918 р. Але фактично випуск фахівців-електротехніків проводився лише за однією

спеціалізацією. Дипломні проекти з електротехніки виконували 5–6 студентів на рік [5].

До складу ЕФ входили чотири кафедри: «Електричні машини», «Електричне устаткування», «Загальна електротехніка», «Електрична тяга». На факультеті читалися курси з електроустаткування фабрик і заводів, електрифікації гірничої промисловості, електричних мереж і ліній, електричних станцій і міських трамваїв. Термін навчання становив п'ять років, виробнича практика стала обов'язковим елементом навчання, до викладання провідних дисциплін залучалися заводські інженери. Накопичений П. П. Копняєвим упродовж попередніх років досвід сприяв тому, що вже в перший рік існування ЕФ відбувся випуск висококваліфікованих спеціалістів [1, спр. 83; спр. 107].

До професорсько-викладацького складу факультету входило чотири професори: О. О. Потебня, В. М. Хрущов, С. О. Тейс та П. П. Копняєв і десять викладачів, серед яких О. Б. Брон, В. М. Кияниця, О. Я. Бергер, М. Ф. Перевозський. Основу колективу факультету становили випускники механічного факультету ХТІ, учні П. П. Копняєва.

Під керівництвом П. П. Копняєва одним з перших виконав диплом зі спеціалізації електротехніка О. О. Потебня, син відомого українського вченого-філолога О. А. Потебні. Далі він два роки стажувався за кордоном, набуваючи практичного досвіду в електротехнічних лабораторіях Європи. 1902 р. – ординарний професор кафедри електротехніки Томського технологічного інституту, де він став організатором електротехнічної лабораторії і електротехнічної спеціальності. 3 21.12. 1923 р. О. О. Потебня – професор і завідувач кафедри «Електрична тяга» в ХТІ [1, спр. 260; 3, спр. 1607].

В. М. Кияниця закінчив з відзнакою в 1912 р. механічне відділення ХТІ. Дипломний проект «Електричне освітлення» він виконував під керівництвом професора П. П. Копняєва. 1944 р. доктор технічних наук професор В. М. Кияниця став одним з організаторів кафедри «Електропривод та автоматизація промислових установок» Львівської політехніки, яку очолював упродовж 1944–1951 рр. [3, спр. 932].

Серед перших викладачів електротехнічного факультету – О. Я. Бергер, відомий фахівець у галузі електричних машин і турбогенераторобудування. 1920 р. він закінчив механічний факультет ХТІ і був зарахований до аспірантури (науковий керівник – П. П. Копняєв). У 1927 р. його запросили до Харківського електромеханічного заводу (ХЕМЗ), де вчений став ініціатором створення і керівником першого на території Радянського Союзу заводського бюро досліджень синхронних машин. У подальші роки він виконував обов'язки завідувача кафедри турбогенераторобудування ХТІ, кафедри електричних машин Московського інституту сталі і Ленінградського електротехнічного інституту [1, спр. 151].

З 1923 р. у ХТІ починає працювати викладачем теоретичної механіки О. Б. Брон, випускник електротехнічного факультету. В 1924 р. він очолив лабораторію високої напруги в інституті та ізоляційну й електроапаратну лабораторію ХЕМЗу. У 1950-ті рр. діяльність О. Б. Брона пов'язана з Ленінградським інститутом авіаційного приладобудування, де він став організатором і керівником кафедри електричних машин [1, спр. 39; 2, спр. 21].

З електротехнічним факультетом пов'язана науково-педагогічна діяльність ще одного учня професора П. П. Копняєва – М. Ф. Перевозського. Закінчивши з відзнакою 1916 р. механічне відділення ХТІ, він виконав дипломну роботу «Проект міської освітлювальної установки і силової установки постійного струму для м. Полтава» (керівник П. П. Копняєв). Це був один з перших дипломних проєктів, який мав практичне значення [3, спр. 1507].

Для підвищення рівня викладання 1923 р. Укрголовпрофос затвердив клопотання П. П. Копняєва про обрання В. М. Хрущова професором ХТІ. З перших днів роботи він бере активну участь у розгортанні робіт ЕФ. Вчений викладав курси: електричні системи, теорія електричних і магнітних явищ, надструми, перехідні явища в електричних колах, електричні лінії пересилання, регулювання напруги в районних мережах, колекторні двигуни змінного струму, електричні районні мережі. П'ять останніх дисциплін були вперше запроваджені до навчального плану ХТІ, і стали обов'язковими для всіх спеціальних електротехнічних інститутів [6].

За пропозицією П. П. Копняєва асистент О. Х. Хінкулов розпочав перспективні дослідження за новим напрямом – радіотехніка. Він ініціював створення радіолабораторії, яка пізніше стала базою для організації радіотехнічного факультету Харківського електротехнічного інституту [1, спр. 120].

Перелічені заходи сприяли поживленню наукової роботи і впродовж 1924–1929 рр. науково-дослідна кафедра електротехніки проводить низку важливих наукових робіт, зокрема професор В. М. Хрущов проводить дослідження питань створення потужних систем, проблеми стійкості паралельної роботи станцій, надструмів у цих системах, автоматизації керування захистом перенапруги тощо. В. М. Кияниця займався перевіркою і випробуванням приладів для виробництв Донбаського, Криворізького, Придніпровського регіонів. На той час це була єдина лабораторія щодо проведення заходів прикладної метрології, яка мала як навчальне, так і наукове значення [1, спр. 155].

П. П. Копняєв продовжив теоретичні дослідження в галузі машин змінного та постійного струму, зокрема дослідження питань магнітного поля в міжзалізному просторі машин. Ця проблема мала важливе значення для розвитку техніки. Знайдене професором П. П. Копняєвим вдале

рішення, зробило можливим застосування його методу в промисловості. Результатом дослідження стало отримання 1922 р. патенту на форму наконечника полюсів машин змінного і постійного струму [7].

Вчений був новатором у галузі методики викладання. Свідченням прагнень вченого щодо поліпшення якості підготовки фахівців була його ініціатива відвідування Московського вищого технічного училища, де зв'язок з ви-робництвом проводився паралельно за трьома напрямками: обов'язкова виробнича практика, залучення інженерів заводів для обслуговування лабораторій (навчальна практика) і виробничий напрямок дипломних робіт (переддипломна практика). Це давало можливість впроваджувати спеціальні дисципліни і розподіляти за спеціалізацією починаючи вже з третього або четвертого курсу, а також збільшувати кількість напрямів підготовки фахівців з електротехніки. У ХТІ на той час було п'ять спеціалізацій. Визначались вони тематикою дипломного проєкту лише на останньому курсі. Нові навчальні програми були впроваджені на ЕФ протягом 1927/1928 навч. рр. [1, спр. 191].

Як свідчить аналіз архівних документів, план прийому 1922–1924 рр. на електротехнічний факультет збільшувався. Зростання контингенту студентів відбувалось за рахунок бажаючих отримати нову спеціальність саме на електротехнічному факультеті (див. табл. 1) [1, спр. 120; спр. 145].

Таблиця 1 – Контингент електротехнічного факультету 1921–1930 рр.

Навчальні роки	Прийнято на курс	Всього навчалось	Закінчив
1921/22 рр.	71	276	30
1922/23 рр.	97	281	15
1925/26 рр.	130	344	43
1927/28 рр.	130	387	49
1929/30 рр.	130	402	56

У доповідній записці в Народний комітет промисловості П. П. Копняєв довів необхідність створення потужної експериментальної бази для проведення комплексних наукових досліджень. В Україні спеціальних дослідних лабораторій на той час не існувало. Керівник високовольтної лабораторії ХТІ О. Б. Брон провів детальне дослідження стану цієї лабораторії, обґрунтував необхідність її розширення і накреслив перспективи розвитку. Пропозиції вченого щодо будівництва нового корпусу для розширення ЕФ і наукових досліджень були підтримані [2, спр. 9].

Для організації цієї роботи впродовж 1923–1928 рр. П. П. Копняєв тричі їздив до Німеччини з метою ознайомлення з лабораторіями ВНЗ. План нового корпусу був детально ним розроблений і відданий на доробку академіку архітектури О. М. Бекетову 1924 р., але тільки через п'ять

років розпочали його реалізацію. П. П. Копняєв особисто проектував деякі лабораторії: вимірвальну, електромашинну, високовольтну, радіотехнічну тощо. За пропозицією вченого в плані нового корпусу велике місце відводилося під майстерні [7].

Висновки. Таким чином, протягом першого десятиліття існування електротехнічного факультету П. П. Копняєвим було удосконалено систему викладання електротехніки, забезпечено методичне читання нових курсів, впроваджено інноваційні методики викладання, що сприяло високому рівню підготовки інженерних і наукових кадрів. Основні напрями електротехнічної науки, започатковані вченим були підтримані його учнями і поступово трансформувалися в окремі спеціальності.

Список літератури: 1. Державний архів Харківської області: р-1682, фонд Харківського політехнічного інституту. 2. Державний архів Харківської області: р-5404, фонд Харківського електротехнічного інституту. 3. Державний архів Харківської області: 770, фонд Харківського технологічного інституту. 4. Архів НТУ «ХПІ». 5. *Белькинд Л. Д.* Высшая электротехническая школа / *Л. Д. Белькинд* // *Электричество*. – 1947. – №11. – С. 93–98. 6. Архів Президії АН УРСР, ф. 251-м: особиста справа академіка В. М. Хрушова. 7. *Каменева В. А.* Павел Петрович Копняев / *В. А. Каменева*. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 96 с.

Поступила в редколлегию 01.02.11

УДК 621.316

И.А. БАТЮК, магистр, НТУ «ХПИ»;
Ю.В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЭРМ НА ЭФФЕКТИВНОЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Исследованы факторы, влияющие на расчет величины экономического эквивалента реактивной мощности, и показана необъективность его определения, что не способствует эффективному экономическому регулированию перетоков реактивных мощностей в электрических сетях.

Досліджені чинники, що впливають на розрахунок величини економічного еквівалента реактивної потужності, і показана необ'єктивність його визначення, що не сприяє ефективному економічному регулюванню перетікань реактивних потужностей в електричних мережах.

Factors are investigational sizes of economic equivalent of reactive-power influencing on a calculation and the biased of his determination is rotined, that is not instrumental in the effective, economic adjusting of crossflows of reactive-powers in electric networks.

Основы теории оптимизации режимов электрических сетей, в том числе теория оптимизации перетоков реактивной мощности, были основаны в СССР в классической работе И. М. Марковича в 1952 году [1]. Скорость изменения потерь активной мощности и другие производные были положены в основу этих теорий и, начиная с 1960 года, принят термин «экономический эквивалент реактивной мощности» (ЭЭРМ) [2].

ЭЭРМ для определения платы за перетоки реактивной энергии был применен в Украине с введением нормативного документа «Методика расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энерго-снабжающей организацией и потребителями» [3] (далее Методика). Для его определения используется известный метод численного дифференцирования с учетом параметров и режимных характеристик электрических систем.[4]

Согласно Методике D - суммарный ЭЭРМ, который характеризует часть влияния реактивного перетока через границу раздела энергоснабжающей организации и потребителя в расчетном режиме на технико-экономические показатели в магистральной и распределительной сетях, и определяется по формуле:

$$D = D_1 + D_2, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 - первая и вторая составляющие ЭЭРМ, которые характеризуют часть влияния реактивных перетоков через границу раздела электрических сетей энергоснабжающей организации и потребителя в расчет-

ном режиме на технико-экономические показатели в магистральной и распределительной сетях, (кВт/квар), соответственно.

При отсутствии в сетях потребителей компенсирующих устройств (КУ) ЭЭРМ отображает удельные потери активной мощности в кВт на 1 квар реактивной мощности, которая передается по сети. В случае применения в сетях потребителей компенсирующих устройств, величина D отображает удельное уменьшение потерь активной мощности в сети на 1 квар установленной мощности КУ.

Коэффициент ЭЭРМ является определяющим в основной плате за потребление и генерацию реактивной энергии [3]. Основная плата, а, следовательно, и общая плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии, напрямую зависят от ЭЭРМ. В свою очередь его величина зависит от ряда факторов, в частности:

1. Расстояния от энергоисточника до потребителя (R);
2. Величины перетоков реактивной мощности (Q);
3. Величины напряжения питающей сети (U);
4. Взаимовлияния смежных потребителей на величину перетоков реактивной мощности.

Величина ЭЭРМ по формулам, приведенным в Методике, определяется как сумма ЭЭРМ в сетях без выделения доли потерь для каждого потребителя, обусловленной передачей конкретному потребителю реактивной мощности. Суммарные потери в общих ветвях питающего радиуса относятся ко всем потребителям, которые получают питание по этим ветвям [4].

Рядом специалистов предлагается с целью повышения точности и объективности расчета платы за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями значение ЭЭРМ определять не для радиусов питания, а для нагрузочных узлов [5].

В случае тривиального радиуса питания потребителя (рис. 1) потери и ЭЭРМ определяются по упрощенным формулам (2) и (3) [3]:

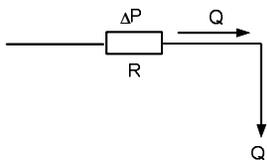


Рис. 1 – Тривиальный радиус питания

$$\Delta P = \frac{10^{-3}}{U^2} Q^2 \cdot R, \quad (2)$$

$$D = \frac{d\Delta P}{dQ} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{U^2} Q \cdot R, \quad (3)$$

где ΔP - потери активной мощности (кВт) от передачи по сети реактивной мощности Q (кВАр);

U – уровень напряжения на вводе потребителя (кВ);

R - активное сопротивление радиуса питания потребителя (Ом);

D – ЭЭРМ, кВт/кВАр.

По формуле (3) определяется скорость изменения потерь ΔP при изменении Q или коэффициент удельного изменения потерь активной мощности при изменении реактивной мощности.

Если в сети тривиального радиуса питания потребителей брать в расчеты средние потери активной мощности ΔP за расчетный период от передачи реактивной мощности Q . То величина ЭЭРМ в этом случае рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{10^{-3}}{U^2} Q \cdot R. \quad (4)$$

Величина D по формуле (3) оказывается в два раза больше в сравнении с ее значениями, которое находится по формуле (4). Соответственно и основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии тоже будет в два раза больше [4].

Вышеприведенное показывает неоднозначность определения величины D , используемой для расчета платы за перетекание реактивной электроэнергии между электропередающей организацией и ее потребителями.

Если рассмотреть однолинейную схему питания трех потребителей (рис. 2), у которых потребление реактивной мощности $Q_1 = Q_2 = Q_3$, сопротивления линий $R_1 = R_2 = R_3$, расстояния между потребителями и энергоисточником. $L_{0-1} = L_{1-2} = L_{2-3}$, и если у одного потребителя изменяется потребляемая реактивная мощность, например, $Q_1 \neq Q_2 = Q_3$ (генерации реактивной мощности нет) или изменяется сопротивление линии $R_1 \neq R_2 = R_3$ на участке L_{0-1} , то кроме изменения величины ЭЭРМ этого потребителя меняется значение ЭЭРМ у всех других потребителей.

Так, в частности, при увеличении потребления реактивной мощности (Q_1) в 2 раза величина ЭЭРМ всех потребителей данной сети увеличится примерно в 1,3 раза. При отключении одного из потребителей величина ЭЭРМ остальных потребителей уменьшится примерно в 1,6 раза.

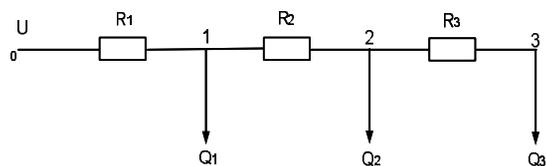


Рис. 2 – Схема питания трех потребителей

Указанные изменения параметров электроснабжения имеют реальные воплощения в виде: изменения электропотребления в результате расширения производства или полного закрытия предприятия; строительства новых линий электропередач или модернизации сетей и т.п. И при этом для смежных предприятий пересчет ЭЭРМ, по крайней мере, в течение 2-х лет может не осуществляться.

Исследования же для сетей с двухсторонним питанием показали, в частности, что при отключении одного из источников питания величина ЭЭРМ всех потребителей данной сети увеличивается в 2÷9 раз.

Также величина ЭЭРМ не учитывает характер нагрузки (индуктивная или емкостная), различие графиков потребления реактивной мощности, несимметрию по фазам.

Выводы: 1. Потребитель не в состоянии влиять на исходные данные для расчета ЭЭРМ - структуру сети, параметры и режимы работы сети, которые могут быть произвольно выбраны энергокомпанией. 2. При изменении параметров энергоснабжения смежных потребителей сети изменяется величина ЭЭРМ и потребителя, параметры энергопотребления которого не изменились. 3. Исследования показали возможность произвольной трактовки расчета ЭЭРМ энергоснабжающей (энергопередающей) организацией, что обязательно приведет к коррупции. 4. Необъективность определения (расчета) величины ЭЭРМ для потребителей не может способствовать эффективно экономическому регулированию перетоков реактивных мощностей в электрических сетях, как это задекларировано в Методике.

Список литературы: 1. Маркович И. М. Энергетические системы и их режимы / И. М. Маркович. – М. : Госэнергоиздат, 1952. – 312с. 2. Банин Д. Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз / Д. Б. Банин, О. С. Яндульський // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2004.- №1. – С. 22-33. 3. Наказ Міністерства енергетики України №37 від 14-11.97 р. // Офіційний вісник України. —1998. – №1. 4. Розальський Б. С. Про використання економічних еквівалентів реактивної потужності для визначення плати за перетоки між енергопостачальними компаніями і їх споживачами / Б.С. Розальський, О.М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2004.- №4. – С. 44-51. 5. Розальський Б. С. Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / Б.С. Розальський, О.М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2006.- №6. – С. 4-15.

Поступило в редколлегию 03.11.2010

Д.В. БОРОДИН, старш. преподаватель, ХНАГХ, Харьков

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В работе рассмотрена качество электрической энергии (КЭ) в сетях промышленных предприятий Украины. Дано сравнение двух измерителей качества электроэнергии. Проанализирован опыт эксплуатации автоматизированной системы контроля КЭ промышленного предприятия. Предоставлены рекомендации относительно использования рассмотренных приборов в составе автоматизированных систем контроля КЭ.

The paper deals with quality of electrical energy in the industrial plant power networks in Ukraine. Two measuring devices have been described and compared. The experience of the exploitation of automated PQ control system has been viewed. The recommendations on use of examined devices in automated systems of power quality control have been given.

Постановка проблемы. Низкое качество электрической энергии (КЭЭ) в сетях промышленных предприятий приводит к значительному экономическому ущербу, что обуславливает необходимость принятия мер для улучшения КЭЭ, а для этого, в свою очередь, необходимо контролировать показатели КЭЭ. В статье проанализированы особенности контроля КЭЭ на промышленных предприятиях, рассмотрены современные средства измерительной техники и автоматизированные системы контроля КЭЭ, а также приведен опыт внедрения таких систем в Украине.

КЭЭ в сетях промышленных предприятий Украины. Анализ последних исследований и публикаций. Публикации [2-4] и измерения КЭЭ на промышленных предприятиях, проведенные с участием автора, свидетельствуют о многочисленных нарушениях КЭЭ, а в многих предприятиях во время измерения оно не соответствовало [1]. Были зафиксированы нарушения синусоидальности, симметрии напряжений, провалы и перенапряжения. Часто фиксируемое на секциях шин заводских питающих подстанций повышенное напряжение к нарушениям не относится. При этом нарушения КЭЭ можно четко разделить на 2 большие категории по источнику возникновения. Несимметрия и высшие гармоники напряжения обусловлены несимметричной нагрузкой самих предприятий (в нескольких случаях – соседними предприятиями, например, железной дорогой). Провалы напряжения и перенапряжения – событиями в электросети энергоснабжающей организации, как правило – облэнерго, так же

как и отключения питания. Особняком стоят крупные металлургические предприятия, где колебания напряжения вызываются повторно-кратковременным режимом работы мощного заводского оборудования.

Особенности отечественных сетей промышленных предприятий – почти полное отсутствие средств измерения КЭЭ. На наиболее современных производствах на электрических подстанциях используются комплектные ячейки с микропроцессорным контроллером, который хотя и даёт некоторую информацию о параметрах сети, но показатели КЭЭ (в частности, провалы) не регистрирует.

1. Ущерб от низкого КЭЭ

Наибольший ущерб, связанный с низким КЭЭ, для промпредприятий однозначно связан с провалами напряжения. Особенно этот ущерб велик на наиболее современных производствах, оснащённых компьютерными системами управления. Например, на полиграфических предприятиях 1 останов из-за провала, вызвавшего сбой системы управления, может приводить к выходу из строя печатных матриц, задержке производства на срок от 3 часов до 3 суток и порче большого объёма сырья и материалов, что в итоге даёт финансовый ущерб в 10-20 тыс. грн. Оценки в публикациях для США и Западной Европы дают ещё большие цифры.

Кроме прямого ущерба от низкого КЭЭ, существует и косвенный: в условиях низкого КЭЭ счётчики электроэнергии работают с высокой погрешностью, что особенно сильно сказывается в сетях 6-10 кВ, т.к. расчётные счётчики подключены повсеместно по 2-элементной схеме, предполагающей абсолютную симметрию нагрузки.

Цель, задачи исследования. Целью исследования является выявление особенностей контроля качества электроэнергии на промышленных предприятиях, обзор современного измерительного оборудования, анализ опыта эксплуатации автоматизированных систем такого назначения в Украине и разработка рекомендаций по использованию измерителей ПКЭ в составе автоматизированных систем.

Особенности контроля КЭЭ на промышленных предприятиях. В отличие от электрических системообразующих и питающих сетей для промышленных предприятий основной объект внимания с точки зрения КЭЭ – это провалы напряжения. Для данного рода нарушений характерна непредсказуемость, обусловленная случайным характером аварий и ремонтов в питающих сетях. Поэтому измерения провалов необходимо вести непрерывно в течение длительного времени (от 2 недель и более в зависимости от предприятия) обязательно параллельно с фиксацией аварий и остановов на предприятии.

У многих энергетиков (даже главных) возникает вопрос: зачем эти измерения нужны? Дело в том, что оборудования для защиты от провалов напряжения (см. ниже) имеет как правило целый ряд моделей, отличающихся мощностью нагрузки, глубиной провала и длительностью удержа-

ния нагрузки. Для правильного выбора такого оборудования как раз необходима статистика провалов, а цена ошибки составляет десятки тысяч долларов США.

Даже после установки защитного оборудования требуется контролировать эффективность его работы и здесь преимущество приборных методов перед методом опроса руководства подразделений очевидна. Поэтому для промышленных предприятий требуется система контроля провалов напряжения, для которой функции контроля других показателей КЭЭ являются второстепенными, имеющая минимальную стоимость и не требующая высокой квалификации пользователей и обслуживающего персонала.

Некоторые образцы средств измерения КЭЭ. В Украине серийно средства измерения КЭЭ не выпускаются. Серийные приборы, полностью совместимые с [1], выпускаются в России многими предприятиями. Поскольку для контроля провалов напряжения полной совместимости с ГОСТ 13109-97 не требуется, для этой цели подходят многие западные приборы. Остановимся подробнее на наиболее «бюджетных» образцах такой техники – российском приборе «Ресурс-ПКЭ» (НПП «Энерготехника») и американском PQube (Power Standards Lab, PSL), рис. 1. Следует отметить, что распространённые в магистральных сетях приборы PM130 Plus (SATEC Ltd) хотя и измеряют некоторые ПКЭ, не предназначены для регистрации провалов.



Рис. 1 – Внешний вид приборов: а – «Ресурс-ПКЭ», б – PQube

Наиболее интересные с практической точки зрения особенности приборов – способ извлечения информации и подготовки отчётов. «Ресурс-ПКЭ» реализует общепринятый подход: измерение внутри прибора, передача через последовательный интерфейс, обработка и генерация отчётов на внешнем ПК или сервере АИИС КУЭ. Такой подход приемлем для крупных предприятий, но не очень удобен для мелких. PQube имеет на борту WEB-сервер и построитель отчётов и не нуждается в специальном ПО на внешнем ПК, что очень удобно для небольших предприятий.

Для крупных предприятий система сбора данных может базироваться на почтовых протоколах и формате XML.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики приборов

Характеристика	«Ресурс-ПКЭ»	PQube
Погрешность измерения напряжения	отн.±0.2% (0,8-1,2 Уном)	±0.05% rdg ±0.05% FS typical (10% ~ 150% of nominal).
Частота дискретизации, измерений на период основной частоты	256	256
Интерфейс пользователя	3-строчный текстовый дисплей, клавиатура	цветной графический дисплей (с поддержкой русского языка), джойстик
Цифровой интерфейс	RS-485, RS-232	Ethernet 10BaseT, съёмная флэш-память SD
Время работы от встроенного аккумулятора	-	до 10 мин
Кроме провалов, измеряет	количество показателей по 1 или 2 фидерам зависит от версии (все ПКЭ по ГОСТ 13109-97 для версии ПКЭ х.5)	ТНД, высшие гармоники, фликер, небаланс напряжений, расчёт интегральной вероятности измеренных параметров, параметры тока при наличии модуля тока
ПО мониторинга КЭЭ	ПО «Монитор» (бесплатное)	торговой WEB-сервер и почтовый клиент (POP/SMTP)
Средства построения отчётов	ПО «UF2Plus» (бесплатное), АИИС КУЭ «Ресурс»	Встроены в торговую ОС Linux
Формат отчётов	Excel	CSV, TXT, GIF, HTML, XML, PQDIF
Цена со склада производителя, USD	1188-1686 в зависимости от версии	от 2002 (Модули: основной, питания, Ethernet и флэш-памяти)

Ниже рассмотрены особенности использования этих приборов в составе автоматизированных систем непрерывного контроля КЭЭ.

Автоматизированные системы (АС) контроля КЭЭ для предприятий. Рассмотрим протоколы обмена, на которых строится опрос приборов в автоматизированной системе.

PQube поддерживает POP/SMTP протокол, пригодный для сбора данных и удалённого параметрирования прибора с помощью команд, записываемых в поле «Тема». При этом наиболее удобен для использования в АС формат данных SCV или XML. При этом потребуется использовать

специальную программу – сборщик электронной почты, которая будет извлекать данные приборов из почтовых ящиков и передавать их в базу данных системы. Определённым недостатком такой архитектуры в наших условиях является необходимость подведения Ethernet-кабелей (витая пара) к местам установки всех приборов, включение приборов в заводскую сеть TCP/IP (интранет) и обеспечение обмена с почтовым сервером, а для ответственных пользователей – доступа к приборам через WEB-интерфейс. С другой стороны, нет технических ограничений для удалённых пользователей, т.к. весь обмен базируется на стеке TCP/IP.

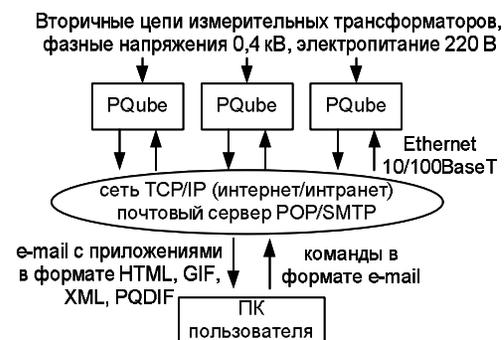


Рис. 2 – Простейшая схема обмена данными в АС на базе PQube

Внедрение подобной системы в типографии «Новый Мир» (г. Донецк) позволило решить задачи как локального (внутри предприятия) контроля ПКЭ, так и дистанционного управления и анализа данных в г. Харьков. Дистанционно было проведено обновление прошивки PQube и модификация файла настроек. Работа системы позволила достичь главной цели - получить статистику провалов и выбрать оборудование для защиты наиболее уязвимого оборудования.

Таблица 2 – Статистика провалов напряжения, полученная с помощью PQube. Цветом выделены наиболее глубокие провалы

Дата	Время (GMT)	Тип	Глубина	Длительность, с
11.05.2010	23:30:50.820	ПН*	0.11%	84.731
11.05.2010	23:30:50.872	ОН**	N/A	84.642
12.05.2010	11:19:21.780	ПН	15.84%	1.057

Продолжение таблицы 2

17.05.2010	18:49:20.626	ПН	41.44%	0.672
17.05.2010	18:49:35.869	ПН	36.20%	0.659
21.05.2010	14:14:58.547	ПН	0.22%	9.259
21.05.2010	14:14:58.791	ОН	N/A	8.976
21.05.2010	20:51:17.769	ПН	41.70%	0.38
21.05.2010	23:03:17.549	ПН	52.04%	0.675
27.05.2010	16:51:04.856	ПН	0.10%	13.307
27.05.2010	16:51:05.053	ОН	N/A	12.972
28.05.2010	14:16:33.424	ПН	70.56%	0.18
28.05.2010	14:27:53.471	ПН	71.10%	0.169
29.05.2010	18:57:41.807	ПН	33.86%	0.646
01.06.2010	11:35:04.902	ПН	55.54%	0.929
04.06.2010	09:29:11.949	ПН	28.98%	0.383
04.06.2010	09:32:50.775	ПН	19.91%	0.068
10.06.2010	01:49:57.750	ПН	N/A	197620
10.06.2010	01:49:58.278	ОН	N/A	197619
12.06.2010	09:05:18.537	ПН	N/A	7037
12.06.2010	09:05:18.574	ОН	N/A	7037
15.06.2010	13:42:18.212	ПН	89.18%	0.05
15.06.2010	23:42:35.402	ПН	42.99%	0.4
16.06.2010	07:43:40.883	ПН	19.25%	0.369
17.06.2010	07:59:05.603	ПН	N/A	276
17.06.2010	07:59:05.950	ОН	N/A	276
20.06.2010	00:06:37.561	ПН	87.48%	0.172
22.06.2010	03:02:14.159	ПН	32.12%	0.642
23.06.2010	09:05:06.194	ПН	35.95%	0.322
29.06.2010	16:08:08.647	ПН	0.43%	9.338
29.06.2010	16:08:08.884	ОН	N/A	9.011
30.06.2010	05:53:15.492	ПН	71.00%	0.844
02.07.2010	10:51:17.184	ПН	88.61%	0.11
03.07.2010	14:04:23.242	ПН	0.48%	9.426
03.07.2010	14:04:23.499	ОН	N/A	8.973
06.07.2010	13:48:38.620	ПН	26.02%	0.959
11.07.2010	14:44:40.557	ПН	67.64%	0.121
12.07.2010	08:37:11.089	ПН	45.65%	1.115
14.07.2010	02:58:35.440	ПН	85.61%	0.012
14.07.2010	02:58:36.552	ПН	89.24%	0.01

Продолжение таблицы 2

14.07.2010	02:58:37.832	ПН	82.75%	0.02
14.07.2010	02:58:38.840	ПН	83.43%	0.012
14.07.2010	02:58:38.902	ПН	79.90%	0.029
14.07.2010	02:58:38.952	ПН	70.78%	0.04
14.07.2010	02:58:39.002	ПН	38.03%	0.058
14.07.2010	02:58:39.082	ПН	32.13%	0.098
16.07.2010	13:43:34.419	ПН	N/A	3839
16.07.2010	13:43:34.475	ОН	N/A	3839
18.07.2010	12:46:49.168	ПН	66.70%	0.9
20.07.2010	10:00:27.300	ПН	90.03%	0.032
21.07.2010	09:30:20.056	ПН	N/A	640
21.07.2010	09:30:20.091	ОН	N/A	640
23.07.2010	14:55:29.269	ПН	61.82%	0.36
23.07.2010	14:57:35.493	ПН	66.77%	0.24
23.07.2010	14:57:36.493	ПН	64.71%	0.129
24.07.2010	11:40:19.283	ПН	18.38%	0.547
29.07.2010	15:15:22.622	ПН	89.66%	0.18
03.08.2010	13:13:06.398	ПН	84.12%	0.112
03.08.2010	13:19:06.376	ПН	83.06%	0.122
03.08.2010	13:21:56.465	ПН	82.73%	0.131
03.08.2010	13:22:03.766	ПН	82.51%	0.133
03.08.2010	19:54:59.519	ПН	85.30%	0.101
05.08.2010	15:27:02.107	ПН	15.04%	0.082
09.08.2010	15:36:40.963	ПН	82.83%	0.64

*ПН – провал напряжения; **ОН – отключение напряжения

Статистика показывает, что за 3 месяца было зафиксировано всего 62 провала напряжения, из них 29 провалов глубиной более 20%, средней длительностью 0,45 с, максимальной 1,115 с, в т.ч. 19 провалов глубиной более 40%. Видно, что многие зафиксированные провалы находятся вне зон нормальной работы оборудования диаграмм СВЕМА, ПТС, ANSI [5, 10], что подтверждается статистикой сбоев. Для повышения устойчивости технологических линий к провалам напряжения требуется специальное оборудование.

Удобство работы (особенно дистанционной) с прибором PQube оценено как высокое.

Для сравнения в табл.3-4 приведены результаты измерения провалов напряжения прибором «Ресурс» в ПАО «Укрэнергопроект» 13-14.09.2010.

Таблица 3 – Итоги измерения провалов напряжения

Напряжение	Ua	Uв	Uс
Кол-во	10	0	0
Суммарная продолжительность, с	1.79	0.00	0.00
Максимальная глубина, %	97.80	0.00	0.00

Таблица 4 – Провалы фазы Ua

№№	Дата	Провалы		
		Время	$\delta U_{пр}$, %	$\Delta t_{пр}$, с
1	14.09.2010	10:48:20	53.100	0.050
2		10:48:21	96.900	0.310
3		10:48:21	14.500	0.030
4		10:48:21	67.900	0.020
5		10:48:21	63.400	0.030
6		10:48:22	96.900	0.560
7		10:48:23	64.300	0.030
8		10:48:23	97.800	0.720
9		10:48:24	35.100	0.020
10		10:48:25	40.800	0.020

Ресурс-ПКЭ поддерживает современный телемеханический маршрутизируемый протокол МЭК-870-5-101, обмен ведётся через порт RS485, архитектура системы построена по образцу систем учёта электроэнергии (рис.3), позволяет решать все задачи по измерению, хранению и анализу показателей КЭЭ, но при этом требует высокой квалификации персонала.



Рис. 3. – Пример структурной схемы АИИС КУЭ „Ресурс” [9]

Выводы. Устройство PQube неплохо зарекомендовало себя в наших условиях. Его наиболее целесообразно использовать для построения небольших автоматизированных систем контроля КЭЭ, решающих прежде

всего задачи непрерывного контроля отключений, провалов напряжения и перенапряжений. При этом требования к квалификации персонала сравнительно невысоки.

Устройство «Ресурс-ПКЭ» целесообразно использовать для построения систем, решающих задачи контроля КЭЭ в более полном объёме, при этом целесообразно использовать специализированные клиент-серверные системы сбора, обработки, хранения и анализа показателей КЭЭ, таких как [9]. Возможно применение для этой цели и других измерителей КЭЭ, сертифицированных на соответствие [1].

Для решения задач контроля КЭЭ, определения ответственности за ухудшение КЭЭ [11] и выбора мер по улучшению КЭЭ необходимы устройства, измеряющие параметры как напряжения, так и тока. Целесообразно совмещать функции контроля КЭЭ и учёта электроэнергии. Один из наиболее современных и недорогих устройств такого класса – «Ресурс-Е4», позволяющий также решать задачи телемеханики для систем диспетчерского управления.

Список литературы: 1. ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”. 2. Гриб О.Г. Анализ качества электрической энергии в сетях общего пользования 0,4 кВ / О.Г. Гриб, А.В. Сапрыка, Д.В. Бородин // Светлотехника та електроенергетика. – 2007. – №1 (9). – С. 53. 3. Бородин Д.В. Проблемы качества электроэнергии в центрах питания сетей 110 кВ / Д.В. Бородин // Программа и тезисы докл. XXXIV науч.-тех. конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. Часть 2. Харьков, ХНАГХ, 2008. 4. Гриб О.Г. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: уч. пособие/ О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный, О.Н. Довгалюк, Д.В. Бородин, И.Р. Левин, Ю.С. Громадский, В.И. Васильченко; под редакцией О.Г. Гриба. – 1-е изд. – Х. : ХНАГХ, 2005. 5. Д. Чепмэн. Провалы напряжения: введение. Перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди «Прикладное руководство по качеству электроэнергии»; пер. с англ. Е. В. Мельниковой. Официальный сайт НПЦ «АВОК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2957&version=print 6. Измерители показателей качества электрической энергии «РЕСУРС-UF2». Руководство по эксплуатации ЭГТХ.422252.009 РЭ. ООО «НПП «Энерготехника», 2005. 7. PQube - AC Power Monitor. – Официальный сайт компании PSL [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.powerstandards.com>. 8. PQube@Installation & User's Manual. Firmware Rev 1.3 Power Standards Lab, 2010. 9. Система непрерывного мониторинга качества электрической энергии "Ресурс". © 2009-2010. – Официальный сайт НПЦ «Энерготехника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.entp.ru/services/accounting_system/1. 10. ITI (СВЕМА) CURVE APPLICATION NOTE – Официальный сайт Information Technology Industry Council [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.itic.org/clientuploads/Oct2000Curve.pdf>. 11. Гриб О.Г. Практический опыт определения степени влияния мощных промышленных электроприёмников на качество электроэнергии в питающих сетях / О.Г. Гриб, Д.В. Бородин // Программа и тезисы докл. XXXV науч.-тех. конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. Часть 2. – Х. : ХНАГХ, 2010. – С.85

Поступило в редколлегию 18.12.2010

А.М. БОЙКО, студент, НТУ «ХП»;

А.В. БЕЗПРОЗВАННИХ, д-р.техн.наук, проф., НТУ «ХП»

ОБҐРУНТУВАННЯ ТОВЩИНИ ІЗОЛЯЦІЇ ВИТИХ ЕКРАНОВАНИХ ПАР СТРУКТУРОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ СИСТЕМ

Выполнен анализ влияния экрана на параметры передачи экранированных витых пар 5е и 7 категории. На основе числовых расчетов электрического поля экранированного витого пара категории 7 обґрунтована товщина трехслойной изоляции, что обеспечивает параметры передачи в пределах нормируемых значений и соответствующую гибкость кабеля.

Виконано аналіз впливу екрану на параметри передачі екранованих витих пар 5е та 7 категорії. На основі числових розрахунків електричного поля екранованої виті пари категорії 7 обґрунтована товщина трьохшарової ізоляції, що забезпечує параметри передачі в межах нормованих значень та відповідну гнучкість кабелю.

The analysis of influence of the screen on parameters of transfer of the shielded twisted pairs a category 5e and 7-th is executed. On the basis of numerical calculations of an electric field of the shielded twisted pair a category 7 the thickness of three-layer isolation providing parameters of transfer in the normalized range and corresponding flexibility is proved.

Вступ. Стрімкий ріст телекомунікаційних цифрових технологій спонукав виробників кабельної продукції освоїти нові види кабелів та матеріалів для їх виробництва. Суттєвих змін зазнали традиційні симетричні кабелі. В поняття вита пара вкладається спроможність кабелю забезпечити передачу цифрових сигналів з відповідною швидкістю в залежності від категорії цієї пари.

Поява структурованих кабельних систем стала поворотним пунктом у розвитку мережевої галузі. Рішення на основі виті пари застосовуються в основному в горизонтальній підсистемі. Горизонтальна підсистема будується на витих парах категорій 5 та 5е, 6 та 7. При цьому кабелі 5 – 6 категорій можуть бути як неекранованими, так і екранованими. Ізоляція в таких кабелях – звичайний поліетилен. Кабелі категорії 7 виготовляються тільки в екранованому виді: кожна пара в індивідуальному екрані та загальний екран для всіх чотирьох пар (позначається як S/STP - Shielded Twisted Pair). Кабелі мають кращі характеристики по захисту від зовнішніх електромагнітних перешкод та електромагнітного випромінювання. Широка смуга робочих частот кабелів категорії 7 – до 600 МГц – зумовлює використання ізоляції з меншими втратами на основі спіненої ізоляції.

Наявність додаткових металевих екранів в конструкції виті пари обумовлює зростання електричного опору провідників за рахунок ефекту близькості та електричної робочої ємності, і, взагалі, коефіцієнту згасання.

Ціллю роботи є аналіз впливу робочої ємності витих екранованих пар на коефіцієнт згасання та обґрунтування товщини ізоляції на основі розрахунків електричного поля.

Кабелі на основі витих пар з мідними провідниками широко застосовуються в структурованих кабельних системах для передачі електричних сигналів. Кабель містить одну або декілька скручених з різними кроками витих пар провідників і за чинною класифікацією відноситься до симетричних. Окрім витих пар він може мати декілька додаткових захисних, екрануючих і технологічних елементів, які утворюють сердечник. Кожен провідник забезпечується ізоляцією з суцільного або спіненого діелектрика. Використання останнього трохи знижує питому масу кабелю й значно поліпшує його частотні властивості, однак піднімає собівартість готового виробу. На сердечник накладається захисна оболонка у вигляді шланга, що більшою чи меншою мірою оберігає виті пари від зовнішніх дій і зберігає структуру сердечника під час прокладання та експлуатації.

Однією з основних характеристик витих пар є коефіцієнт згасання. Для високочастотного діапазону можна записати:

$$\begin{aligned} \alpha &= 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \\ &8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{\omega C \operatorname{tg} \delta}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \quad , \quad (1) \\ &= 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{\omega \operatorname{tg} \delta}{2} \sqrt{CL} \right) = \\ &8,69 \sqrt{C} \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{1}{L}} + \frac{\omega \operatorname{tg} \delta}{2} \sqrt{L} \right) , \quad \text{дБ} / \text{м} \end{aligned}$$

де R – активний опір виті пари (сума опорів прямого та зворотного провідників (шлейфу), Ом/м; C – робоча ємність пари, Ф/м; L – загальна індуктивність пари (в високочастотному діапазоні визначається між провідниковою), Гн/м; G – активна провідність ізоляції, См/м, $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат ізоляції.

Згасання зростає зі збільшенням частоти. Воно має дві складові: втрати в металі та втрати в діелектрику (ізоляції). На частотах до декількох десятків МГц превалює перша складова, обумовлена активним опором (в основному втрати на поверхневий ефект та ефект близькості, втрати в металевому екрані). Зменшити її можна тільки за рахунок більшого діаметру провідників та більшої відстані між ними. Втрати в діелектрику істотно проявляються на більш високих частотах і можуть бути дещо знижені за рахунок зменшення робочої ємності (збільшення відстані між провідниками або зменшення їхнього діаметра) або зменшення $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції (застосування діелектрика із кращими високочастотними властивостями).

Враховуючи, що робоча ємність симетричної пари визначається як:

$$C = \chi \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{екв}}}{\ln \left(\frac{a-r}{r} \right)}, \quad \Phi / \text{м} \quad (2)$$

де χ – коефіцієнт скрутки, ε_0 – електрична стала, $\varepsilon_{\text{екв}}$ – еквівалентна діелектрична проникненість матеріалу ізоляції; a – відстань між прямим та зворотним провідниками, r – радіус струмопровідної жили.

Формула (1) може бути записана у вигляді:

$$\alpha = 8.69 \text{К} \sqrt{C} \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{1}{L} + \frac{\omega \text{tg} \delta}{2} \sqrt{L}} \right) \\ = 8.69 \sqrt{L} \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{екв}}} \left[\frac{R}{2} \frac{\pi}{\ln \left(\frac{r+2\Delta_{\text{із}}}{r} \right)} + \frac{\omega \mu_0 \text{tg} \delta}{2} \right], \quad \text{дБ} / \text{м} \quad (3)$$

де $\Delta_{\text{із}}$ – товщина ізоляції.

Розрахунки показують, що варіації товщини ізоляції, тобто робочої ємності, в більшій мірі впливають на коефіцієнт згасання в порівнянні з активним опором при тому самому діаметрі струмопровідної жили. На рис. 1 наведено залежності активного опору (крива 1) неекранованої виті пари категорії 5е та його складових (2 – складова, яка враховує збільшення опору за рахунок скін-ефекту при рості частоти; 3 – складова, яка враховує збільшення активного опору за рахунок ефекту близькості при рості частоти) в залежності від товщини ізоляції, яка визначає відстань між прямим та зворотним провідниками при діаметрі струмопровідних жил 0,511 мм: I – товщина ізоляції дорівнює радіусу струмопровідної жили; II – товщина ізоляції складає 80 % від радіусу струмопровідної жили; III – товщина ізоляції складає 120 % від радіусу струмопровідної жили

Видно, що зміна товщини ізоляції впливає на складову опору, що обумовлена ефектом близькості. При цьому загальний опір практично не змінюється в розглянутому діапазоні товщини суцільної ізоляції. Складова, обумовлена ефектом близькості, майже на порядок менше опору за рахунок поверхневого ефекту.

Товщина ізоляції в значній мірі впливає на робочу ємність виті пари, коефіцієнт згасання та хвильовий опір (рис. 2 - 3 відповідно).

При товщині ізоляції, рівній радіусу струмопровідної жили (крива I), робоча ємність становить 54 пФ/м; при товщині ізоляції, рівній 120 % від струмопровідної жили (крива III), робоча ємність становить 48 пФ/м, при товщині ізоляції, рівній 80 % від струмопровідної жили (крива II), робоча ємність становить 64 пФ/м при тому самому матеріалі ізоляції (діелектричної проникності). Аналіз розрахунків показує, що збільшення товщини ізоляції (крива III), призводить до зменшення коефіцієнту згасання та хвильового опору. Причому при товщині ізоляції, рівній 120 % від радіусу струмопровідної жили, хвильовий опір виходить за нижню границю

значень. Таким чином, діапазон робочих ємностей кабелів на основі витих пар становить 48 пФ/м - 56 пФ/м для забезпечення параметрів передачі: коефіцієнту згасання та хвильового опору в межах нормованих значень. **Відповідна товщина ізоляції дорівнює або на 20 % більше діаметру струмопровідної жили.**

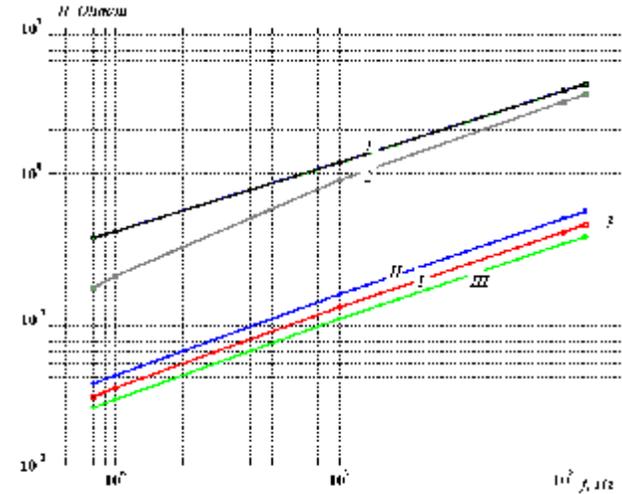


Рис. 1 – Вплив товщини суцільної ізоляції на активний опір виті пари категорії 5е

Вплив екрану на параметри передачі витих екранованих пар

Кабелі категорії 5е, спектр робочих частот яких досягає 125 МГц, виготовляються неекранованими та екранованими. При цьому екран – зовнішній для всіх чотирьох пар (так звані FTP виті пари – з екраном у вигляді фольги) [1 - 7].

Аналіз літературних джерел показує [16, 17], по-перше, що для екранованих кабелів FTP відзначаються більші значення активних опорів провідників (рисунок 1) порівняно з неекранованими при тих же діаметрах провідників ($2r = 0,51$ мм) і позитивних допусках на діаметри ($\Delta = 0,005$ мм). По-друге, робочі ємності екранованих кабелів з поліетиленовою ізоляцією мають більші значення (рис.2) і знаходяться, практично, на верхній границі нормованих значень ємності $C_{\text{нор}} \leq 56$ пФ/м (рис. 4). Тому для зменшення ємності екранованих кабелів і наближення значень до ємності неекранованих кабелів необхідно збільшити товщину ізоляції.

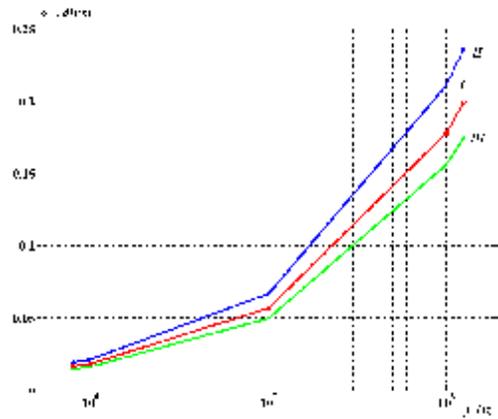


Рис. 2 – Вплив товщини суцільної ізоляції на коефіцієнт згасання виті пари категорії 5e

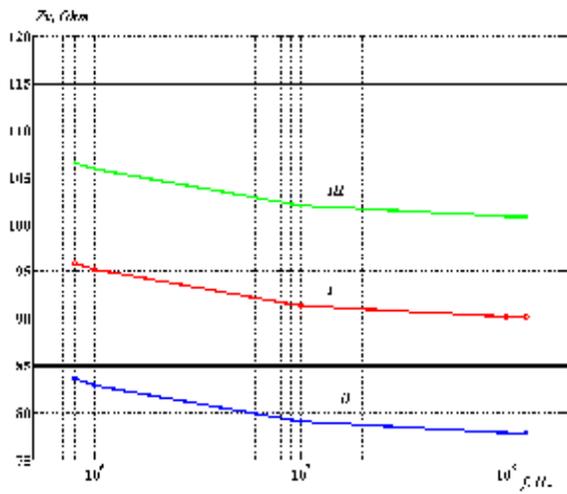
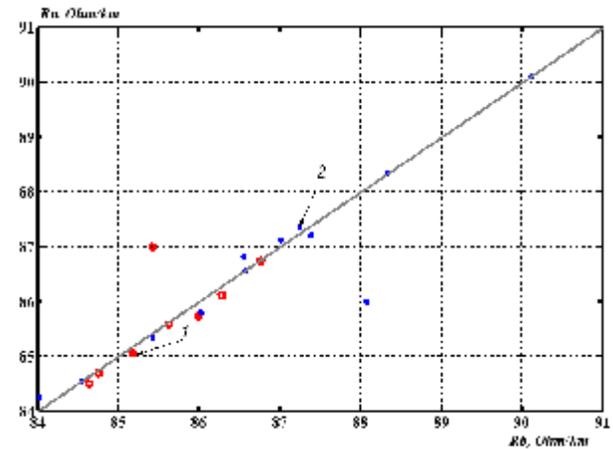


Рис. 3 – Вплив товщини суцільної ізоляції на хвильовий опір виті пари категорії 5e



1 – неекраниваних; 2 – екраниваних
Рис. 4 – Кореляційна залежність між активними опорами прямого та зворотного провідників витих пар категорії 5e

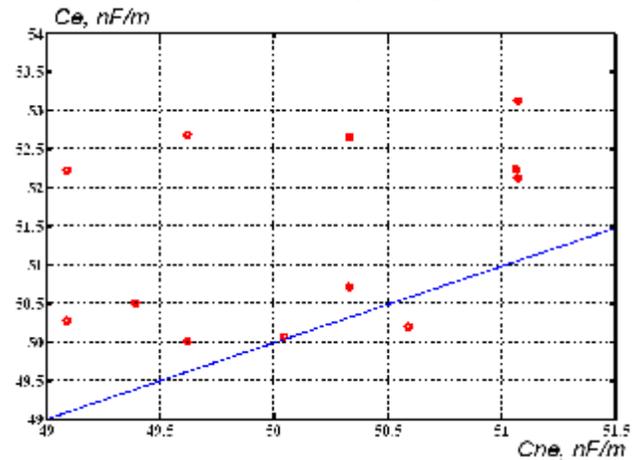


Рис. 5 – Кореляційна залежність між електричними робочими ємностями неекраниваних (вісь абсцис) та екраниваних (вісь ординат) витих пар категорії 5e

Діаметр ізольованих жил екраниваних витих пар слід збільшувати в середньому на 20 % в порівнянні з неекраниваними. Для кабелів категорії 5e цей засіб здійснений, тому що це несуттєво впливає на механічні показники мережевих кабелів горизонтального прокладання, одним з головних показників є висока гнучкість при прокладці.

В протилежному випадку більші значення робочої ємності екранованих пар призведуть до підвищених значень коефіцієнту згасання

Аналіз формули (1) показує: збільшення ємності на 20 % призводить до зростання втрат енергії на 9,5 % в діапазоні високих робочих частот за рахунок втрат в ізоляції. В результаті дальність передачі сигналів зменшується на $(100 - 100/1.095) = 100 - 91 \approx 10$ метрів. Це суттєво при загальній довжині 100 метрів кабельної лінії горизонтальної підсистеми СКС.

Виявляється, що при збільшенні товщини ізоляції (робоча ємність екранованої пари має ті ж самі значення, що і неекранованої) коефіцієнт згасання екранованих кабелів стає навіть меншим, ніж у неекранованих на верхній границі робочих частот (рис.6). Це обумовлено впливом магнітного поля екрану. В області низьких частот (до 4 МГц) загальний екран не впливає на індуктивність пари. При більш високих частотах (понад 4 МГц)

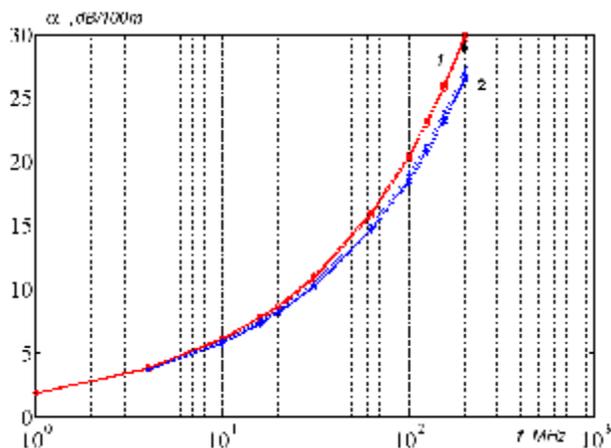


Рис.6 – Залежність коефіцієнта згасання неекранованого (1) та екранованого (2) мережевого кабелю категорії 5

екран починає працювати як короткозамкнений виток. Індуктивність збільшується і втрати в металевих частинах (перша складова в формулі (1) відповідно зменшуються. Втрати в металевих частинах є визначальними. Втрати в діелектрику становлять всього від 2% до 20 % від загальних втрат на частоті 1 МГц та на верхній робочій частоті 125 МГц кабелю категорії 5e відповідно.

Специфікація на кабель 7-ї категорії затверджена міжнародним стандартом ISO 11801: швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с, частота сигналу, що пропускається, до 600 - 700 МГц. Кабелі цієї категорії мають загальний екран і екрани навколо кожної пари. Збільшення спектру час-

тот, який передається по кабелю, пов'язано зі збільшенням діаметру струмопровідної жили (з 0,511 мм до 0,64 мм відповідно). Вибір загальної конструкції ізоляції потребує врахування електричних та економічних факторів. Механічні фактори, які є суттєвими для кабелів на основі витих пар через багаторазові згинання кабелю в процесі монтажу, враховані на основі досвіду, відображеного в рекомендованій товщині ізоляції. Останні відображають той факт, що чим більший діаметр жили, тим більшою повинна бути товщина ізоляції.

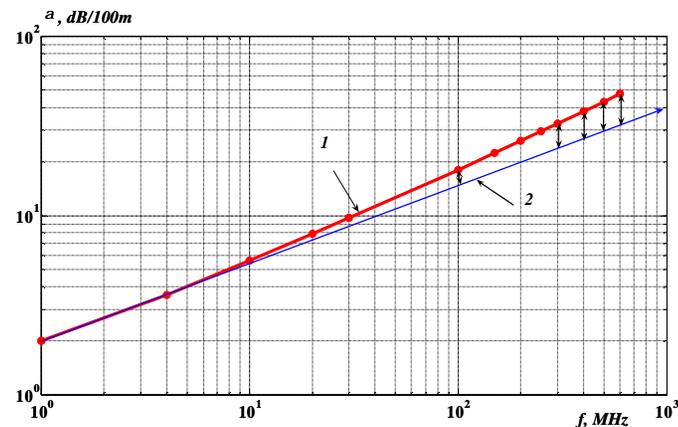


Рис.7 – Залежність коефіцієнта згасання екранованого мережевого кабелю категорії 7 в подвійному логарифмічному масштабі:
1 – загальні втрати, 2 – втрати в металевих частинах

На частоті 100 МГц втрати в діелектрику складають 20 %, на частоті 200 МГц – 30%, на частоті 500 МГц – 43 %, на частоті 600 МГц – майже 50 %. Таким чином, від електричних властивостей ізоляції кабелів залежить загальний коефіцієнт згасання.

Ці властивості визначаються діелектричною проникністю ϵ , яка характеризує ступінь поляризації зарядів в ізоляції при дії на неї електричного поля; та тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ ізоляції.

Зменшення втрат в ізоляції можливо за рахунок застосування спієнової фізичним методом поліетиленовою ізоляції, яка в порівнянні з суцільною має менше значення діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат.

Електричне поле витой пари

Екранована вита пара містить три електроди - дві жили і екран: 1, 2, е - електроди "жила 1", "жила 2", "екран" відповідно. Всередині екранованої вити пари є два типи проміжків - "жила-жила" та "жила - екран", що містять як твердий діелектрик, так і повітряні прошарки

у силу нещільного прилягання екрана до ізольованих жил і жил одна до одної. Таким чином, між електродами утворюються три часткові ємності: C_{1-e} (d) – ємність першої жили на екран; C_{2-e} (d) – ємність другої жили на екран; C_{12} (d) – взаємна ємність між жилами.

Часткові ємності на екрані включені послідовно і в ідеальному випадку дорівнюють одна одній. Взаємна ємність між жилами C_{12} з частковими ємностями на екран C_{1-e} , C_{2-e} включена паралельно. Таким чином, робоча ємність екранованої вити пари визначається за формулою послідовно-паралельного з'єднання:

$$C = C_{12} + \frac{C_{1-e} \cdot C_{2-e}}{C_{1-e} + C_{2-e}} = C_{12} + \frac{1}{2} C_{1-e} \quad (4)$$

Часткові ємності екранованої пари знаходяться на основі розрахунку електричного поля.

Розрахунки та аналіз електричного поля екранованої вити пари спираються на ряд допущень.

1. Нехтування гвинтовою поверхнею екранованої вити пари. Як було відзначено вище, крок скрутки і радіус вигину значно перевищують поперечні розміри екранованої вити пари. Тому поле екранованої вити пари можна вважати однаковим у кожному поперечному перерізі, тобто плоско паралельним.

2. Поверхні жил і ізоляції жил прийняті круговими циліндричними. Геометрія екрана: кругова циліндрична форма.

3. Довжина ділянки з поверхневим зарядом повинна бути менше відстані до ділянки спостереження поля. Для забезпечення цієї умови вводяться невеликі повітряні зазори між ізольованими жилами (товщиною близько 10 мкм). Вони практично не впливають на інтегральні характеристики - ємності проміжків, але дозволяють уникнути збігу вузлів, через які може різко зростати локальна похибка обчислень.

Розрахунок виконаємо методом вторинних зарядів, тобто від розрахунків поля у первинній задачі перейдемо до розрахунку поля у вакуумі [18, 19]. Розрахункова модель містить поверхні, що збігаються із границями розділу середовищ вихідного завдання. На них варто розташувати заряди (так звані, вторинні заряди) і підібрати розрахункову густину s , Кл/м² так, щоб виконувалися дві умови:

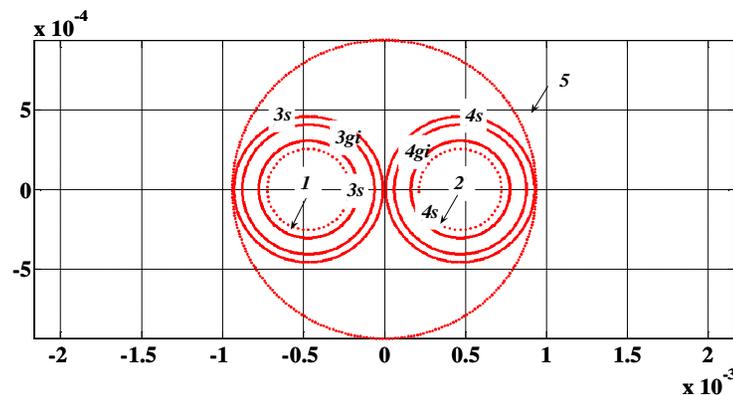


Рис. 8 – Модель із круговими границями розділу середовищ для розрахунку електричного поля екранованої вити пари з трьохшаровою ізоляцією : 1,2 - жили; 3 - екран; 4,5 - поверхні ізоляції жил

а) на поверхнях електродів, повинні досягатися задані потенціали U_i (інтегральне рівняння Фредгольма першого роду):

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int \sigma_j \cdot \ln \left(\frac{r_{0j}}{r_{ij}} \right) \cdot dl_j = U_i, \quad (5)$$

де i – номер вузла, у якому шукаються характеристики поля; j - номер вузла, у якому розташований заряд; r_{ij} – відстань між ділянками i та j ; r_{0j} – відстань від ділянки j до точки O , потенціал якої можна прийняти рівним нулю; σ_j – густина вторинного заряду в точці j ; dl_j – довжина нескінченно малої ділянки із центром у точці j ; ϵ_0 - електрична постійна

($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

б) на поверхнях границь розділу діелектричних середовищ повинні виконуватися умови рівності нормальних складових вектора електричного зміщення:

$$\epsilon_2 \cdot \left(E_n - \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \right) = \epsilon_1 \cdot \left(E_n + \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \right), \quad (6)$$

де E_n – нормальна складова напруженості поля в точці i , створена всіма зарядами, окрім того, що розташований у цій точці; $\sigma_i / (2\epsilon_0)$ – нормальна складова напруженості поля в точці i , створена саме зарядом, розташованим у цій точці.

Розрахунок поля зводиться до рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), перші N_e рядків якої впливають із інтегрального рівняння Фредгольма першого роду (ІРФ I) для потенціалів на поверхнях

електродів, а наступні N_d рядків - з ІУФ другого роду (ІУФ II) для стрибків нормальної складової напруженості поля на границях розділу діелектричних середовищ.

Знайдені напруженості поля та густина зарядів при заданому потенціалі дозволяють знайти часткові ємності: взаємну ємність між жилами C_{12} та ємності на екран C_{1-e} , C_{2-e} , загальну робочу ємність екранованої пари за (4).

Представимо результати розрахунків в виді так званих розгортки напруженості - залежності напруженості в даному вузлі від криволінійної координати до вузла, який прийнято за початок відліку.

На рис.9 наведено розгортки напруженості електричного поля екранованої виті пари категорії 7 в разі суцільної поліетиленової ізоляції при товщині, яка дорівнює радіусу струмопровідної жили.

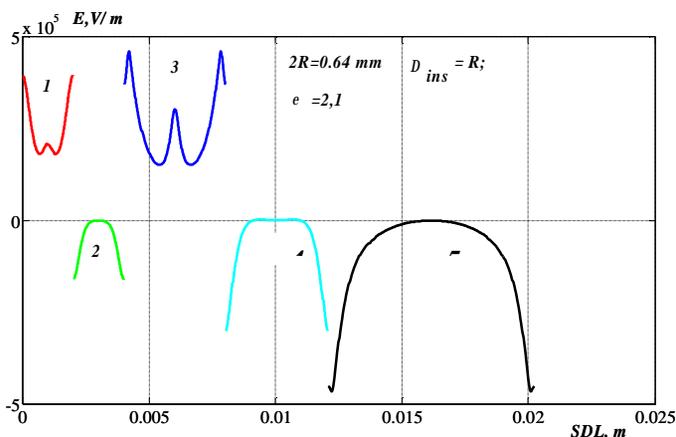


Рис. 9 – Розгортка напруженості електричного поля по поверхням струмопровідних жил (1, 2), ізоляції (3,4) та екрану (5) екранованої виті пари

Для зменшення робочої ємності в разі суцільної ізоляції необхідно збільшувати товщину ізоляції. Але це призводить до збільшення масогабаритних розмірів, зменшення гнучкості кабелю. Найбільш придатним способом є застосування трьохшарової поліетиленової ізоляції: перший шар, який наноситься на струмопровідну жилу, - суцільна ізоляція (3s, 4s); другий – спінена ізоляція (3gi, 4gi); третій (для захисту від вологи) – суцільна ізоляція (3s, 4s).

На рис.10 наведено розгортки напруженості електричного поля екранованої виті пари категорії 7 в разі трьохшарової ізоляції при загальній товщині ізоляції, яка становить 80 % від товщини струмопровідної жили. При цьому товщини шарів дорівнюють: 20%, 40 % та 20 % від діаметру струмопровідної жили . Розрахунки виконано при значеннях діелектричної проникності шарів 2,1; 1,6 та 2,1 відповідно [13, 14]. Для спіненої ізоляції значення діелектричної проникності відповідає 60 % від значення діелектричної проникності спіненої азотом суцільної поліетиленової ізоляції.

Робоча ємність за результатами розрахунку дорівнює $C = 49,1$ пФ/м. Нижня границя значень робочої ємності витих пар становить 48 пФ/м. Таким чином, в порівнянні з суцільною ізоляцією робоча ємність зменшується на 32 %, а коефіцієнт згасання – на 15% відповідно. При цьому зменшуються також масогабаритні розміри кабелю.

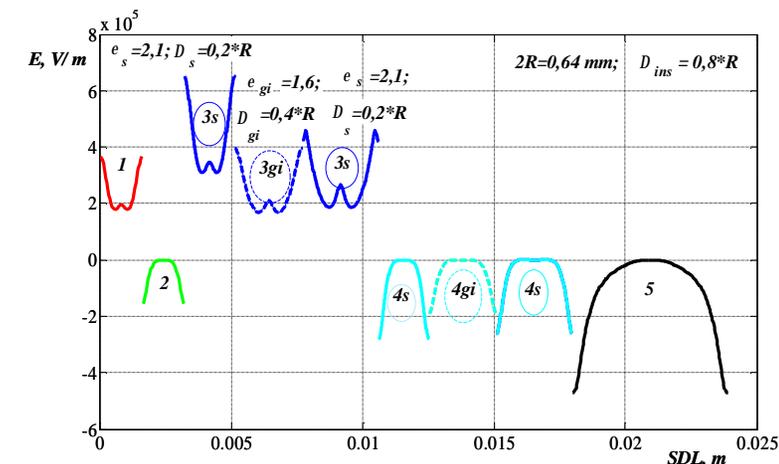


Рис. 10 – Розгортка напруженості електричного поля по поверхням струмопровідних жил (1, 2), тришарової ізоляції (3,4): першого суцільного шару (3s, 4s), спіненої ізоляції (3gi, 4gi), третього суцільного шару (3s, 4s) та екрану (5) екранованої виті пари категорії 7

В таблиці 1 наведені результати розрахунків робочої ємності екранованої виті пари. Виділені значення робочих ємностей та відповідні товщини ізоляції: в перших двох стовпчиках – значення ємностей робочих пар, які перевищують верхню границю, жирним шрифтом – в границях допустимих значень, останні - значення ємностей робочих пар, які знаходяться за межами нижньої границі.

Таблиця 1 – Вплив товщини прошарків тришарової поліетиленової ізоляції на робочу ємність екранованої вити пари категорії 7

Робоча ємність вити екранованої пари при варіаціях товщини ізоляції С, пФ/м	64,8	59,3	55	43,5	45,3	47,1	51,6	49,1	44,6
Загальна товщина тришарової поліетиленової ізоляції Δ_{ins} (в % від радіусу струмопровідної жили) при:	100	120	140	100	100	100	100	80	80
- товщині першого шару - суцільної поліетиленової ізоляції Δ_s	-	-		25	30	40	45	20	10
- товщині другого шару - спіненої поліетиленової ізоляції Δ_{pi}	-	-		50	40	20	10	40	60
- товщині третього шару - суцільної поліетиленової ізоляції Δ_s	-	-		25	30	40	45	20	10

Вплив товщини шару спіненої поліетиленової ізоляції на робочу ємність при сталій товщині шарів ізоляції суцільного поліетилену, яка дорівнює 10 % від діаметру струмопровідної жили, показано на рис. 11.

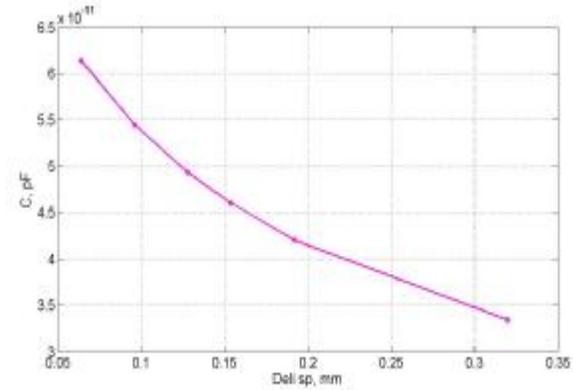


Рис. 11 – Вплив товщини спіненого шару поліетиленової ізоляції на робочу ємність вити екранованої пари категорії 7

Висновки.

Для екранованих витих пар категорії 5 встановлено:

1. Опори провідників екранованих мережевих кабелів мають більші значення відносно неекранованих пар при тих же діаметрах і допусках на діаметри провідників. Це пов'язане з ефектом близькості екрана, що призводить до збільшення опору навіть на постійному струмі.

2. Робоча ємність при тій самій товщині ізоляції зростає в 1,4 -1,6 рази. Для забезпечення нормованої величини ємності товщина ізоляції екранованих кабелів повинна бути збільшена. У випадку неекранованих кабелів номінальний діаметр по ізоляції становить 0,95 мм, а у випадку екранованого кабелю 1,06 мм при тих же діаметрах провідників і допусках на них.

3. Коефіцієнт згасання екранованих кабелів менше, ніж неекранованих, в області частот понад 4 МГц. Це призводить до того, що високочастотні складові, що відповідають за фронти цифрових прямокутних сигналів, будуть у меншій мірі послаблятися.

Для екранованих витих пар категорії 7 на основі розрахунків електричного поля встановлено:

4. При застосуванні суцільної поліетиленової ізоляції забезпечити робочу ємність в границях допустимого діапазону (від 56 до 48 пФ/м) можливо тільки при збільшенні товщини ізоляції не менше, ніж на 40%, від діаметру струмопровідної жили. Це призводить до зростання масогабаритних розмірів та зменшенню гнучкості вити пари та мережевого кабелю в цілому.

5. Застосування трьохшарової ізоляції з посереднім шаром зі спіненою азотом ізоляцією товщиною всього 100 (рис.11) - 260 мкм (таблиця 1) в залежності від товщини суцільних шарів поліетиленової ізоляції за-

безпечує робочу ємність в межах допустимих значень при зменшенні загальної товщини ізоляції не менше ніж на 20% відносно діаметру жили.

Список літератури: 1. International Standard ISO/IEC 11801 Information Technology – Generic Cabling for Customer Premises. – 1995. – 104 p. 2. TSB -36. Technical Systems Bulletin/ Additional Cable Specifications for Unshielded Twisted Pair Cables. -5p. 3. Семенов А.Б., Стрижачков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 640 с. 4. Семенов А. Б. Основные тенденции развития техники СКС // Журнал сетевых решений/ – 2007. – № 8 (133)/ – С. 56–65. 5. Семенов А. Б. Новинки СКС // Вестник связи/ – 2007/ – № 2. – С. 4–10. 6. Семенов А. Б. Структурированные кабельные системы промышленного назначения // Мир связи. – 2007/ – № 7. – С. 166–169. 7. Стерлинг Д. Кабельные системы / Д. Стерлинг, Л.Бакстер. – изд.2 – М.: Лори. – 2003. – 316с. 8. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А.Б.Семенов. – М.: ДМК пресс, 2007. – 640с. 9. Иоргачев Д.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д.В. Иоргачев, С.Б Бондаренко– М.: Эко-Трендз, 2002 – 284с. 10. Иоргачев Д.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д.В. Иоргачев, С.Б. Бондаренко. – М.: Эко-Трендз, 2002 – 284с. 11. Парфенов Ю.А., Мирошников К.П. Цифровые сети доступа. Медные кабели и оборудование / Ю.А. Парфенов, К.П. Мирошников. – М.: Эко-Трендз, 2004 – 288с. 12. Самарский К.Ф. Основы структурированных кабельных систем / К.Ф. Самарский. – М.: ДМК, 2005 – 232с., ил. 13. Брискер А.С. Справочник. Городские телефонные кабели / А.С.Брискер, А.Д. Руга, Д.Л. Шарле. - М.: Радио и связь, 1991 – 207с. 14. ГОСТ Р 51311 – 99. Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке. 15. Дьяконов В.П. Matlab 6/6.1/6.5+Simulink 4/5® Основы применения. Полное руководство пользователя / Дьяконов В.П. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2004. – 767 с. 16. Беспрозванных А.В. Влияние скрутки сердечника на параметры передачи сетевых кабелей / А.В. Беспрозванных, А.Г. Игнатенко // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – №7. – С.82 –87. 17. Беспрозванных А.В. Оптимизация конструкции сетевых кабелей по коэффициенту затухания в зоне допусков геометрических размеров параметров передачи / А.В.Беспрозванных, А.Г. Игнатенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2004. – №2. – С.8 – 10. 18. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике / О.В. Тозони. - М., 1975. – 295 с. 19. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: [учебное пособие для студентов электроэнергетических специал.] / Б.Г. Набока – К.: ИСДО, 1995. – 120с. 20. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов в 3-х томах / К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003.– 463 [1] с. 21. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: підручник у 3 т. Т. 1 Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / Бойко В.С., Бойко В.В., Видолюб Ю.Ф. та ін.; за заг.ред. І.М. Чиженка та В.С. Бойка. – К.: ІВЦ, видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с..

Надійшла в редакцію 05.01.2011

УДК 621.316

Ю.В.ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»;
Ю.В.ШУМИЛИНА, магистр, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ

Исследовано влияние высших гармоник тока на дополнительные потери в трансформаторах промышленных предприятий и приведены рекомендации относительно нагрузки мощных трансформаторов напряжением 6–10 кВ с учетом влияния высших гармоник.

Досліджено вплив вищих гармонік струму на додаткові втрати в трансформаторах промислових підприємств і приведені рекомендації щодо навантаження потужних трансформаторів напругою 6–10 кВ з урахуванням впливу вищих гармонік.

Influence of higher accordions is investigational on the additional losses in the transformers of industrial enterprises and recommendations are given on the load of power transformers by voltage 6–10 kV taking into account influencing of higher accordions.

В электрических сетях современных предприятиях значительное распространение получили нелинейные нагрузки. К их числу относятся в первую очередь различного рода вентиляльные преобразователи, преобразователи частоты, установки дуговой и контактной электросварки, дуговые сталеплавильные и руднотермические печи, газоразрядные лампы. Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной, а в некоторых случаях и непериодической, в результате возникают нелинейные искажения кривых тока и напряжения сети [1,2].

Несинусоидальные режимы неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие в результате воздействия высших гармоник (ВГ) экономические ущербы обусловлены главным образом ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования. Поэтому прогрессирующее внедрение вентиляльного электропривода и электротехнологий обусловило важность и актуальность решения проблемы ВГ в электрических сетях [3]. Негативное влияние ВГ на трансформаторы, установленные в электрических сетях, в частности, ведет к увеличению активных потерь в них. При этом следует иметь в виду, что поскольку срок эксплуатации силовых трансформаторов, как правило, превышает 10–20 лет, стоимость потерь в них за этот период может значительно превосходить стоимость самого трансформатора.

Авторами данной статьи были исследованы зависимости дополнительных потерь и суммарных потерь в трансформаторах различных типов (в частности масляных – типа ТМ; сухих – типа ТСЗ; с негорючим жидким диэлектриком – типа ТНЗ) от режима их работы с учетом воздействия высших гармоник.

Данные исследования проводились для трансформаторов напряжением 6–10 кВ различных типов и номинальных мощностей наиболее используемых, в сетях промышленных предприятий, а именно $S_{ном} = 630$; 1000; 1600 и 2500 кВА.

В трансформаторах дополнительные потери активной мощности на частотах ВГ выражаются простейшей формулой [2]:

$$\Delta P_{Tv} = 3 \sum_{v=2}^n I_{Tv}^2 \cdot R_{kv}, \quad (1)$$

где I_{Tv} – ток v -й гармоники, проходящей через трансформатор;

R_{kv} – сопротивление КЗ трансформатора на частоте v -й гармоники.

По данным [1], $R_{kv} \approx 0,47 \cdot \sqrt{v} \cdot R_k$, где R_k – сопротивление КЗ при промышленной частоте. Поэтому:

$$\Delta P_{Tv} = 0,47 \cdot \Delta P_{kT} \sum_{v=2}^n K_{I(v)}^2 \cdot \sqrt{v}, \quad (2)$$

где ΔP_{kT} – потери КЗ на частоте первой гармоники;

$K_{I(v)} = I_v / I_{ном.тр}$ – относительное значение ВГ тока.

Кроме потерь КЗ в активном сопротивлении, на частотах ВГ возникают добавочные потери ΔP_{0v} , вызываемые вихревыми токами:

$$\Delta P_{0v} = 0,05 \cdot \Delta P_{Tv} \cdot v^2. \quad (3)$$

В результате полные дополнительные потери $\Delta P_{\Sigma v}$, обусловленные токами ВГ, составляют:

$$\Delta P_{полн.v} = \sum_{v=2}^n \Delta P_{Tv} (1 + 0,05 \cdot v^2). \quad (4)$$

Суммарные потери активной мощности, т.е. потери на основной частоте с учетом потерь на частотах ВГ будут определяться, как:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_i + \Delta P_{полн.v}, \quad (5)$$

где ΔP_i – потери активной мощности в трансформаторе на основной частоте (от первой гармоники);

$\Delta P_{полн.v}$ – полные дополнительные потери активной мощности, обусловленные токами ВГ.

Расчеты по данному алгоритму, выполнялись при условии, что:

– доля токов ВГ составляет от 10 % до 40 %, что соответствует наличию ВГ в сетях большинства промышленных предприятий [1,2];

– учет гармоник осуществляется до 11-й включительно.

Расчеты, проведенные для указанных выше трансформаторов, позволили построить зависимости величин относительных полных дополнительных и суммарных потерь ($\gamma = (\Delta P / S_{загр}) \cdot 100\%$) от величины коэффициента загрузки трансформатора ($K_{загр} = S_{загр} / S_{ном.тр}$) для различных гармоник тока. На рис.1 и 2 (в качестве примера) показаны такие зависимости для трансформатора типа ТМ–1000/10 кВ при условии, что доля токов ВГ составляет 40 %.

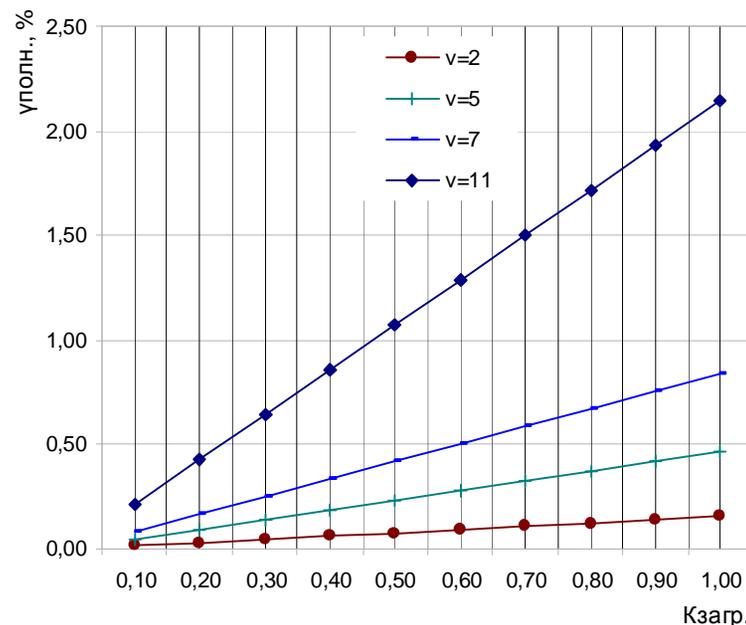


Рис.1 – Относительные полные дополнительные потери в трансформаторе

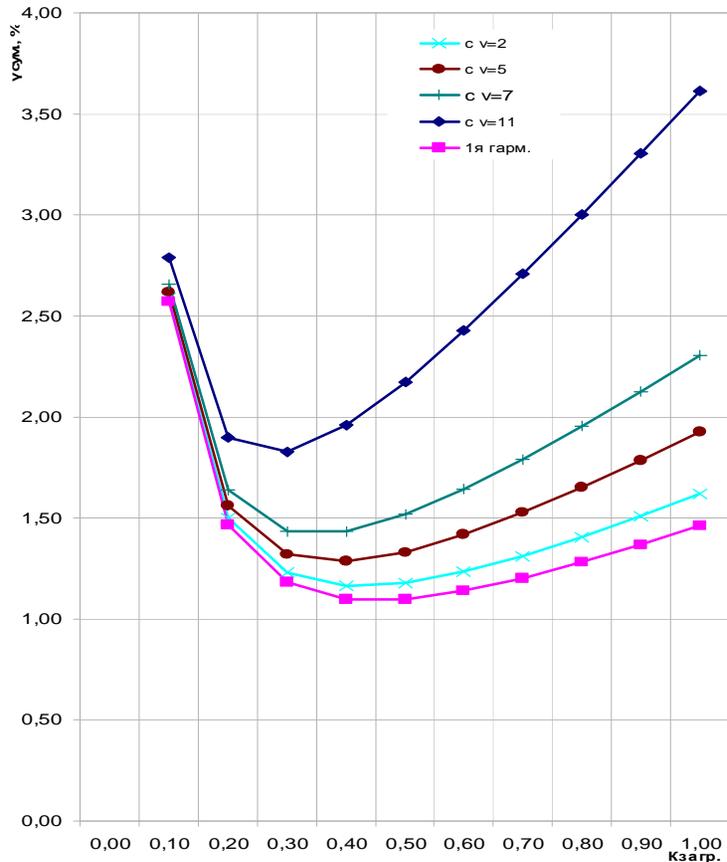


Рис.2 – Относительные суммарные потери в трансформаторе

Как видно из графиков (рис.2) оптимальная нагрузка трансформаторов с учетом влияния ВГ по отношению к рекомендованной в работе [4] при отсутствии ВГ, изменилась и находится в диапазоне $K_{загр.} \approx 0,1 \div 0,7$. При этом относительные потери при $K_{загр.} = 0,7$ и $K_{загр.} = 0,1$ примерно равны, но абсолютные потери при $K_{загр.} = 0,7$ в 3–7 раз превышают потери при $K_{загр.} = 0,1$. Расчеты показали, что для трансформаторов типа ТНЗ оптимальная нагрузка аналогична нагрузке трансформаторов типа ТМ, а для типа ТСЗ оптимальная нагрузка находится в диапазоне $K_{загр.} \approx 0,16 \div 0,7$. Поэтому, можно сделать вывод, что с учетом влияния ВГ диапазон оптимальной нагрузки трансформаторов расширяется в сторону уменьшения

коэффициента минимальной загрузки. При этом относительные суммарные потери в трансформаторе возрастают примерно в 1,5 раза.

Если же при определении диапазона оптимальной загрузки трансформатора руководствоваться не только условием минимизации суммарных относительных потерь, но и абсолютных, то получим изменение оптимальной загрузки трансформатора в сторону уменьшения как минимальной, так и максимальной загрузки. В результате рекомендуемая оптимальная нагрузка трансформаторов 6÷10 кВ будет находиться в диапазоне $K_{загр.} \approx 0,15 \div 0,55$.

Результаты проведенных исследований показали, что при наличии высших гармоник тока менее 20 % от основной гармоники дополнительные относительные потери активной мощности не превышают 0,5% и в ряде случаев можно не учитывать влияние высших гармоник на потери.

Проведенные исследования (расчеты) позволяют считать, что целесообразно завышать номинальную мощность устанавливаемых трансформаторов и при этом получать экономическую выгоду от уменьшения годовых потерь в трансформаторах при одновременном повышении надежности электроснабжения.

Методика определения экономической эффективности дополнительных капитальных вложений в трансформатор завышенной номинальной мощности, в соответствии с [5], приведена в работе [4].

Выводы.

1. С увеличением номера гармоники дополнительные потери в силовом трансформаторе увеличиваются независимо от типа трансформатора.
2. При наличии доли ВГ тока менее 20 % от основной дополнительные потери активной мощности от ВГ можно не учитывать.
3. С учетом негативного влияния ВГ оптимальная нагрузка трансформаторов может быть рекомендована в диапазоне 15÷55% их номинальной мощности.

Список литературы: 1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с. 2. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с. 3. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с. 4. Владимиров Ю.В. Выбор номинальной мощности трансформаторов с учетом минимизации потерь / Ю.В. Владимиров, Р.А. Вдовин // Светлотехника та електроенергетика. – 2009. – №1(17). – С.13–16. 5. Методика ГКД 340.000.002 – 97 Отраслевые руководящие документы. «Определение экономической эффективности капитальных вложений в энергетику» / Минэнерго Украины. – Киев, 1997. – 54 с. Введены в действие с 01.07.97г.

Поступило в редакцию 03.11.2010

Е.Е.ГОНЧАРОВА, студентка, НТУ «ХПИ»

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Проведен анализ работы ТЭЦ в отопительный период, рассчитана затрата сетевой воды за отопительный сезон 2003-2004. Указаны способы повышения качества теплоснабжения, приведенные результаты пробного телефонного опроса о качестве теплоснабжения, который был проведен 20.03.2010р.

Проведений анализ роботи ТЕЦ в опалювальний період, розрахована витрата мережевої води за опалювальний сезон 2003-2004. Вказані способи підвищення якості теплопостачання, приведені результати пробного телефонного опиту про якість теплопостачання, який був проведений 20.03.2010р.

The analysis of the TPP in the heating period, to calculate the costs of water mains for the heating season 2003-2004. The methods of improving the quality of heat supply, the results of a trial telephone survey on the quality of heat supply, which was held 15.03.2010.

Введение. Основная задача теплоэнергетики – повысить обеспеченность городов и других населенных пунктов качественным централизованным теплоснабжением. Качество теплоснабжения города от ТЭЦ тесно связано с работой тепловых сетей.

В действующих сетях трудно предусмотреть правильное распределение тепла по потребителям расчетным путем из-за низкой гидравлической устойчивости тепловых сетей, подключения новых теплопотребителей, корректировки расчетной температуры для отопления, изменения характера тепловых нагрузок за счет внедрения централизованного горячего водоснабжения в сложившейся жилой застройке. Качество работы системы централизованного теплоснабжения зависит от температуры сетевой воды и ее количества, повышенный расход сетевой воды, приводит к перетопам и недотопам жилых помещений, сокращению пропускной способности тепловых сетей и перерасходу топлива и электроэнергии [1,2,3].

Целью работы является определение фактических величин перерасхода сетевой воды и перетопа в городских тепловых сетях (ТС), совместно работающих с Харьковской ТЭЦ-5 (ХарТЭЦ).

Расчет расхода сетевой воды и перетопа. Анализируя температуру сетевой воды в подающем трубопроводе (рис.1, данные предоставлены из архива ХарТЭЦ за период 1983-2010 г.г.), можно сделать вывод, что в течение большинства суток имеются отклонения как в сторону завышения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе, так и в сторону занижения ее против графика.

В действительности городские тепловые сети работают не используя преимущества двухступенчатых последовательных схем теплораспределительных станций, о чем свидетельствуют высокие температуры обратной воды (до 55⁰С), поступающей на ХарТЭЦ-5 (рис.2).

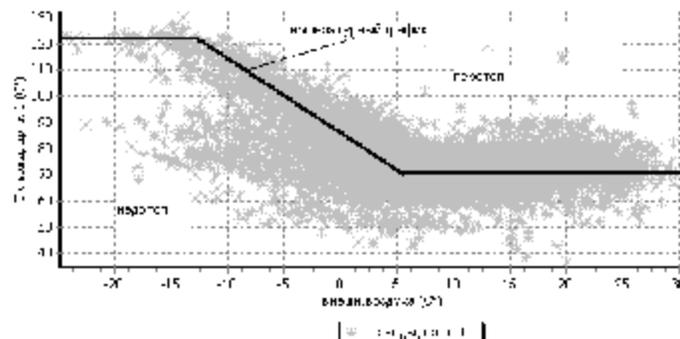


Рис.1 – Суточная температура сетевой воды в подающем трубопроводе

Фактическая температура сетевой воды в обратном трубопроводе (рис.2) завышена по сравнению с графиком тепловых сетей (30⁰С) на протяжении всего межотопительного периода. Эти температуры фактически соответствуют температурам обратной сетевой воды после систем отопления, а иногда и превышают их в отдельные сутки.

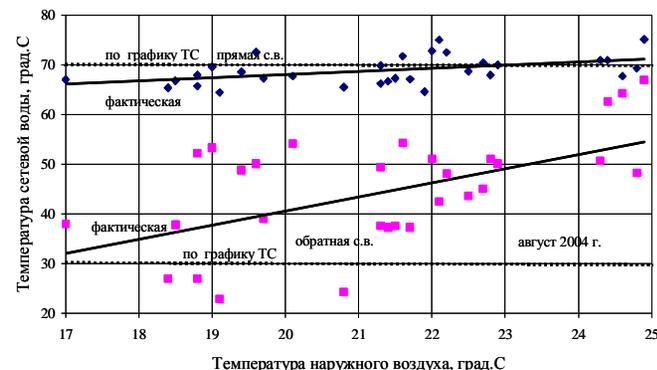


Рис.2 – Зависимость температуры сетевой воды на ГВС от температуры наружного воздуха.

Как видно из графика на рис.2 фактическая температура обратной сетевой воды на 25⁰С превышает заданное температурным графиком

значение равное 30°C , что резко снижает теплосъем. Причем с ростом температуры наружного воздуха растет температура обратной сетевой воды, а фактическая температура прямой сетевой от ХарТЭЦ-5 при этом практически остается постоянной и колеблется в заданных пределах около 70°C . Высокая температура обратной сетевой воды свидетельствует о том, что автоматика на ТРС практически не работает, кроме того, высокая температура обратной воды снижает КПД выработки электроэнергии ТЭЦ. Исходные данные и формулы для расчета расхода сетевой воды и перетопа.

– согласованный и утвержденный температурный график центрального качественного регулирования отпуска тепла от ТЭЦ-5 на 2004 год;

- среднесуточная температура наружного воздуха за 2004 г.;

- данные потребления теплоты ГТС посуточно за 2001-2004 годы;

- средняя часовая тепловая нагрузка в летний период за 2001-2004 годы, равная $Q_{\Gamma}^{\text{сп}} = 162$ Гкал/ч.

Параметры теплоносителя по температурному графику при средней температуре наружного воздуха $t^{\circ}\text{н.в.} = 0.074^{\circ}\text{C}$. Температура смешанной воды, для графика $95/70^{\circ}\text{C}$ и $105/70^{\circ}\text{C}$: $T_{\text{см.}} = 59.5^{\circ}\text{C}$

Недогрев в нижней ступени: $\text{DT}^{\circ}\text{н.} = 7^{\circ}\text{C}$.

1. Температурный график теплосети 150/70 со срезками в подающем трубопроводе: при $t_{\text{н}} = 1^{\circ}\text{C}$ на 70°C ; при $t_{\text{н}} = -15^{\circ}\text{C}$ на 110°C .

2. Таблица параметров тепловой энергии с октября 2002 г. по май 2003 г. включительно, предоставленной ТЭЦ-5.

3. Отпуск тепловой энергии с ТЭЦ производится по двум подающим и двум обратным трубопроводам.

4. Расчетные температуры воды ГВС:

горячей – $t_{\Gamma} = 55^{\circ}\text{C}$; холодная зимняя – $t_{\text{к.з.}} = 5^{\circ}\text{C}$; холодная летняя – $t_{\text{х.л.}} = 10^{\circ}\text{C}$ (для мая месяца).

5. Справочные данные:

5.1 Расчетная температура наружного воздуха для отопления в г. Харькове $t_{\text{н.р.}} = -23^{\circ}\text{C}$;

5.2 Удельный расход сетевой воды на отопление при графике 150/70 $^{\circ}\text{C}$: $q_0^p = 12,5$ т/Гкал

5.3 Удельный расход сетевой воды на ГВС при графике 150/70 $^{\circ}\text{C}$ и двухступенчатых последовательных схемах включения подогревателей ЦТП, оборудованных регуляторами расхода и температуры: $q_0^p = 18,1$ т/Гкал

5.4 Температура обратной сетевой воды после теплообменников ГВС в летнее время (параллельная схема включения) $T_{\Gamma,\text{л.}} = 30^{\circ}\text{C}$.

6. Среднечасовая летняя нагрузка ГВС составляет: $Q_{\Gamma,\text{ср.}} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_{\text{ч}}}$,

Гкал/ч, (где $T_{\text{ч}}$ – число часов).

7. Средняя температура сетевой воды в подающем трубопроводе составляет: $t_{\text{п.ср.}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{pi}}}{T_{\text{ч}}}$, $^{\circ}\text{C}$.

8. Средняя температура сетевой воды в обратном трубопроводе составляет: $t_{\text{о.ср.}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{oi}}}{T_{\text{ч}}}$, $^{\circ}\text{C}$.

9. Расход сетевой воды (табличные данные) на ГВС составляет:

$$G_{\Gamma}^{\Gamma} = \sum \frac{G_{\Gamma i}}{t_{\text{ч}}}, \text{ т/ч.}$$

10. Расход сетевой воды на ГВС фактический составил:

$$G_{\Gamma}^{\Phi} = \frac{Q_{\Gamma,\text{ср}}}{t_{\text{п.ср.}} - t_{\text{о.ср.}}}, \text{ т/ч.}$$

11. Расход сетевой воды на ГВС расчетный составит $G_{\Gamma}^p = \frac{Q_{\Gamma,\text{ср}}}{t_{\text{н}}^0 - t_{\text{о}}^p}$, т/ч.

Таким образом, превышение расхода сетевой воды на ГВС в летний период составит: с учетом табличных данных на $\Delta G^{\Gamma} = \frac{G_{\Gamma}^{\Gamma} - G_{\Gamma}^p}{G_{\Gamma}^p} \cdot 100$, %; фак-

тически $\Delta G^{\Phi} = \frac{G_{\Gamma}^{\Phi} - G_{\Gamma}^p}{G_{\Gamma}^p} \cdot 100$, %.

12. Определим тепловую нагрузку ГВС в зимнее время по формуле:

$$Q_{\Gamma,\text{з.}}^{\text{сп}} = Q_{\Gamma,\text{л.}}^{\text{сп}} \cdot \frac{(t_{\Gamma} - t_{\text{х.з.}})}{p \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{х.л.}})}, \text{ гкал/ч, (где } p \text{ – коэффициент, учитывающий}$$

снижение среднечасового расхода воды на ГВС в летний период).

13. Расчетный расход сетевой воды на ГВС составит: $G_{\Gamma}^p = q_0^p \cdot Q_{\Gamma,\text{з.}}^{\text{сп}}$, т/ч.

14. Для проведения расчетов, позволяющих провести работы теплосети в отопительном сезоне, воспользуемся данными таблицы параметров сетевой воды за определенные сутки, когда температура сетевой воды в подающем трубопроводе выдерживалась согласно температурного графика или была близка к ней, а расход сетевой воды был стабильным. Такими являются, в частности, следующие сутки:

декабрь 2002 г. – 29, 30; январь 2003 г. – 3, 13, 19, 21, 25; февраль 2003 г. – 5, 6, 25; март 2003 г. – 9, 20; апрель 2003 г. – 1, 14

14.1 Суточная нагрузка на отопление (графа 10):
 $Q_o^{сут} = Q_{общ}^{сут} - Q_{г.з}^{сут}$, Гкал, где: $Q_{общ}^{сут}$ – фактическая общая тепловая нагрузка (данные ТЭЦ); $Q_{г.з}^{сут} = 256$ Гкал – определялась ранее расчетным путем

14.2 Среднечасовая нагрузка на отопление (графа 11): $Q_o = \frac{Q_o^{сут}}{24}$, Гкал/ч.

14.3 Расчетный расход сетевой воды на отопление (графа 12):

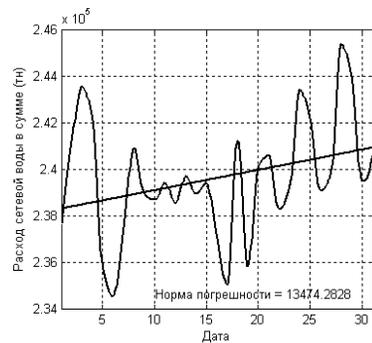
$G_o^p = q_o^p \cdot Q_o$, т/ч (где q – см. исходные данные).

14.4 Расчетный расход сетевой воды на ГВС (пункт 13):

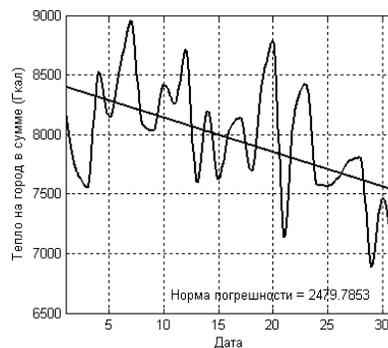
$G_g^p = q_g^p \cdot Q_{г.з}^{сп}$, т/ч (см. исходные данные и п. 8).

14.5 Превышение фактического расхода сетевой воды над расчетным в процентном отношении: $\frac{G_{сп}^ф - G_{общ}^p}{G_{общ}^p} \cdot 100$, %.

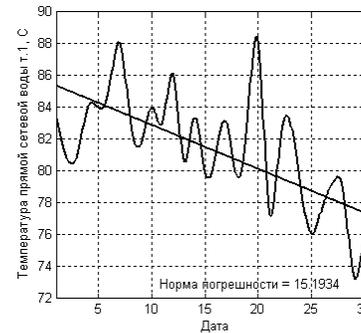
Исходные данные за период с 01.01.2004 по 31.01.2004 приведены на рис.3



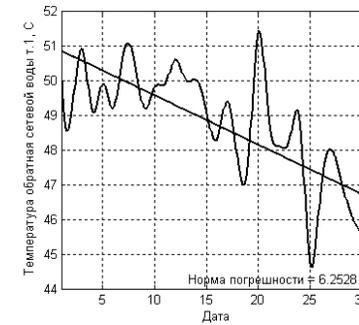
а – расход сетевой воды в среднем за период: $G = 9983$ т/ч



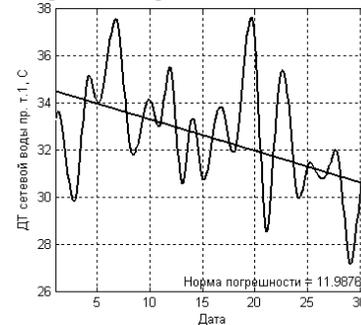
б – тепло на город в среднем за период: $Q = 333$ Гкал/ч



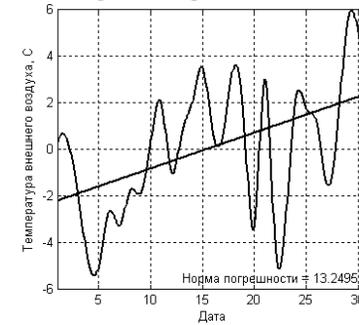
в – температура воды прямая в среднем за период: $T пр. = 81.7$ °C



г – температура обратной воды в среднем за период $T обр. = 48.5$ °C



д – разность температур прямой и обратной воды за период $DT 33.2$ °C



е – среднесуточная температура наружного воздуха за период $T воз. = 0.07$ °C

Рис.3. - Параметры теплоснабжения в январе 2004 г

Для определения качества работы системы централизованного теплоснабжения разработана методика и компьютерная программа «Тепло». Результаты расчета приведены ниже. За отопительный сезон 2003-2004 г.г. (семь месяцев) :

- фактическая тепловая нагрузка составила 1592310 Гкал;
- фактический расход сетевой воды за час составил 12164 т/ч;
- расчетный расход сетевой воды за час составил 3925 т/ч;
- фактический расход сетевой воды за месяц составил 61797570 т;
- расчетный расход сетевой воды за месяц составил 19918128 т;

Превышение фактического расхода сетевой над расчетным составило 41879442 т, или в процентном отношении- 210 %.

Тепло на ГВС в летий период с 2001 по 2004 г.г.: $Q лет. = 109$ Гкал/ч

Тепло на ГВС в зимний период: $Q зим. = 151$ Гкал/ч

Тепло на отопление за период: $Q отоп. = 182$ Гкал/ч

Температура воды после нижней ступени (темпер. график): $T пн. = 36$ °C

Расход воды на ГВС в среднем за период: $G_{гвс} = 3026 \text{ т}\cdot\text{ч}$
 Теплопроизводительность нижней ступени (зима) в среднем за период: $Q_{ниж} = 94 \text{ Гкал}\cdot\text{ч}$. Теплопроизводительность верхней ступени (зима) в среднем за период: $Q_{вер} = 58 \text{ Гкал}\cdot\text{ч}$
 Фактическая температура перед нижней ступенью подогревателей ГВС: $T_{02} = 57.9^\circ\text{C}$. Фактическая температура после верхней ступени подогревателей ГВС: $T_{01} = 76^\circ\text{C}$. Проверка T_{01} : $T_{01} = 76^\circ\text{C}$
 Температура воздуха в отапливаемых помещениях, фактическая: $T_{вн.ф.} = 21.8^\circ\text{C}$. Теплопроизводительность нижней и верхней ступеней: $Q_0 = 1.2110$
 Температура смешанной воды в подающем трубопроводе: $T_{см.ф.} = 66.7^\circ\text{C}$
 Теплопроизводительность нижней и верхней ступеней, проверка: $Q_0 = 1.2$
 Температура смешанной воды в подающем трубопроводе, проверка: $T_{см.ф.} = 66.7^\circ\text{C}$. Разница в перерасчете составляет: $\Delta = 0.0011 \%$
 Фактический коэффициент смешения в системах отопления: $U = 1.06$
 Расчетная тепловая нагрузка на отопление: $Q_{отоп} = 149.2 \text{ Гкал}\cdot\text{ч}$
 Расчетный расход сетевой воды на ввод (в тепловой сети): $G_c = 11051.7 \text{ т}\cdot\text{ч}$
 Расчетный расход сетевой воды на отопление: $G_{отоп} = 5790 \text{ т}\cdot\text{ч}$
 Перетоп за период составляет: $Q_{перетоп} = 32 \text{ Гкал}\cdot\text{ч}$
 Перерасход сетевой воды на отопление составляет: $G_{>>} = 1.72 \text{ раза}$

Таблица 1 – Превышение фактического расхода сетевой воды в системе

Месяц	Окт	Нояб.	Дек.	Янв.	Февр.	Март	Апр.
Перерасход	1,6	2,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,05

Анализ работы ТЭЦ в отопительный период показывает, что в начале отопительного периода превышения расхода сетевой воды составляет 2,3 раза (табл.1), в середине периода снижается до 1,3 раз, лишь в конце периода практически отсутствует перерасход воды.

Таким образом, отмеченным выше, имеют место значительно превышенный расход сетевой воды, превышающий расчетный до 2,3 раза. Температура воды в обратном магистральном трубопроводе на 25°C выше, чем нормируемая. В результате имеется постоянный перерасход топлива из-за перетопа выше $+21^\circ\text{C}$, близлежащих потребителей к ТЭЦ, и массового недотопа ниже $+18^\circ\text{C}$, удаленных потребителей тепла.

Температура воды, возвращающейся из системы отопления в тепловую сеть, – это простой и единственный параметр, интегрировано отображающий реальную информацию о потребительских качествах работающей системы отопления. Известно, что поддержание температуры в доме выше норматива всего на 1°C увеличивает расходы тепла на 4-6%. Нормальная температура воздуха для жилых комнат, столовой или ком-

наты для занятий составляет 18°C , для кухни и спальни $14-16^\circ\text{C}$, для детской $20-21^\circ\text{C}$.

Погодное регулирование должно обеспечиваться тепловыми сетями, которые обязаны выдерживать при качественном регулировании свой температурный график. Строго говоря, качественное регулирование – это и есть регулирование погодное. На Западе в системах районного отопления редко используют качественное регулирование. Поэтому там просто нельзя обходиться без погодных регуляторов в каждом абонентском вводе.

Желательно установить в комнатах термометры, следить за их показателями и своевременно регулировать температуру за счет изменения режима работы отопительных приборов. Для этой цели могут быть использованы теплосчетчики, обладающие способностью реализовать функции управления. Тогда появляется возможность устанавливать и автоматически поддерживать температуру при отсутствии жильцов.

Соответствие фактической температуры сетевой воды нормативному значению по температурному графику является одним из главных показателей, характеризующих качество работы всей теплоэнергетической системы. По правилам технической эксплуатации (ПТЭ), недогрев «прямой» сетевой воды не должен быть больше $\pm(2.1\div 4.5^\circ\text{C})$. Однако фактический недогрев прямой сетевой воды составляет $30-60^\circ\text{C}$, что в 10 раз больше допустимого по ПТЭ. В свою очередь потребитель также должен обеспечить полное использование тепла и температура «обратки» не должна быть выше $+(1.2\div 2.1^\circ\text{C})$ от норматива. Фактическое недоиспользование тепла у потребителя составляет до $12-30^\circ\text{C}$, что так-же в 10 раз больше допустимого по ПТЭ.

Из-за завышенного роста циркуляции сетевой воды, массового снижения перепадов давления у конечных потребителей тепла, при температурах наружного ниже $-20-25^\circ\text{C}$ создается неуправляемая аварийная ситуация. Тонкой наладкой гидравлических режимов с установкой нужных диаметров регулирующих шайб и сопел специалисты тепловых сетей занимаются месяцами, но достаточно один раз не обеспечить необходимую температуру в течение 2-4 дней как вся тонкая наладочная работа разваливается. Но самое главное, что никакой реальной экономии топлива на теплоснабжении города при этом нет. Наоборот имеется постоянный перерасход топлива из-за «перегрева» выше $+22^\circ\text{C}$, близлежащих потребителей тепла ~ 60%, и массового «недогрева» ниже $+18^\circ\text{C}$, удаленных потребителей тепла ~30%. При снижении температуры наружного воздуха ниже минус 28°C может произойти массовый неуправляемый «недогрев» населения с температурой ниже $+18^\circ\text{C}$ уже для ~60% потребителей, и городских системах отопления может возникнуть неуправляемая аварийная ситуация, требующая вмешательства министерства чрезвычайных ситуаций.

Пробный сбор информации о качестве теплоснабжения путем телефонного опроса. Для получения информации об удовлетворенности жителей города Харькова тепловой энергией и горячим водоснабжением было проведено пилотное исследование. По телефону были опрошены жители домов №17 и №11а по ул. Ахсарова Дзержинского района. Следует заметить, что среди опрошенных оказалось 69,1% женщин, соответственно мужчин – 30,9%, 58,2% респондентов с высшим образованием.

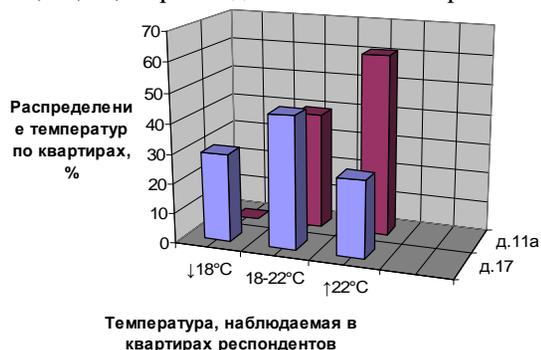


Рис.4 – Результаты социологического опроса, проведенного 15.03.2010

Результаты социологического опроса приведены на рис.4. Методом контент анализа были выделены основные меры, которые потребители предлагали для улучшения качества теплоснабжения. Жители д.17 по ул. Ахсарова предлагали замену окон, утепление стен всего здания, лестничных клеток и чердаков, отмечая при этом плохое состояние самого дома. Жители д.11а по ул. Ахсарова оказались полностью удовлетворены качеством теплоснабжения, отмечая в квартирах нормальную температуру (39,285%), а зачастую и перетоп (60,715%). Отвечая на открытый вопрос об переходе на индивидуальное отопление, даже респонденты в квартирах которых при стоянии низких наружных температур в зимнее время года температура была ниже нормальной, отвечали отказом.

Проанализировав результаты пилотного социологического исследования, можно сделать выводы, что в условиях постоянного роста цен на энергоносители, подорожание тепла исходящего из системы центрального отопления, конечно же прогнозируется, но цены на газ для бытовых потребителей возрастут также, делая индивидуальное отопление нежизнеспособным. Следует отметить, что в стоимость централизованного теплоснабжения уже заранее включены расходы на ремонт и эксплуатацию оборудования, теплопроводов, а в случае индивидуального – в стоимость заложены только затраты на транспортировку и на закупку самого газа.

Выводы. Приведенные выше анализ работы теплосети и расчеты, основанные на предоставленных данных ТЭЦ, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Система теплоснабжения ТЭЦ разбалансирована из-за того, что не проводятся наладочные работы по всем ее звеньям и, очевидно, отсутствия автоматических устройств (регуляторов расхода и температуры) на теплообменниках ГВС на ТРС, а возможно и несовершенства схем включения теплообменников ГВС.

2. По причинам, отмеченным выше, имеют место большие перетопы и недотопы и, как видно из расчетов, значительно завышенный расход сетевой воды, превышающий расчетный более чем в два раза. При таком состоянии системы теплоснабжения потери тепловой энергии составляют 20-30% от полезного отпуска ТЭЦ, а перерасход электроэнергии на перекачку сверхнормативного расхода сетевой воды можно определить с большой долей точности расчетным путем.

Для устранения этих потерь целесообразно проводить следующие мероприятия: 1. Мониторинг, обеспечивающий сбор информации по энергопотреблению и потерям энергоресурсов на ТЭЦ и тепловых сетях; 2. Энергоаудит, на основании информации мониторинга, позволяющий выделить причины, приводящие к потерям тепла; 3. Технические и организационные мероприятия, направленные на устранение причин, приводящих к перерасходу тепла.

Успешность проведения мероприятий по второму и третьему пунктам целиком зависит от качества и полноты собранной информации. Поэтому проведение ТЭЦ и тепловыми сетями мониторинга является актуальной задачей.

Сбор информации о качестве теплоснабжения можно разделить на две самостоятельные задачи: - мониторинг тепловых сетей (сбор технологических параметров температуры, давления, расхода); - сбор информации от населения о качестве теплоснабжения (о температурных условиях в помещениях).

Список литературы. 1. Вороновский Г.К. Автоматизированное оперативное управление централизованным теплоснабжением в условиях неполной информации // Диссертация на соискание ученой степени доктора техн.наук: 05.13.07. – Х., 2002г. 2. Шаранов В.И. Особенности теплоснабжение городов при дефиците топлива на электростанциях / В.И. Шаранов //Электрические станции. – 1999. – № 10. – С.63-66. 3. Орловский И.В. Анализ работы городских тепловых сетей от ТЭЦ-5 / И.В Орловский// Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – №36. – С.90-95.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";
С.П. МОСТОВОЙ, канд. физ.-мат. наук, НТУ "ХПИ";
В.В. ПИДАШОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ";
О.Н. ЯРМАК, ведущий инженер, НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ГЛУБОКИХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Для увеличения притока нефти в статье рассмотрена возможность формирования направленных сейсмоакустических импульсов электрогидравлическими разрядами в обсадной колонне нефтяной скважины. Для эффективного действия этих импульсов на нефтеносный пласт показана необходимость согласованности частотных характеристик обсадной колонны и акустического импульса.

Для збільшення притоку нафти у статті розглянута можливість формування направлених сейсмоакустичних імпульсів електрогидравлічними розрядами в обсадній колоні нафтової свердловини. Для ефективної дії цих імпульсів на нафтоносний пласт показана необхідність узгодженості частотних характеристик обсадної колоні та акустичного імпульсу.

For improvement in flow of oil in article consider possibility forming direction of seismoacoustic impulses electrohydraulic discharge in plant pipe oil well. For effective use force to influence this impulse on oil bearing strata put on necessity co-ordination frequency plant pipe and acoustic impulse.

Актуальность проблемы. Одним из приоритетных направлений перспективного развития нефтегазового комплекса Украины является внедрение новых технологических процессов интенсификации добычи нефти из действующих скважин. Наряду с традиционными методами (использование пароциклической обработки, поверхностно-активных веществ и др.) [1], все чаще используются воздействия акустических импульсов большой мощности, создаваемых электрогидравлическими устройствами, размещаемыми в зоне коллектора обсадной колонны. Создаваемая при этом волна давления позволяет очищать перфорационные отверстия, влиять на ближайшее затрубное пространство, увеличивая приток нефти.

Применение того или иного способа воздействия на малодобитные скважины связано с необходимостью детального изучения остаточных запасов в зоне работы скважины, установления амплитуды и спектра воздействующего акустического импульса, согласование его параметров с частотными характеристиками зоны "коллектор - окружающая среда" и с последующим длительным воздействием на нефтеносный пласт импульсом с полученными оптимальными характеристиками.

Предварительное изучение геологической структуры нефтеносного

района проводится с поверхности земли традиционными для сейсморазведки методами отраженных волн (МОВ), общей глубинной точки (МОГТ) и др. [2]. С увеличением глубины скважины до 5÷7 км амплитуда отраженного сигнала снижается, ухудшая разрешенность изучения структуры пласта. Усилить отраженный от пласта сигнал можно путем создания направленного излучения со скважины в зоне коллектора. Применение распределенной по высоте коллекторной зоны антенной решетки, состоящей из нескольких электрогидравлических излучателей, позволяет управлять направлением излучения и усиливать отраженный сигнал от нефтеносного слоя.

Особенностью направленного излучения со скважины является наличие перфорированной стальной обсадной колонны, которая оказывает свое влияние на амплитуду и спектр зондирующего акустического импульса.

Постановка задачи. В данной статье рассмотрены вопросы получения направленного акустического излучения со скважины на глубинах 5÷7 км. Для решения этой задачи необходимо было разработать математическую модель колебаний обсадной трубы, определить спектр частотных колебаний с перфорационными отверстиями и без них, зону распространения акустического импульса по металлической трубе при условии исключения влияния на последующие излучатели.

Решение этих задач позволяет определить параметры излучателя и генератора высоковольтных импульсов напряжения в условиях высоких внутрипластовых давлений [3].

Математическая модель колебаний обсадной трубы. Для составления математической модели колебаний обсадной трубы с учетом упругих колебаний ее стенки воспользуемся принципом, изложенным в работах [3-5].

Сделаем ряд допущений: труба представляется упругим объектом; во время подачи ударного импульса ось трубы совершает продольно-угловые колебания, а стенки – упругие колебания; закрепление трубы в грунте консольное.

Так как подаваемый ударный импульс однократного действия, то будем рассматривать затухающие колебания.

Рассмотрим консольно закреплённую трубу, которая под действием внешнего воздействия совершает сложные колебания: продольно - угловые и упругие колебания стенок.

Эти колебания описываются рядом дифференциальных уравнений, при составлении которых необходимо учитывать, что масса трубы и действующее внешнее воздействие распределяются по её длине.

Продольно - угловые колебания трубы описываются дифференциальным уравнением:

$$I_o \ddot{y}(x,t) - \int_0^l m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = F(x,t), \quad (1)$$

где $y(x,t)$ – отклонение точек оси канала трубы от недеформируемого состояния; x – координата соответствующей точки отклонения; $\ddot{y}(x,t)$ – обобщённая координата, характеризующая угловые ускорения трубы; $m(x)$ – погонная масса трубы; I_o – момент инерции трубы относительно места закрепления; l – длина трубы; $F(x,t)$ – распределённое по длине трубы внешнее возмущение.

Функция $y(x,t)$, входящая в уравнение, удовлетворяет уравнению колебаний упругой балки:

$$m(x) \ddot{y}(x,t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + VEI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial^4 x \partial t} = F(x,t), \quad (2)$$

где $I(x)$ – изгибная жёсткость трубы; E – модуль продольной упругости 1 рода; ζ – коэффициент внутреннего демпфирования материала трубы.

Функцию $y(x,t)$ можно представить в виде:

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n A_i(t), \quad (3)$$

где n – число учитываемых форм упругих колебаний ствола; $A_i(t)$ – амплитуды упругих колебаний стенок трубы.

Подставим (1), (2) и (3):

$$I_o \ddot{y}(t) - \sum_{i=1}^n \ddot{A}_i(t) \int_0^l m(x) dx = F(x,t); \quad (4)$$

$$m(x) \ddot{y}(t) + m(x) \sum_{i=1}^n \ddot{A}_i(t) + EI(x) \sum_{i=1}^n A_i(t) T_i(x) + VEI(x) \sum_{i=1}^n \dot{A}_i(t) = F(x,t), \quad (5)$$

где $\ddot{y}(t)$ – обобщенная координата, характеризующая ускорения стенок трубы; $\ddot{A}_i(t)$ – обобщенная координата, характеризующая скорости упругих колебаний стенок.

Обе части (5) проинтегрируем в пределах от 0 до l :

$$\ddot{y}(t) \int_0^l m(x) dx + \sum_{i=1}^n \ddot{A}_i(t) \int_0^l m(x) dx + E \sum_{i=1}^n A_i(t) \int_0^l I(x) dx + VE \sum_{i=1}^n \dot{A}_i(t) \int_0^l I(x) dx = \int_0^l F(x,t) dx. \quad (6)$$

С учётом ортогональности собственных форм упругих колебаний

дифференциальные уравнения продольно-угловых колебаний трубы и упругих колебаний стенок трубы (1) и (2) принимают вид:

$$I_o \ddot{y}(t) - \ddot{A}_j(t) \sum_{i=1}^n \int_0^l m(x) dx = F(x,t);$$

$$\ddot{y}(t) \int_0^l m(x) dx + \ddot{A}_j(t) \int_0^l m(x) dx + V \ddot{A}_j(t) E \int_0^l I(x) dx + A_j(t) E \int_0^l I(x) dx = \int_r^{r+l} F(x,t) dx \quad j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Таким образом, исходя из постановки задачи, для определения частотных характеристик излучателя из уравнений (7) необходимо знать параметры колебаний трубы $j(t)$ и $A(t)$.

Компьютерное моделирование процесса излучения. Реализация способа возбуждения направленного акустического воздействия на нефтяной пласт на уровне коллектора описан [6] и осуществляется следующим образом. На группу излучателей от многоканального генератора подаются импульсы напряжения с интервалом времени Δt . Это позволяет управлять диаграммой направленности излучения и при одновременном санировании со скважины и с поверхности земли получить максимальную амплитуду отраженного сигнала, регистрируемого сейсмоприемниками. За счет изменения параметров импульса тока изменяют спектр излучаемых колебаний, а регулируя зарядное напряжение емкостного накопителя – их амплитуду.

Проверка возможностей данного способа была реализована с помощью компьютерного моделирования. Полная виртуальная обработка на ЭВМ позволяет уже на раннем этапе выявить возможные проблемы или ошибки при создании установки.

Для компьютерной реализации и визуализации полученных результатов предлагается использовать программу Solid Works 2009 с пакетом инженерного анализа Cosmos Works. В данных программах можно построить 3-х мерные модели необходимых элементов, а также провести все необходимые исследования по сейсмоакустическому воздействию излучателей на нефтеносный пласт.

На первом этапе следует создать модели колонны с перфорационными отверстиями и без них, модель участка пласта, который исследуется, с учётом основных физико-механических свойств их материалов. Обсадная труба – углеродистая сталь, участок грунта – песчаник.

Затем необходимо задать действующие нагрузки, а именно: исследования предлагается проводить на глубинах 3, 5 и 7 км. На этих глубинах действуют пластовые давления 22, 36 и 50 МПа соответственно. Для того чтобы обеспечить ударное воздействие на пласт, нужно превышать указанные величины давлений, т.е. следует обеспечить импульс давления от

излучателя минимум 51 МПа. Величину импульса предлагается задавать до 60 МПа с шагом 1 МПа.

3-х мерные модели трубы и грунта с приложенными нагрузками приведены на рис. 1 и 2.

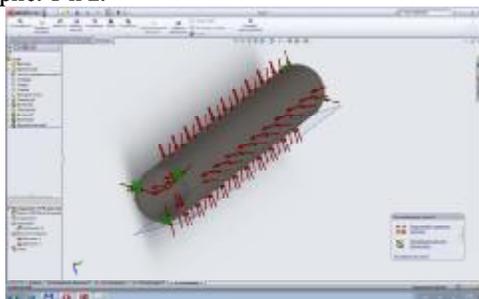


Рис. 1 – Модель обсадной трубы с приложенными внешними и внутренними нагрузками

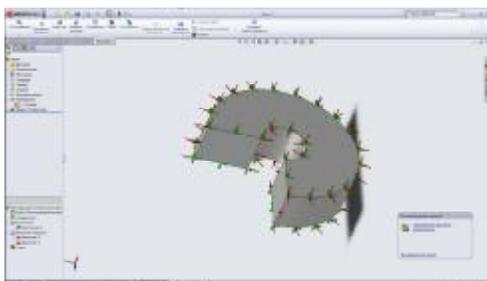


Рис. 2 – Модель исследуемого участка грунта с приложенными внешними и внутренними нагрузками

Для определения частотных характеристик излучателя необходимо учитывать только пластовые давления на указанных глубинах, т.к. определив параметры трубы и грунта без учета источника импульса давления, можно будет подобрать соответствующие частоты излучателя.

В программе Cosmos Works проводится исследование моделей. В первую очередь нас интересуют продольно-угловые колебания трубы и упругие колебания стенки, максимальные длины распространения колебаний грунта под действием импульсов давлений со значениями, предложенными выше, а также частотные параметры трубы и грунта, необходимые для определения характеристик излучателя. Причем, максимальные длины распространения колебаний грунта под воздействием импульсов давлений нас интересуют в 2-х случаях: когда импульс давления создается в цельной трубе, т.е. её стенка является сплошным излучателем, а так-

же, когда давление создается в трубе с перфорационными отверстиями, т.е. каждое отверстие фактически можно рассматривать как самостоятельный поршневой излучатель.

В результате серии опытов получаем зависимости, приведенные на рис. 3 - 5.

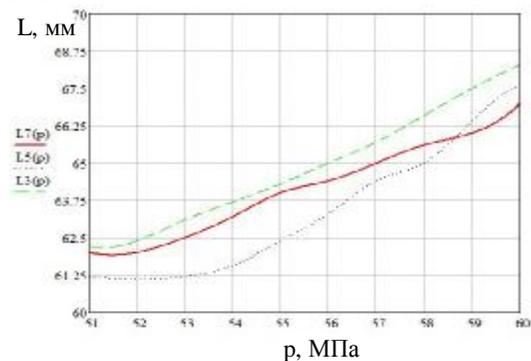
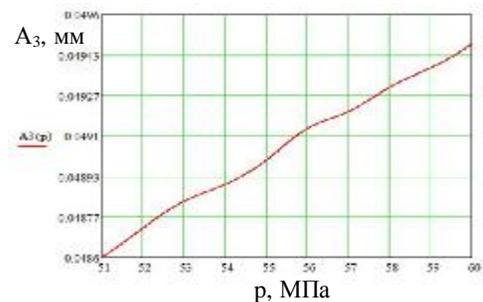
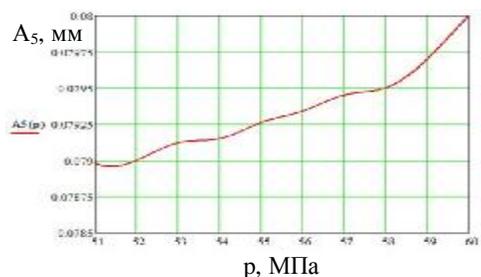


Рис. 3 – Максимальные расстояния от центра разряда, на котором затухают продольно-угловые колебания трубы при длительности фронта акустического импульса давления 5 мкс

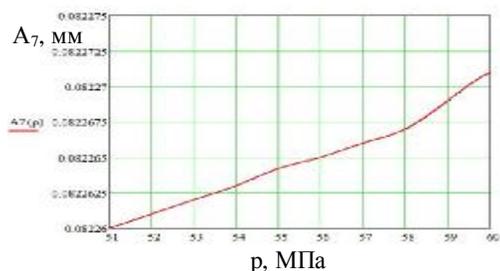
На рис. 3 сплошная кривая соответствует максимальной длине распространения продольно-угловых колебаний по трубе в [мм] на глубине 7 км при различных значениях импульса давления p [МПа]; кривая из совокупности точек - максимальной длине продольно-угловых колебаний трубы в [мм] на глубине 5 км; пунктирная кривая - максимальным длинам продольно-угловых колебаний трубы в [мм] на глубине 3 км.



а)



б)



в)

Рис. 4 – Амплитуды упругих колебаний стенки обсадной трубы [мм] при различных импульсах давления: а) – на глубине 3 км; б) - на глубине 5 км; в) - на глубине 7 км

Полученные результаты позволяют определить количество одиночных электрогидравлических излучателей на длине перфорированного коллектора обсадной колонны. При длине коллектора 2÷3 м по расчетным данным можно установить линейную антенную решетку, состоящую из 8÷10 разрядников.

Для определения длительности действия такого излучателя направленного действия были определены амплитуды упругих колебаний стенки обсадной трубы в зоне коллектора на различных глубинах. На рис 4 приведены результаты расчета колебаний на границе раздела сред "стальная колонна – упругая среда" без учета перфорационных отверстий.

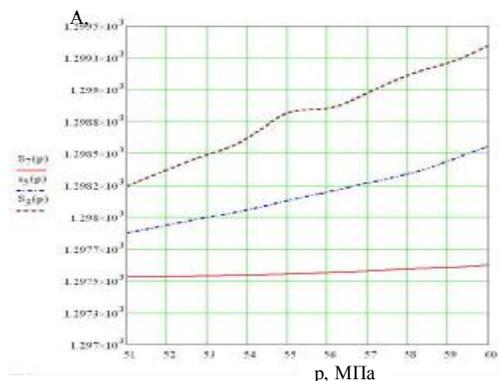


Рис. 5 – Максимальные длины распространения колебаний в грунте при различных импульсах давления

На рис. 5: сплошная кривая - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 7 км при различных значениях импульса давления p [МПа]; точка-пунктир - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 5 км; пунктирная кривая - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 3 км.

На приведенных выше зависимостях рассмотрен идеальный случай, когда частотные характеристики грунта, обсадной трубы и излучателя импульса давления совпадают. Для достижения поставленной задачи, т.е. определения частотных характеристик излучателя, импульсом давления следует пренебречь. Необходимо получить частотные характеристики трубы и грунта только с учетом воздействия пластового давления. Зная частотные характеристики, а именно резонансные частоты обсадной трубы и характеристики грунта, можно будет подобрать и частотные характеристики излучателя.

Для этого проводятся исследования, аналогичные описанным, только без учета импульсов давлений 51 – 60 МПа. Получаем резонансные частоты трубы $f_{mp}(h)$ и грунта $f_{cp}(h)$ на разных глубинах h , приведенные на рис. 6-7.

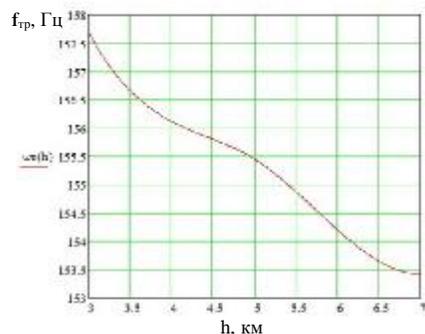


Рис. 6 – Резонансные частоты обсадной трубы на глубинах 3-7 км

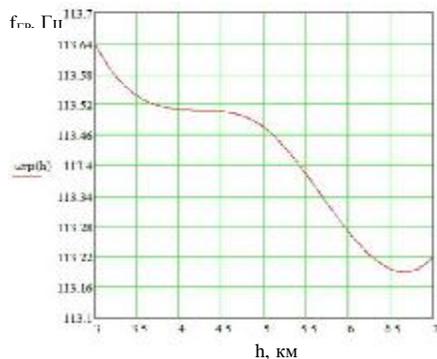


Рис. 7 – Резонансные частоты грунта на глубинах 3-7 км

Выводы. 1. Рассмотрена математическая модель формирования направленного излучения группы электрогидравлических излучателей, размещенных внутри обсадной колонны. Получены резонансы частоты колебаний обсадной колонны на глубинах 3÷7 км, которые составляют 153÷157 Гц, и резонансные частоты затрубного пространства - 113÷114 Гц, что позволяет рассчитать параметры разрядника и разрядного контура для максимального согласования и передачи колебаний колонны окружающей среде.

2. Показана возможность создания направленного излучения в зоне коллектора при времени ввода энергии в разрядный промежуток порядка 5 мкс.

3. Противоречивость требований согласования высокочастотного

излучения электрогидравлического разряда с достаточно низкочастотными резонансными частотами колонны и окружающей среды может быть разрешена путем создания специальных акустических преобразователей большой мощности и требует дополнительных исследований.

Список литературы: 1. Загривный Э.А. Перспективы использования комплексов для повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью / Э.А. Загривный, А.Е. Козярук, В.И. Маларев, Е.Е. Мельникова // Электротехника. – 2010. – №2. – С. 9 – 15. 2. Федьинский В.В. Разведочная геофизика. Геофизические методы исследования земной коры и разведки полезных ископаемых. – М. : Недра, 1967 - 269 с. 3. Гурин А.Г. Сейсморазведочный комплекс излучателей для мониторинга запасов нефти и интенсификации ее добычи из действующих скважин / А.Г. Гурин, С.П. Мостовой, В.В. Пидашов, О.Н. Ярмач // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Тем. випуск "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів". - Х. : НТУ "ХПІ". - 2010. - №55. - С. 23 – 32. 4. Александров Е.Е. Колебания в транспортных машинах / Е.Е. Александров и др. – К. : ВИПОЛ, 1996. – 256 с. 5. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Ред. В.Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1980. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф.М. Диментберга, 1980. – 544 с. 6. Пат. 40339, Україна, МПК Е 21В 43/16.Спосіб інтенсифікації видобутку нафти / А.Г. Гурин, С.П. Мостовий, О.М. Ярмач.- № u2008 08662. Заявлено 01.07.2008. Опубл. 10.04.2009, Бюл. №7.- 3 с.

Поступила в редколлегию 20.01.11

А.А. ЗАГАЙНОВА, ассистент, НТУ «ХПИ»

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

У статті проведено аналіз методів і засобів контролю електричних параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних вводов та вимірвальних трансформаторів під робочою напругою. Розглянуті схеми вимірювань під робочою напругою, їх принципиальні можливості та недоліки.

В статье проведен анализ методов и средств контроля электрических параметров внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов под рабочим напряжением. Рассмотрены схемы измерений под рабочим напряжением, их принципиальные возможности и недостатки.

The article analyzes the methods and means of monitoring the electrical parameters of the internal insulation of high-voltage bushings and measuring transformers under operating voltage. A scheme for measuring the working voltage of the fundamental capabilities and limitations.

Постановка проблемы. В настоящее время энергосистемы Украины внедряют различные системы непрерывного контроля внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов. Резко активизировалась деятельность большого числа организаций и специалистов в этом направлении. Однако большинство предлагаемых схем не позволяет измерить реальные электрические характеристики вводов или трансформаторов тока. И уже есть случаи, когда отбраковывалось исправное оборудование из-за погрешностей схемы измерений, а после замены его произошло повреждение вновь установленного оборудования.

Поэтому сейчас достаточно актуально сравнить методы и схемы измерений непрерывного контроля внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов и рассмотреть их диагностические возможности, достоинства, их недостатки, соответствие нормативным документам. Такое сравнение позволит эксплуатационному персоналу энергосистем ориентироваться при выборе схем измерений под рабочим напряжением при их внедрении или оценить уже внедрённые схемы.

Самым главным при оценке методов и схем измерений внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов должны быть их возможности выявления дефектов, которые характерны для изоляции конденсаторного типа маслонаполненного высоковольтного оборудования и развитие которых действительно приводит к повреждению оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций. Высоковольтные вводы и трансформаторы тока (ТТ) – наиболее часто повреждаемые элементы в энергосистемах. Подвергаемые значительным температурным и электрическим нагрузкам, вводы и ТТ являются одними из основных элементов в отказах электротехнического оборудования [1].

Для создания эффективной системы диагностики необходимо точно знать действительную причину повреждений оборудования, то есть определить тот дефект, который привел к повреждению. Как правило, это достаточно сложная задача, однако без её решения невозможно исключить повторение повреждений. Легко убедиться в том, что все повреждения происходят по одной единственной причине – из-за нерасчетных эксплуатационных воздействий на оборудование.

Появление типичных дефектов, возникающих в маслонаполненных вводах 110-500 кВ, и их последующее развитие обусловлено следующими факторами: нарушениями технологической дисциплины в процессе изготовления; нарушениями требований нормативно-технической документации по хранению, монтажу и эксплуатации вводов или оборудования, на котором они установлены; снижением диэлектрических свойств изоляции в результате ускоренного старения, вызванного взаимодействием конструкционных материалов или ионизационными процессами.

В герметичных маслонаполненных вводах наиболее часто встречаются следующие виды дефектов: перегрев внутренних контактов; пробой остова; наличие частичных разрядов в изоляционном остове; увлажнение и старение внутренней изоляции ввода; течь масла; образование в масле желтого проводящего осадка и отложение его на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки при повышенной напряженности электрического поля и(или) повышенной температуре масла. Этот процесс может привести к перекрытию ввода по внутренней поверхности фарфоровой крышки [2].

Отложение осадка повышает тангенс угла диэлектрических потерь масла ($\text{tg}\delta$) во вводе до 20-40 % и более. О степени ухудшения изоляции можно судить по увеличению $\text{tg}\delta$ наружных слоев изоляции, $\text{tg}\delta$, возможно увеличение концентрации горючих газов. Большинство отказов негерметичных вводов 110-220 кВ связано с пробоем или перекрытием внутренней изоляции, а также механическими повреждениями фарфоровых крышек (характерно для вводов масляных выключателей).

Для трансформаторных негерметичных вводов преобладающими видами дефектов внутренней изоляции являются окисление масла, рост $\text{tg}\delta$ основной изоляции, ухудшенное состояние наружных слоев изоляции. Для негерметичных вводов масляных выключателей характерными являются увлажнение масла и ухудшение состояния наружных слоев изоляции.

Для «холодных» негерметичных вводов масляных выключателей,

заполненных маслом ГК, самым распространенным дефектом является воскообразование вследствие развития ионизационных процессов в бумажно-масляной изоляции ввода. Во вводах, залитых маслом ГК, наблюдается повышенное газовыделение, что может способствовать быстрому развитию дефекта.

Для оценки эксплуатационного состояния высоковольтных вводов применяются разные методы и средства диагностики, связанные как с отключением оборудования от сети, так и с проведением измерений под рабочим напряжением без отключения оборудования [3].

Наиболее известны следующие виды испытаний высоковольтных маслонаполненных вводов: измерение электрических характеристик различных слоев изоляции вводов (сопротивление, $\text{tg}\delta$ и емкость изоляции), наблюдение за давлением в герметичных вводах, ХАРГ масла из вводов, определение $\text{tg}\delta$ из вводов (особенно заполненных маслом Т-750), определение характеристик частичных разрядов, тепловизионный контроль.

Итак, повреждения оборудования чаще всего происходят из-за местных дефектов. В тоже время Нормы ориентированы на выявление распределенных дефектов, поэтому и происходят повреждения оборудования, которое испытывалось в соответствии с Нормами.

Цель, задачи исследования. В настоящее время возросли требования к эффективности, оперативности управления и организации процесса эксплуатации электрооборудования.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что совершенствование критериев диагностики и методов анализа диагностической информации повышает объективность оценки технического состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования, и, следовательно, позволяет планировать и своевременно проводить необходимые операции технического обслуживания и ремонта, что делает надежнее эксплуатацию электрооборудования, продлевает ресурс его работы, экономит средства, снижает риски ущерба.

Таким образом, создание информационных аналитических систем, осуществляющих достоверную, многоаспектную оценку технического состояния оборудования с использованием новых методов и критериев оценки, которые повышают оперативность и качество организации технического обслуживания оборудования и способствуют обучению персонала, является актуальной задачей.

Основной материал исследований. В основе методики контроля изоляции, в частности, емкости ввода и тангенса диэлектрических потерь, лежат два явления:

- ток через изоляцию ввода практически пропорционален емкости. Изменение емкости C_1 вызывает пропорциональное изменение тока;

- изменение тангенса угла диэлектрических потерь изменяет активную составляющую тока через изоляцию ввода и также отражается в токе небаланса [3]:

$$\gamma = \left| \frac{\Delta Y}{Y} \right| \approx \sqrt{(\Delta \text{tg}\delta)^2 + (\Delta C / C_0)^2}. \quad (1)$$

Наиболее распространённым методом контроля изоляционных характеристик высоковольтных вводов и трансформаторов тока под рабочим напряжением является неравномерно-компенсационный метод. Метод основан на измерении суммы трехфазной системы токов, протекающих через изоляцию трех однотипных объектов или трех фаз одного объекта. При равенстве токов исправных объектов и симметрии фазных напряжений сумма токов равна нулю. Кроме того, принцип метода суммы токов основан и на том факте, что в трехфазной системе напряжения на шинах равны и параметры вводов (или трансформаторов тока) идентичны, при этом векторная сумма токов через измерительные выводы вводов будет равна нулю. Ток ввода представляет собой токи утечки из-за емкостного тока или тангенса угла потерь.

В действительности вводы всегда различаются, также как и напряжения на шинах. Как следствие, будет присутствовать малая начальная сумма токов, уникальная для каждой тройки вводов. Когда изоляция одного из вводов начинает ухудшаться, его емкость и/или тангенс будут изменяться и, соответственно, сумма токов будет отличаться от начального значения. Таким образом, состояние изоляции ввода среди тройки может быть определено оценкой изменения суммы токов. Однако режимы работы энергосистемы существенно влияют на взаимные углы между векторами фазных напряжений. Используемая в приборах схема определения «относительных тангенсов» углов потерь вводов, имеет высокую точность только в том случае, когда взаимные углы между векторами фазных напряжений системы стабильны, и равны 120 градусам. Все изменения этих углов автоматически приводит к погрешностям в расчетах и, что очень вероятно, к необоснованным диагностическим заключениям.

К наиболее значимым причинам, влияющих на величины взаимных углов векторов фазных напряжений, можно отнести следующие причины.

1. Подключение контролируемого трансформатора к энергосистеме при помощи сравнительно длинной линии. При изменении нагрузки, в трехфазной системе напряжений, происходит изменение углов между векторами фазных напряжений. Причина этого достаточно проста – неравенство реактивных сопротивлений линии по фазам. Углы между векторами напряжения фаз энергосистемы могут в некоторых случаях составлять не ровно 120 градусов, а $120 \pm 0,8$ угловых градусов. Это может привести к погрешности измерения тока небаланса до 1 – 2%, а в расчетные тангенсы внести погрешность до 30% от базового значения. Основной причиной таких изменений служит неравенство параметров фаз длинной

линии. При протекании по линии тока нагрузки падения напряжения по фазам будет различным, что и приведет к угловым перекосам векторов фазных напряжений. Аналогичная картина может наблюдаться при несимметрии токов нагрузки по фазам.

2. Связь вектора небаланса с нагрузкой трансформатора будет иметь место в случае, если контролируются вводы стороны НН (СН) трансформатора. Причиной этого будет то, что перекося фазных напряжений может происходить за счет неравенства параметров схемы замещения трансформатора, определяемых комплексным сопротивлением Z_k фаз. Такое неравенство может возникнуть при изготовлении трансформатора (в средней фазе трансформатора на одном сердечнике), при переключении РПН, а также за счет изменения формы обмоток после воздействия токов короткого замыкания.

3. Изменение взаимных углов векторов фаз питающей сети может возникнуть при изменении схемы включения трансформатора в энергосистему. Например, если к узлу энергосистемы, в котором расположен контролируемый трансформатор, подключить дополнительную линию, то, чаще всего, вектор небаланса токов проводимости вводов изменит свое значение. Причина этого вполне очевидна – изменятся сопротивления фаз энергосистемы, изменятся падения напряжения в фазах в различных режимах работы.

4. Связь между расчетными параметрами состояния вводов и нагрузкой трансформатора может возникнуть при наличии в узлах энергосистемы регулируемых компенсаторов реактивной мощности. При изменении объема реактивной мощности, протекающей по линиям, возможно изменение падения напряжения на фазах этих линий.

5. При изменении направления движения энергии через контролируемый трансформатор также может произойти изменение углов между фазными векторами питающей сети. Такой режим возможен, например, в трансформаторах, обслуживающих ГАЭС. При переходе гидроаккумулирующей установки, из режима генератора в режим электродвигателя, угол между векторами фазных напряжений в сети, чаще всего, изменяется.

6. При сезонных изменениях параметров энергосистемы тоже могут происходить изменения углов между векторами фазных напряжений. Причин этому может быть несколько. Это изменение энергопотребления по сезонам, изменение структуры генерирующих мощностей в энергосистеме, влияние погодных условий на линии электропередачи.

Как видно из приведенного перечня причин, влияющих на взаимные углы векторов фазных напряжений в энергосистеме, учет таких явлений является очень сложным.

Самой распространённой схемой измерения, использующей неравновесно-компенсационный метод, следует считать устройство контроля

изоляции вводов КИВ-500. Уже многие годы отмечается, что это устройство срабатывает только при взрыве ввода, и его назначение сводится к включению системы пожаротушения трансформатора.

КИВ не способен заметить дефект ввода даже в опасной стадии развития, так как его сигнальный элемент согласно инструкции по эксплуатации КИВ [4] должен быть настроен на 5-7% номинального тока ввода. Поэтому, если во вводе появится дефект, то он повредится задолго до того как сработает КИВ. На основании этого можно сделать вывод, что использование таких устройств для вводов 110-750 целесообразно только при повышении чувствительности и расширении возможностей.

Неравновесно-компенсационный метод используется и в появившихся позднее микропроцессорных системах мониторинга параметров изоляции вводов под рабочим напряжением IDD («Doble Engineering Co.», США) и R1500 (фирма «Вибро-Центр», Россия).

Нормы ГKD 34.20.302-2002 [5] и СОУ-Н МПЕ 40.1.46.-301-2006 диагностику вводов и ТТ под рабочим напряжением разрешают выполнять двумя методами: измерением комплексной проводимости Y или измерением tgd и емкости.

При измерении комплексной проводимости необходима очень высокая чувствительность схемы измерения, при которой невозможно отстроиться от влияний изменения характеристик элементов самой измерительной схемы. Эти изменения приводят к частым ложным срабатываниям схемы из-за появления тока небаланса. Опыт эксплуатации этой схемы в ряде энергосистем только отрицательный и по результатам его эти схемы выведены из эксплуатации.

Характерными дефектами для ТТ являются местные дефекты, развитие которых приводит либо к тепловому пробое, либо к появлению частичных разрядов и электрическому пробое основной изоляции. Такие дефекты на ранней стадии развития могут быть обнаружены измерениями тангенса угла диэлектрических потерь под рабочим напряжением и тепловизионными измерениями.

Эти измерения выполняются мостовыми схемами [6], которые обеспечивают контроль каждой фазы отдельно. В мостовых схемах производится сравнение параметров контролируемых объектов и объектов, принятых в качестве образцовых. Схемы измерений различаются способами построения ветви сравнения. Применяются схемы с образцовым конденсатором, питаемый от ТН той системы шин, к которой подключен контролируемый объект. Другие схемы обеспечивают сравнение параметров двух объектов, один из которых принимается в качестве образцового. К недостаткам мостовых схем относится большое время для уравнивания моста, а к преимуществам – высокая точность измерений.

Известен ваттметровый метод [3], который дает совпадение результатов измерений tgd изоляции вводов и трансформаторов тока на 330 кВ

с данными измерений мостовой схемой при напряжении 10 кВ. Метод основан на измерении мощности потерь. Цепи напряжения схемы питаются от вторичной обмотки трансформатора напряжения подстанции, а токовые цепи – через согласующий трансформатор тока. Согласующий трансформатор тока необходим также для развязки цепей заземления объекта и трансформатора напряжения. Погрешности измерения по этому методу вызваны током влияния и угловыми погрешностями измерительных трансформаторов тока и напряжения. Случайная составляющая погрешности измерения рассматриваемым методом практически совпадает с соответствующей составляющей погрешности измерения под рабочим напряжением мостовым методом.

Для определения параметров изоляции вводов наибольшее применение в настоящее время получили векторные измерители. Эти переносные, современные приборы, позволяющие измерять амплитуды и взаимные углы двух векторов. Однако применение стандартных приборов этого типа для измерения параметров вводов в режиме «on-line» затруднено, так они позволяют сравнивать между собой только два вектора. В трехфазной системе, применяя сравнительную схему измерений, удобнее использовать многофазные векторные измерители, которые сравнивают между собой сразу все контролируемые вектора.

Первым прибором, предназначенным для одновременного измерения параметров трех вводов, является 4-х канальный векторный измеритель марки «VV-Tester», производства фирмы «Вибро-Центр». К трем входам этого прибора, одновременно, подключаются кабельные линии от трех датчиков «DB-1,2». К четвертому каналу прибора может быть подключен один сигнал от измерительного трансформатора напряжения. Прибор имеет аккумуляторное питание, небольшие габариты и небольшой, не более 2 кг, вес. Дополнительной функцией прибора «VV-Tester» является возможность измерения частичных разрядов в контролируемых вводах.

Прибор подключается при помощи трех коаксиальных кабелей к плате «УП-500» и, в автоматическом режиме, проводит комплексное измерение токов проводимости и частичных разрядов одновременно в трех вводах одной трехфазной группы.

Для наиболее ответственного оборудования следует использовать стационарные приборы контроля параметров вводов. У фирмы «Вибро-Центр» имеется несколько таких приборов.

- Прибор «R1500» предназначен для контроля состояния трех вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1.

- Прибор «R1500/6» предназначен для контроля состояния шести вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, величину Zk обмоток.

- Прибор «R1600» предназначен для контроля состояния шести вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, уровень частичных разрядов, величину Zk обмоток.

- Прибор «ТТ-Monitor» предназначен для контроля состояния трех измерительных трансформаторов тока. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, уровень частичных разрядов.

Все эти приборы работают с комплексными датчиками тока проводимости и частичных разрядов вводов «DB-1,2». Для наиболее сложных приборов применяются дополнительные датчики частичных разрядов, которые так же производит фирма «Вибро-Центр».

Выводы. Накоплен достаточный опыт диагностики под рабочим напряжением, позволяющий отказаться от диагностики с отключением при переходе на измерения под рабочим напряжением. Эффективно выявлять местные дефекты на ранней стадии развития можно только используя диагностику под рабочим напряжением.

Оценка фактического состояния силового электрооборудования по результатам диагностических измерений является на сегодняшний день очень сложной и актуальной задачей.

Повышение достоверности контроля идет по пути совершенствования как методов измерения, например, использования одновременно двух методов измерений – мостового и неравновесно-компенсационного, так и устройств контроля. Однако, необходимо тщательно анализировать возможности методов и внедрять только действительно эффективные.

Список литературы: 1. Чичинский М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния / М.И. Чичинский // Энергетика. – 2000. – №11. – С. 29-31. 2. Евсеев Ю.А. О причинах повреждаемости высоковольтных герметичных вводов с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / Ю.А. Евсеев, С.Д. Кассихин, И.П. Куликов и др. // Электрические станции, 1989. – № 1. 3. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М Сви. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 239 с. 4. МУ 34-70-39-83. Методические указания по техническому обслуживанию устройства КИВ.-М.:СПО Союзтехэнерго. 1983 – 32 с. 5. ГКД 34.20.302-2002. Нормы випробування електрообладнання. Затверджені Наказом № 503 від 28.08.02 Міністерства енергетики України. – К. : ГРИФРЭ, 2002. 6. Сви П.М. Совершенствование устройств контроля трансформаторного оборудования с учетом опыта эксплуатации / П.М.Сви, В.Смекалов // Повышение надежности и эффективности контроля трансформаторов в эксплуатации. – Запорожье, 1996.

Поступила в редколлегию 20.01.11

А.А. ЗАДЕРИХИН, инженер, ГП «НИИВН», Славянск;
Ю.Н. ШУМИЛОВ, д-р. техн. наук., проф., ГП «НИИВН», Славянск;
М.Ю. ШУМИЛОВ, канд. техн. наук, инж., ГП «НИИВН», Славянск;
В.Н. ТАРАН, инженер, ГП «НИИВН», Славянск

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ 220...400 кВ МОДУЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

В статье приведен обзор конструкции и технических характеристик ограничителей перенапряжений классов 220; 330 и 400 кВ модульного исполнения в полимерных корпусах, разработанных предприятием НИИВН.

У статті наведено огляд конструкції та технічних характеристик обмежувачів перенапруг класів 220; 330 і 400 кВ модульного виконання в полімерних корпусах, розроблених підприємством НДІВН.

An overview of design and technical specifications of modular design surge arresters in polymer housings 220; 330 and 400 kV classes developed by High Voltage Scientific Research Institute.

Для защиты электрооборудования классов напряжения 220...400 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений в энергосистемах Украины традиционно используют вентильные разрядники (ВР) с искровыми промежутками.

Вентильные разрядники имеют ряд недостатков, основные из которых связаны с наличием искровых промежутков и недостаточной нелинейностью вольтамперной характеристики рабочих резисторов, изготовленных из вилита или тервита. Величина пробивного напряжения воздушных искровых промежутков зависит от многих факторов – температуры, влажности и давления воздуха, скорости нарастания напряжения и т. д.; время формирования каналов пробоя в промежутках составляет величину порядка 10 мкс, вследствие чего вентильные разрядники недостаточно эффективны при воздействии импульсов с величиной фронта 1...3 мкс. Кроме того, необходимость быстрого и надежного гашения дуги, возникающей в искровом промежутке при срабатывании разрядника, дополнительно усложняет конструкцию разрядника и уменьшает надежность его работы. С другой стороны, нелинейные резисторы из вилита и тервита имеют сравнительно не большую нелинейность вольтамперной характеристики ($\beta = 3...6$), поэтому при протекании больших токов на них возникает достаточно высокое остаточное напряжение.

Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) имеют по сравнению с вентильными разрядниками ряд преимуществ:

- глубокий уровень ограничения всех видов перенапряжений;

- отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения;
- сравнительная простота конструкции и высокая надежность в эксплуатации;
- стабильность характеристик и устойчивость к старению;
- способность к рассеиванию больших энергий импульсов;
- существенно меньшие габариты и вес.

В связи с вышеперечисленными недостатками вентильные разрядники практически везде уже сняты с производства и, поскольку используемые разрядники в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок, происходит постепенная замена устаревших вентильных разрядников 220-400 кВ на современные нелинейные ограничители перенапряжений. При проектировании новых линий электропередачи, подстанций и т. п. вентильные разрядники не применяют, а ОПН используют в энергосистемах все чаще.

С учетом указанных обстоятельств в ГП «НИИВН» были разработаны ограничители перенапряжений классов 220; 330 и 400 кВ с пропускной способностью 850 А. Отдельные электрические характеристики ОПН приведены в табл. 1.

Таблица 1-Характеристики ограничителей перенапряжений
производства ГП «НИИВН»

Класс напряжения, кВ	U _{нр} , кВ	I _н , кА	I ₂₀₀₀ , А	I _{4/10} , кА	Остающееся напряжение U _{ост} , кВ, при импульсах, мкс				Класс разряда линии
					8/20, 5 кА	8/20, 10 кА	30/60, 500 А	30/60, 1000 А	
220	156	10	850	100	463	535	412	429	3
330	230	10	850	100	650	750	576	600	3
400	267	10	850	100	865	1000	672	700	3

Условные обозначения:
 U_{нр} – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение (действующее значение);
 I_н – номинальный разрядный ток с формой волны 8/20 мкс;
 I₂₀₀₀ – пропускная способность на прямоугольном импульсе тока длительностью 2000 мкс;
 I_{4/10} – выдерживаемый импульс большого тока 4/10 мкс

Ограничители перенапряжений собраны из двух параллельных колонок и имеют модульное исполнение: каждая из двух колонок ОПН класса 220 кВ состоит из двух модулей, а ОПН классов 330 и 400 кВ – из трех модулей (рис. 1), соединенных последовательно. Модули изготовлены в полимерном корпусе с трекинговой защитной оболочкой в соответствии с требованиями стандартов к испытательным напряжениям грозового импульса, напряжению промышленной частоты под дождем и трекинг-эрозионной стойкости.

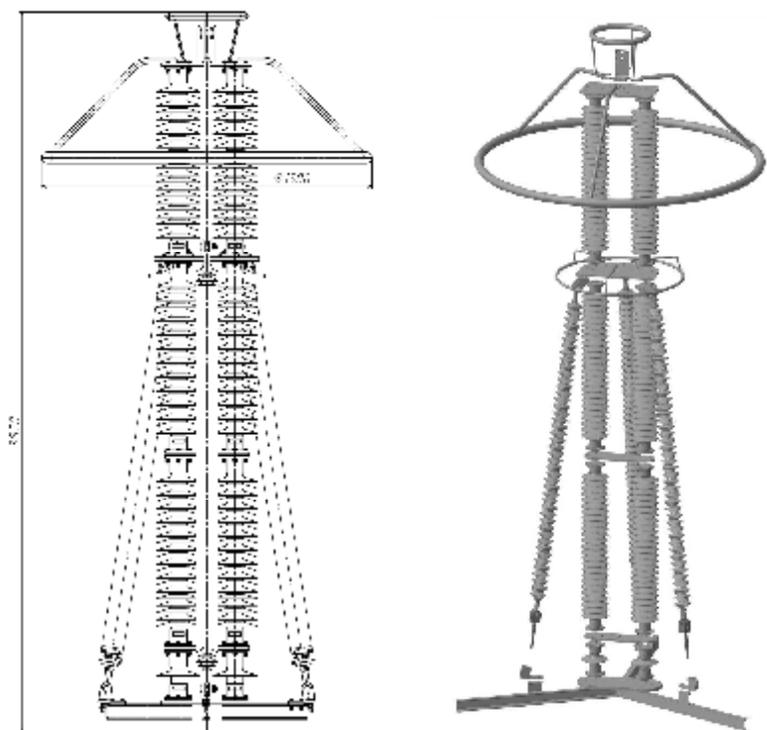


Рис. 1 – Ограничитель перенапряжений ОПНп-400/267/10/850

Модули ограничителей перенапряжений состоят из колонки металлоксидных варисторов с электродами, полимерного корпуса и соединительных фланцев. Основой полимерного корпуса модуля является стеклопластиковая труба, внутри которой размещена колонка варисторов. В стеклопластиковой трубе (под защитной оболочкой) имеется ряд отверстий для сброса давления газов, что предотвращает разрушение ограничителя в случае аварийного электрического пробоя колонки. Пространство между колонкой варисторов и внутренней поверхностью стеклопластиковой трубы для повышения внутренней электрической прочности корпуса и обеспечения монолитности конструкции заполнено низкомолекулярным кремнийорганическим каучуком холодной вулканизации. Защитная ребристая оболочка выполняется из кремнийорганической резины.

Металлические фланцы закрепляются на трубе с помощью клеерезьбового соединения. Герметизация на участке стыка «фланец – стеклопластиковая труба – силиконовая оболочка» осуществляется с помощью

высокопрочного силиконового герметика холодного отверждения типа RTV. Необходимое контактное усилие между варисторами и электродами создается с помощью пружины, рассчитанной на соответствующую нагрузку.

Отдельные модули в конструкции ограничителя перенапряжений соединены между собой с помощью металлических пластин, расположенных между фланцами соседних модулей для увеличения устойчивости всей конструкции, и болтовых соединений (схема монтажа ограничителя представлена на рис. 1). С целью повышения механической прочности ОПН колонки, соединенные между собой пластинами, дополнительно закреплены изолирующими полимерными растяжками. Каждая колонка устанавливается на изолирующем основании, что обеспечивает возможность подключения регистратора срабатывания ОПН и измерения тока проводимости.

Ограничители 220...400 кВ комплектуются электростатическими тороидальными экранами для обеспечения равномерного распределения напряжения вдоль колонки варисторов при рабочем напряжении.

В настоящее время в ГП «НИИВН» освоено производство ограничителей перенапряжений 220; 330 и 400 кВ, и они с 2010 г. поставляются на энергетические предприятия Украины.

Список литературы: 1. Касаткин Г.С. Варисторы, их свойства и применение: уч. пособие / Г.С. Касаткин, В.В. Федотов. – М. : МИИТ, 2010. – 40 с. 2. Александров Г. Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях: уч. Пособие / Г. Н. Александров. – СПб. : Центр подготовки кадров энергетики, 2003. – 192 с. 3. Дмитриев В. Подстанции 110-750 кВ. Защита оборудования от перенапряжений / В. Дмитриев, М. Дмитриев // Новости электротехники. – 2004. – № 6. 4. Дмитриев М. Применение ОПН в сетях 110-220 кВ. Факторы риска – квазистационарные перенапряжения / М. Дмитриев // Новости электротехники. – 2006. – № 5.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

В. У. КИЗИЛОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А. П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Н. В. РУДЕВИЧ, канд. техн. наук доц., НТУ «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПЕРАТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрен способ повышения точности клещевых трансформаторов тока включением их на "отрицательное" сопротивление, которое равняется сопротивлению вторичной обмотки. Приведены результаты измерения погрешностей. Показано, что возможно последующее снижение погрешностей путем уменьшения сопротивления контура на выходе трансформатора тока.

Розглянуто спосіб підвищення точності клещових трансформаторів струму включенням їх на "негативний" опір, який дорівнює опорі вторинної обмотки. Приведені результати вимірювання похибок. Показано, що можливе подальше зниження похибок шляхом зменшення опору контура на виході трансформатора струму.

The method of increase of exactness of ticks transformers of current by including is considered them on negative resistance equal to resistance of the second puttee. The results of measuring of errors are resulted. It is rotined that possibly further decline of errors by diminishing of resistance of contour on the output of tick transformer of current.

Использование клещевых трансформаторов тока (КТТ) значительно повышает оперативность измерений в релейной защите и средствах учета электроэнергии. В связи со снижением потребления электроэнергии многими предприятиями их ток значительно уменьшился, что требует снижения пределов измерения КТТ до 10-50 мА.

При использовании КТТ на их погрешности существенно влияет конструкция и, особенно, зазор в месте разъема сердечника. Мельчайшие пылинки в зазоре могут привести к значительным погрешностям. Не случайно выпускавшийся вольтамперфазометр ВАФ 85М имел класс точности 4.0.

Использование в КТТ электронной компенсации погрешности, при которой сердечник КТТ не перемагничивается, обеспечивает значительное уменьшение погрешностей. Целесообразно выбрать схему компенсации, в которой не требуется дополнительных обмоток на сердечнике или дополнительного сердечника. Такой схемой электронной компенсации является схема, в которой КТТ нагружен на "отрицательное" сопротивление равное сопротивлению вторичной обмотки КТТ r_{w2} (рис.1).

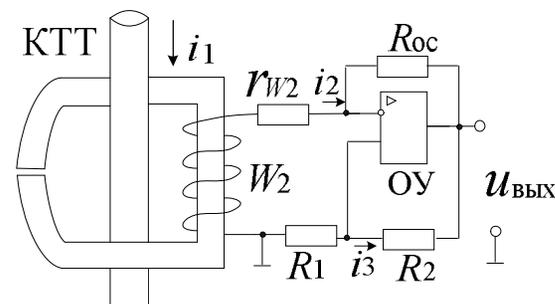


Рис.1

Рассмотрим контур из обмотки W_2 , ее сопротивления r_{w2} , входной ЭДС ОУ e_{oy} и резистора R_1

$$W_2 S \frac{dB}{dt} = r_{w2} i_2 - R_1 i_3 - e_{oy}, \quad (1)$$

где B - индукция в сердечнике КТТ,

S - поперечное сечение сердечника КТТ,

i_2 - ток вторичной обмотки КТТ,

i_3 - ток положительной обратной связи КТТ.

Если выбрать R_1 так, чтобы выполнялось равенство

$$r_{w2} i_2 = R_1 i_3, \quad (2)$$

то учитывая, что e_{oy} близко к нулю, получим $W_2 S \frac{dB}{dt} = 0$,

откуда

$$\frac{dB}{dt} = 0. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что сердечник КТТ в этом случае не перемагничивается, а, следовательно, в любой момент времени индукция B и напряженность магнитного поля в сердечнике H равны нулю и согласно закону полного тока выполняется соотношение

$$i_1 = W_2 i_2 + Hl, \quad Hl = 0. \quad (4)$$

Условие (4) не зависит в определенных пределах от зазора в сердечнике и положения провода в окне сердечника.

Выходное напряжение ОУ

$$u_{\text{вых}} = -(r_{w2} + R_{oc}) i_2, \quad (5)$$

где R_{oc} - сопротивление отрицательной обратной связи ОУ.

Подставив выражение (4) в (5) получим

$$u_{\text{вых}} = -(r_{w2} + R_{oc}) \frac{i_1}{W_2} = -(R_1 + R_2) i_3, \quad (6)$$

где R_2 – сопротивление положительной обратной связи ОУ.

Видно, что напряжение на выходе операционного усилителя пропорционально входному току i_1 в любой момент времени и, следовательно, точно передается форма тока со всеми его гармониками.

Реализация изложенной электронной компенсации в ВАФ типа 4303 Житомирского завода «Электроизмеритель» позволила достичь класса точности 1.0 при расширении шкал тока с 10А, 5А, 1А до 50мА [1].

Полученные результаты показали эффективность использованной схемы электронной компенсации, но оставалось не ясным, почему не достигнут более высокий класс точности. Казалось, что причина заключается в том, что внутреннее сопротивление обмотки W_2 учитывалось только активной составляющей r_{w2} и не учитывалась ее индуктивность рассеяния. Были проведены опыты и расчеты по ее учету, но оказалось, что это не объясняет полученных уровней погрешностей.

Дальнейшие исследования позволили предположить, что точность преобразования тока ограничена помехами в выходном контуре КТТ. Необходимо было уменьшить сопротивление этого контура. Сопротивление R_1 составляло 250±300 Ом и его исключение в устройстве по схеме рис.2 позволило значительно уменьшить погрешности по сравнению с устройством по схеме рис.1 [2].

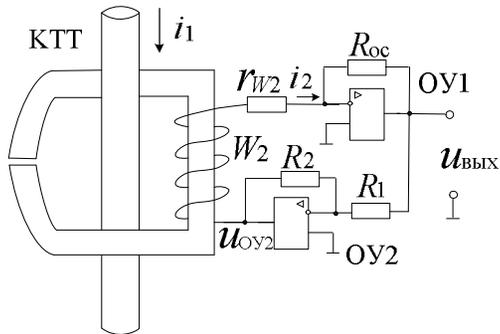


Рис.2

Для контура на выходе КТТ справедливо уравнение

$$W_2 S \frac{dB}{dt} - r_{w2} i_2 - u_{oy2} = 0, \quad (7)$$

где u_{oy2} – выходное напряжение второго операционного усилителя.

Если $u_{oy2} = i_2 r_2$, то $\frac{dB}{dt} = 0$, что имеет место при

$$R_2 = \frac{r_{w2} R_1}{r_{w2} + R_{oc}}. \quad (8)$$

В отличие от устройства по рис. 1 в устройстве по рис.2 исключено в контуре на выходе КТТ сопротивление R_1 , так как выходное сопротивление усилителя ОУ2 близко к нулю.

На рис.3 показаны кривые зависимости относительной погрешности модуля тока и фазовой погрешности от действующего значения тока i_1 в зависимости от схемы компенсации (1 – КТТ без компенсации, 2 – КТТ по схеме рис.1, 3 – КТТ по схеме рис.2).

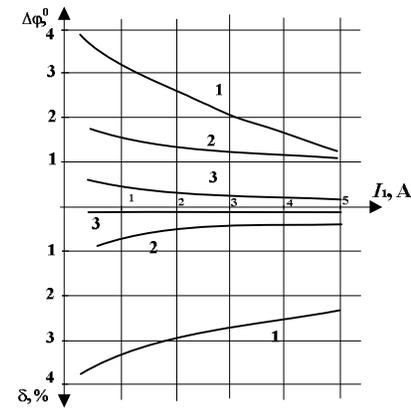


Рис.3

Значительное снижение погрешностей в устройстве по рис. 3 свидетельствует о правильном определении источника погрешностей. Поскольку сопротивление r_{w2} определено заводом изготовителем, то целесообразно рекомендовать его уменьшение увеличением в два раза диаметра обмотки W_2 . Испытания КТТ по схеме рис.2 показали возможность получения класса точности 0.2.

Список литературы: 1. Кизилев В.У. Прибор для оперативного контроля электрических параметров / В.У.Кизилев, А.И.Чернявский. // Энергетик. – 1993. – №3. – С.14-15. 2. Пат. 85222 Украина, МПК⁶ G 01 R 19/00. Вимірювальний перетворювач струму в напругу / Кизилев В. У.; заявник та патентовласник Кизилев В. У. – № а 2006 10624; Заявл. 09.10.2006; Опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.

Поступила в редколлегию 03.11.10

КИМ ЕН ДАР, д-р.техн.наук, проф., УИПА, Харьков;
В.Н.ТАРАН, инженер, ГП «НИИВН», Славянск

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО БРАКОВОЧНОГО УРОВНЯ $tg\delta$ ДЛЯ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Показана корреляционная зависимость между уровнем дефектных изоляторов в эксплуатации и распределением величины $tg\delta$ изоляторов. Представлены критерии определения оптимального уровня $tg\delta$ для браковки дефектных изоляторов. Приведен алгоритм оценивания состояния изоляторов в эксплуатации.

Показано кореляційну залежність між рівнем дефектних ізоляторів в експлуатації та розподілом величини $tg\delta$ ізоляторів. Надані критерії визначення оптимального рівня $tg\delta$ для бракування дефектних ізоляторів. Приведено алгоритм оцінювання стану ізоляторів в експлуатації.

Has been shown correlation between failure insulators' layer and quantity of $tg\delta$ for insulators distribution. Have been reduced $tg\delta$ optimal layer criteria for failure insulators rejection. Has been given assessment algorithm for insulators' state during the usage.

Согласно «Правилам технического обслуживания и ремонта контактной сети электрифицированных железных дорог» в контактной сети тарельчатые фарфоровые изоляторы подвергаются сплошному контролю с установленной периодичностью [1]. Контроль заключается во внешнем осмотре изоляторов и выявлении нулевых изоляторов различными способами. Обследование демонтированных изоляторов и их лабораторные исследования показывают, что основным фактором ухудшения фарфоровых изоляторов является механическое воздействие, которому они подвергаются в процессе эксплуатации [2]. При этом конечным исходом потери работоспособности этих изоляторов является потеря электрической прочности, а не механическое разрушение. В тоже время «зануление» изоляторов практически не оказывает влияние на их механическую прочность, что подтверждается многолетней практикой проведения электро-механических испытаний. Таким образом, надежность работы сети определяется практически внутренней электрической прочностью изоляторов, а не их механической прочностью, и отказы сети обуславливаются электрическим отказом всех последовательно соединенных изоляторов в гирлянде.

В свою очередь, была выявлена тесная корреляционная связь между электрическим состоянием изоляторов и величиной тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$). Установлено, что для фарфоровых изоляторов, удовлетворяющих техническим требованиям, значения $tg\delta$ лежат в диа-

пазоне 0,015-0,030. Однако под действием долговременных внешних нагрузок исходное распределение подвергается деформации в сторону больших значений, что свидетельствует о появлении электрически ослабленных изоляторов в процессе эксплуатации.

Сравнение методов контроля изоляторов показали высокую эффективность дефектировки изоляторов по величине $tg\delta$ по сравнению с применяемой на практике методикой их отбраковки с помощью мегомметра или измерительной штанги [2, 3]. При неразрушающем способе диагностики, к которому относится отбраковка изоляторов путем измерения $tg\delta$, всегда существует риск отбраковки кондиционных (пригодных к эксплуатации) изделий и риск «недоотбраковки» дефектных изоляторов.

На рис. 1 приведены две функции распределения величины $tg\delta$, подчиняющиеся закону Вейбулла. Они построены по результатам измерений и испытаний изоляторов, демонтированных с контактных сетей различных железных дорог стран СНГ [3]. Восходящая функция

$$F_1 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{tg\delta}{a_1}\right)^{b_1}\right] \quad (1)$$

представляет собой функцию ошибки «недоотбраковки» дефектных изоляторов, если отбраковка проводилась бы при принятой величине $tg\delta$ и $tg\delta$ изоляторов распределен равномерно (где $a_1=0,21$; $b_1=1,3$). Другими словами данная функция отображает вероятность попадания в эксплуатацию дефектных изоляторов в зависимости от величины браковочного уровня $tg\delta$.

Нисходящая функция F_2

$$F_2 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{tg\delta}{a_2}\right)^{b_2}\right] \quad (2)$$

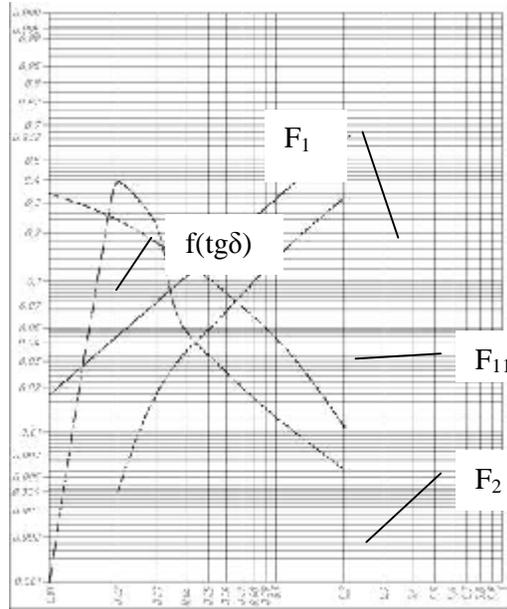
с параметрами распределения: $a_2=0,01$; $b_2=0,5$ устанавливает вероятность того, что после отбраковки изоляторов по величине $tg\delta$ среди отбракованных окажутся годные изоляторы. Поэтому F_2 принимаем как функцию ошибки «переотбраковки».

Наличие этих двух функций позволяет прогнозировать уровни ошибок недоотбраковки и переотбраковки предлагаемой методики для принятого браковочного уровня величины $tg\delta$. Например, как можно видеть из рис. 1, для $tg\delta=0,05$ имеем $F_1=0,14$, $F_2=0,1$.

Если отсутствуют особые требования к рассматриваемому объекту-участку линии и полагается равная весомость ошибок F_1 и F_2 , то в первом приближении оптимальному браковочному уровню $tg\delta_{on}$ будет соответствовать условие минимума суммы ошибок предложенной методики, т. е:

$$F_1 + F_2 = \min. \quad (3)$$

F(tgδ);f(tgδ), отн. ед.



tgδ

Рис.1 – Функции распределения величины tgδ

Для определения искомого браковочного параметра дифференцируем F по x и приравниваем полученное выражение нулю. Получаем:

$$\frac{b_1}{a_1} \left(\frac{tg d_{on}}{a_1}\right)^{b_1-1} \exp\left[-\left(\frac{tg d_{on}}{a_1}\right)^{b_1}\right] - \frac{b_2}{a_2} \left(\frac{tg d_{on}}{a_2}\right)^{b_2-1} \exp\left[-\left(\frac{tg d_{on}}{a_2}\right)^{b_2}\right] = 0. \quad (4)$$

Соотношение (4) можно преобразовать к следующему трансцендентному уравнению.

$$tg d_{on} = \left\{ \frac{a_1^{b_1}}{a_2^{b_2}} \frac{b_2}{b_1} \exp\left[\left(\frac{tg d_{on}}{a_1}\right)^{b_1}\right] - \left(\frac{tg d_{on}}{a_2}\right)^{b_2} \right\}^{\frac{1}{b_1-b_2}}. \quad (5)$$

Подставляя параметры распределения в (5), методом последовательного приближения находим искомую величину $tg d_{on} \cong 0,04$.

Для полученного значения из (1) и (2) при условии равномерного распределения величины tgδ имеем:

$F_1 = 0,11$ - вероятность неотбраковки дефектных изоляторов;

$F_1 = 0,13$ - вероятность отбраковки кондиционных изоляторов.

Вследствие большого объема использованной выборки при выводе исходных функций (1) и (2), они будут правомерны для однотипных фарфоровых изоляторов тарельчатой конструкции. Поэтому для того, чтобы определить реальный уровень электрически ослабленных изоляторов аналогичного типа на заданном участке линии, достаточно знать распределение изоляторов по $tg d$ на этом участке. Если такое распределение f известно, то вероятность недоотбраковки дефектных изоляторов по величине $tg d$ для выбранного участка, что равнозначно, состоянию изоляции, можно оценивать путем интегрирования произведения этого распределения на вероятность F_1 . С этой целью воспользуемся интегралом свертки:

$$F_{11} = \int_{x_0}^x \left[f(x_0)F_1(x) + \int_{x_0}^x F_1(x-z)df(Z) \right] dx, \quad (6)$$

где x, z – текущие значения $tg d \hat{I} (tg d_0; tg d)$; $f(x_0)$ - плотность распределения для минимального измеренного значения $tg d_0$.

Для того чтобы на практике решать задачи определения состояния изоляции на том или ином участке линии на основе соотношения (6) следует:

1. Составить матрицу расчета уровня дефектных изоляторов на основе (6), кторую несложно реализовать на ПК.

tgδ	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x _k
	$f(x_0)F_1(x_0)$	$f(x_0)F_1(x_1)$	$f(x_0)F_1(x_2)$	$f(x_0)F_1(x_3)$	$f(x_0)F_1(x_k)$
		$\Delta f(x_1)F_1(x_0)$	$\Delta f(x_1)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_1)F_1(x_2)$	$\Delta f(x_0)F_1(x_1)$
			$\Delta f(x_2)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_2)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_2)F_1(x_2)$
				$\Delta f(x_3)F_1(x_0)$	$\Delta f(x_3)F_1(x_{k3})$
					$\Delta f(x_k)F_1(x_0)$
$\sum_{i=0}^{k-1} \downarrow$					
$\sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{i-1} \downarrow$					

2. Произвести демонтаж не менее чем 50шт изоляторов с различных точек линии ($N \geq 50$).

3. Определить электронным мостом на частоте 1000Гц значения $tg\delta$ каждого изолятора и установить число n_i изоляторов в каждом заданном диапазоне $tg\delta = (x_i \pm 0,005)$ с шагом $tg\delta = 0,01$. В этом случае имеем:

$$X_i = i \times 0,01.$$

4. Найти долю этих изоляторов в общем объеме демонтированных изоляторов и соответствующие численные значения для заполнения расчетной матрицы:

$$\tilde{f}(x_0) = \frac{n_0(x_0 \pm 0,005)}{N}; \quad \tilde{Df}(x_1) = \frac{n_1(x_2 \pm 0,005) - n_0(x_0 \pm 0,005)}{N};$$

$$\tilde{Df}(x_2) = \frac{n_2(x_2 \pm 0,005) - n_1(x_1 \pm 0,005)}{N}, \text{ и так далее.}$$

5. Вычислить второй множитель F_1 по формуле (1) для требуемых значений аргумента x_i .

6. Выполнив суммирование значений каждого столбца, получаем долю дефектных изоляторов в зависимости от $x = tg\delta$.

7. Выполнив суммирование предыдущей строки, получаем суммарный уровень дефектных изоляторов на линии по нарастанию переменной $x = tg\delta$.

На рис.1 (кривая $f(tg\delta)$) приведена плотность распределения $tg\delta$ изоляторов, находившихся в эксплуатации в контактной сети более 20 лет. Там же дана функция F_{11} , полученная численным интегрированием (6) и представляет собой суммарный прогнозируемый уровень наличия дефектных изоляторов на рассматриваемом участке в заданном интервале $tg\delta$.

Как можно видеть из рис.1, функция ошибки недоотбраковки дефектных изоляторов F_{11} , учитывающая фактическое распределение изоляторов по величине $tg\delta$ также удовлетворительно подчиняется распределению Вейбулла с параметрами: $a=0,45, b=1,4$.

Воспользовавшись критерием (3), находим с помощью соотношения (5) оптимальное браковочное значение, при котором имеет место минимум ошибки отбраковки негодных изоляторов на рассматриваемой линии:

$$tg\delta_{on} \gg 0,08 \quad (8)$$

Этому значению соответствуют:

$F_{11} = 0.10$ - вероятность того, что на линии останутся дефектные изоляторы после отбраковки согласно (8); $F_2 = 0.018$ - наибольшая вероятность отбраковки кондиционных изоляторов по параметру (8).

Обоснованность диагностики фарфоровых изоляторов посредством измерения $tg\delta$ по величине (8) иллюстрирует корреляция между реальным уровнем дефектных изоляторов V_n по электрической прочности и количеством изоляторов с $tg\delta \approx 0,08, V_{tg}$ [4]. На рис.2 приведены ре-

зультаты обследований изоляторов, демонтированных из 10-ти различных дорог с разными сроками эксплуатации. Объем рассмотренных изоляторов составил от 20 до 150шт для каждой зачетной точки на графике рис.2.

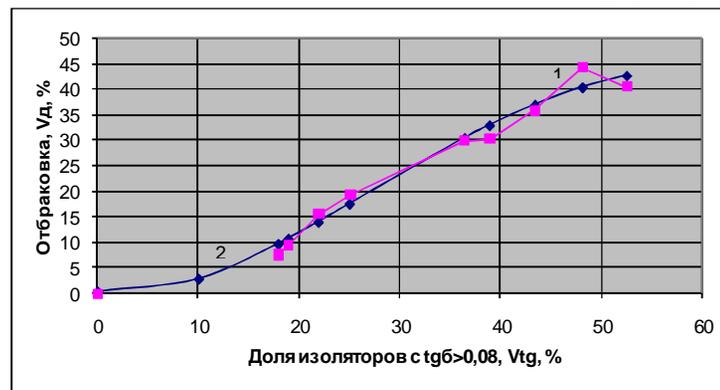


Рис. 2 – Соотношение между уровнем дефектных изоляторов ПФ70В и объемом изоляторов с критической величиной $tg\delta_{on} = 0,08$
1- данные опыта эксплуатации; 2- аппроксимирующая функция

Аппроксимирующая зависимость на рис.2 имеет вид

$$V_n = 0.01(-0.502 + 23.6V_{tg} + 19V_{tg}^2), \quad (9)$$

где V_n и V_{tg} в относительных единицах.

Таким образом, если известна доля изоляторов с $tg\delta \approx 0,08$, то по выражению (9) можно определить объем прогнозируемых дефектных изоляторов. Ошибка такого прогноза оценить значением $F_{11}(x = 0.08)$.

Выводы. Уровень дефектности фарфоровых изоляторов тарельчатой конструкции определяется величиной $tg\delta$, в свою очередь, распределение изоляторов по $tg\delta$ подчиняется закону Вейбулла. На основе этих положений получены соотношения для оценки состояния изоляции в сети, выбора оптимального браковочного значения $tg\delta$ ослабленных изоляторов и оценки допустимых ошибок принятия соответствующих решений.

Список литературы: 1. ДСТУ 2203-93 (ГОСТ 6490-93) Ізолятори лінійні підвісні тарілчасті. Загальні технічні умови; 2. *Ким Ен Дар* Методика прогнозування показателів надійності підвесних лінійних ізоляторів / *Ким Ен Дар, В.Н. Таран* // Вестник ХГПУ. – 1999. - Выпуск 69. 3. *Ким Ен Дар* Состояние фарфоровых изоляторов и методы их контроля. // Вестник ХГПУ. - 1998. - Выпуск 13. 4. *Ким Ен Дар* Методика оценки остаточного ресурса тарельчатых фарфоровых изоляторов. / *Ким Ен Дар, В.Н. Таран, Сыченко В.Г.* // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – С.61-66.

Поступила в редакцию 03.11.2010

И.А. КОСТЮКОВ, студент, НТУ "ХПИ"

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

В работе рассмотрены особенности конструкции и перспективы использования разных видов суперконденсаторов.

В роботі розглянуті особливості конструкції і перспективи використання різних видів суперконденсаторів.

In this paper features of design and perspectives of using different types of supercapacitors are considered.

В суперконденсаторах (СК) энергия накапливается в процессе зарядки за счет поляризации двойных электрических слоев (ДЭС) на границах раздела анод- электролит и катод – электролит.

Модельные представления о строении ДЭС развивались в течении длительного времени и совершенствуются до нашего времени.

Первая модель – модель Г. Гельмгольца – относится к 1853 г. В этой модели для описания границы между электродом и раствором электролита была предложена модель плоского конденсатора. Согласно этой модели к слою зарядов на электроде жестко притянуты ионы противоположного знака из раствора электролита так, что ДЭС представляет собой своеобразный плоский конденсатор с очень малым расстоянием между его обкладками (порядка диаметра молекулы воды). Эта модель позволила правильно предсказать порядок величины емкости ДЭС, выявила форму электрокапиллярных кривых, но не могла объяснить зависимость емкости и пограничного натяжения от температуры и концентрации электролита.

В теории Гуи – Чапмена была предложена теория диффузного слоя. В этой теории ионы рассматривались как математические точки, которые находятся под действием теплового движения и одновременно отталкиваются или притягиваются заряженной поверхностью электрода. Влияние электрического поля рассматривалось только вдоль одной координаты перпендикулярной поверхности электрода. Однако, количественный расчет емкости по этой теории на несколько порядков превышал опытные данные. Основная причина была в том, что не учитывались реальные размеры ионов.

В теории О.Штерна были учтены собственные размеры ионов. Одновременно в этой теории были учтены силы неэлектростатического взаимодействия с материалом электродов, что позволило объяснить явления, связанные со специфической адсорбцией ионов. Предполагалось, что ДЭС состоит из двух слоев: плотного и диффузного, разделенных

плоскостью получившей название плоскости Гельмгольца. Толщина плотного слоя равна радиусу гидратированных ионов (0,3-0,4), нм его относительная диэлектрическая проницаемость значительно ниже чем в объеме раствора электролита. Это обусловлено довольно жесткой ориентацией диполей растворителя в плотном слое, как под действием электрического поля электрода, так и в результате их взаимодействия с материалом электродов. В диффузионном слое относительная диэлектрическая проницаемость принималась равной относительной диэлектрической проницаемости воды. Толщина диффузионного слоя теоретически бесконечна, но практически вводилась некоторая эффективная толщина. В теории Штерна не учитывалось различие, до которого могут приближаться к поверхности электрода электрические центры поверхностно – неактивных и специфически адсорбируемых ионов. В действительности, ионы, которые специфически адсорбированы частично дегидратированы со стороны электрода, а потому они входят внутрь плотного слоя и их электрические центры расположены ближе к поверхности электрода, чем такие же центры полностью гидратированных ионов. В результате, вместо одной плоскости Гельмгольца необходимо было ввести две плоскости: внутреннюю и внешнюю.

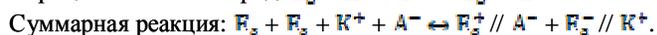
Детальная модель ДЭС с учетом двух плоскостей Гельмгольца была разработана в теории Д.Грэма. Кроме разности потенциалов, создаваемой зарядами твердого электрода и ионами ДЭС, электрические свойства границы раздела электрод – электролит зависят также от находящихся на поверхности электрода диполей растворителя. Эти диполи взаимодействуют с зарядами электрода и друг с другом по законам классической электростатики. В результате, при изменении по величине заряда электродов изменялось долевое соотношение диполей с противоположными ориентациями. В последующем модели ДЭС уточнялись, и продолжают уточняться с учетом значительного числа эффектов как электрических так и неэлектрических. [1]

Таким образом усилиями Гуи, Штерна и Фрумкина была создана классическая теория строения и свойств ДЭС в водных электролитах и был заложен фундамент для создания СК. Было установлено, что удельная емкость ДЭС весьма высока (около $0,2 \text{ Ф/м}^2$), а скачок потенциала в ДЭС может достигать величины 1 В.

СК превосходят конденсаторы других типов по плотности емкости, заряда и энергии. Число приложений СК по мере осознания потенциала этих приборов все время возрастает. СК могут занять новую рыночную нишу в секторе беспроводных средств (РСМСIA-карты, флэш-карты, сотовые телефоны, специальные компьютеры, беспроводные сенсорные сети); в потребительском секторе (цифровые камеры, ноутбуки, цифровые плееры, игрушки, пульта дистанционного управления); в производственном секторе (пульта дистанционного управления, считыватели ме-

ток товаров, медицинские приборы, промышленные лазеры, транспортные приложения, выпрямители, источники бесперебойного питания, детекторы дыма, системы наблюдения и контроля, и многое другое). Также они могут быть использованы для уменьшения массы химического источника тока: для пуска автомобильного двигателя требуется мощность порядка 5 кВт в течение 2 с (10 кДж). Свинцовый кислотный аккумулятор массой 1 кг имеет энергию 100 кДж, что достаточно для 10 пусков, но его мощность только 0,2 кВт, что в 25 раз меньше требуемой. Поэтому используются аккумуляторы массой 25 кг. СК массой 0,5 кг запасает 20 кДж и обеспечивает мощность 5 кВт, что достаточно для пуска двигателя. Если составить гибридный источник массой 1,5 кг (аккумулятор – 1 кг и СК – 0,5 кг), то с его помощью можно запустить двигатель 10 раз. Оптимальным гибридным источником на сегодняшний день представляется сочетание, например, литиевого аккумулятора и СК.

В концентрированных электролитах заряд на межфазной границе образован избыточным электронным зарядом поверхности электрода и избыточным ионным зарядом со стороны электролита. Ионы электролита плотно прижаты к поверхности электрода силами электростатического притяжения, так что расстояние между зарядами в ДЭС по порядку величины близко к радиусу иона. В электролитах ионы, как правило, гидратированы (водный раствор), или сольватированы (органические растворители), что увеличивает их радиус. Электрохимический процесс в СК можно представить как



Где: E_s – поверхность электрода; // - ДЭС, где заряд накапливается на обоих его сторонах; A^- и K^+ - соответственно, анионы и катионы электролита.

Если в обычных конденсаторах заряды на обкладках разделены диэлектриком, то в ДЭС разделение зарядов на межфазной границе обусловлено термодинамической или кинетической затруднительностью переноса зарядов в рабочем интервале электродных потенциалов. В различных типах СК используются ДЭС с интервалом потенциалов от 0,5 до 1,5 В.

Емкость современных СК и батарей на их основе составляет 1...10 000 Ф. Они имеют ультратонкий ДЭС ($d \sim 1$ нм) и гигантские площади A распределённые в объеме дисперсных электродов, чем и обеспечивается огромное значение емкости таких конденсаторов.

Емкость СК может быть оценена по формуле плоского конденсатора:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d,$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м, $\epsilon_r = 1$ (относительная диэлектрическая проницаемость ДЭС).

Толщина ДЭС d зависит от концентрации ионов в электролите и размера ионов, для концентрированных жидких электролитов составляет 0,5...1 нм. напряжённость электрического поля в ДЭС может быть больше 10^7 В/см.

В качестве электродов в СК чаще всего используют микропористые проводники с высокой удельной поверхностью, например, различные активированные углеродные материалы. Такие материалы содержат большое количество пор с размерами несколько нанометров в результате чего имеют удельную поверхность более 10^6 м²/кг. Используемые активные поры: ультрамикропоры, диаметром менее 0,7 нм, микропоры, с диаметром 0,7 – 2 нм, мезопоры, с диаметром 2 – 50 нм и макропоры, с диаметром более 50 нм. Примерные параметры активированного угля используемого для изготовления электродов: размеры частиц: 10 – 50 мкм размер активных пор: 0,7 – 50 нм удельная поверхность 2500 м²/г. Параметры нанотрубок: размер нанотрубок: 1-1,5 нм, размер активных структур: 40 – 100 нм, удельная поверхность 100 м²/г.

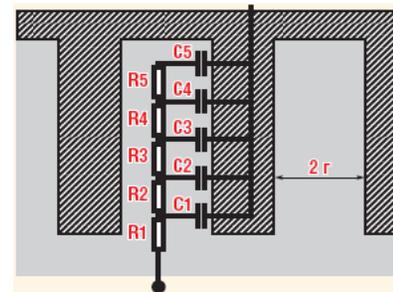


Рис. 1 – Эквивалентная электрическая схема поры электродного материала СК

Если удельная проводимость электрода много больше, чем электролита (условие обычно выполняется), то на высоких частотах поведение СК определяется участками пор, близкими к поверхности (элементы R_1 и C_1 эквивалентной схемы), а вклад более глубоких участков ($R_2C_2, R_3C_3, \dots, R_nC_n$) незначителен: сопротивление и ёмкость СК уменьшаются на высоких частотах. Толщины активного слоя электродов – 1, 10, 100 и 1000 мкм.

Конденсаторам с двойным электрическим слоем и пористыми электродами присущи процессы внутренней релаксации. Так как электрод представляет собой систему с широким распределением пор по радиусу, то в разных порах накапливается разный заряд и за разное время. При

составлении схемы замещения суперконденсатора каждый размер пор необходимо отображать своими емкостью и сопротивлением. Такая модель довольно громоздка и ее сложно применять для описания процесса работы конденсатора. Как показано в [3] довольно высокой точности можно добиться, разделив поры электрода на две группы допустив, что постоянные времени RC этих групп одинаковы. Разделение на две группы проводилось условно по размерам пор, в первую группу попадали поры радиус которых не более 5 нм в другую те, радиус которых больше. Наличие внутренней релаксации необходимо учитывать при расчете КПД конденсатора. При малой толщине и значительной удельной емкости ДЭС возможно получение удельной емкости СК до 200 кФ/кг . Как результат возможно создание СК с удельной мощностью превышающей 10 кВт/кг .

В некоторых случаях электролиты с органическими растворителями могут оказаться предпочтительнее водных, так как напряжение разложения у них выше и, соответственно, рабочее напряжение таких СК выше. Особенно велик этот эффект при малых токах разряда, когда низкая электропроводность характерная для электролитов с органическими растворителями не вызывает тепловые потери в СК.

В настоящее время для серийно выпускаемых СК используются исключительно электроды из углеродных материалов. Существуют различные технологические варианты изготовления таких электродов: электроды из алюминиевой фольги с нанесенным слоем активированного угля, электроды из активированной угольной ткани, волокна которой сцеплены с металлическими волокнами приблизительно такой же длины, электроды из угольных волокон, одна сторона которых покрыта слоем электропроводящего металла электроды из однослойных и многослойных углеродных нанотрубок.

Рассмотренный выше тип СК представляет собой идеальный СК, который состоит из двух идеально поляризуемых симметричных электродов, разделенных сепаратором. В этом типе СК в рабочем интервале напряжений не протекают химические реакции, накладывающие ограничение на скорости заряда и разряда. Такие СК обладают наибольшей удельной мощностью. Существуют иные типы СК которые обладают как преимуществами так и недостатками по сравнению с идеальным СК.

Гибридные суперконденсаторы (ГСК) – это СК с идеально поляризуемым углеродным электродом и не поляризуемым или слабо поляризуемым вторым электродом (анодом или катодом). В ГСК на одном из электродов протекает электрохимическая реакция как в аккумуляторе. Емкость ГСК в два раза выше, чем идеального СК, так как емкость неполяризуемого электрода замкнута сопротивлением протекающей электрохимической реакции и как результат нет двух последовательно включенных емкостей ДЭС. Эта реакция накладывает диффузионные и кинетиче-

ские ограничения на скорости заряда и разряда ГСК, который по величинам удельных энергии и мощности, температурному диапазону и количеству циклов ближе идеальных СК к области аккумуляторов.

Псевдоконденсаторы (ПК) это суперконденсаторы, на поверхности электродов которых при заряде и разряде протекают обратимые электрохимические процессы. По принципу накопления энергии псевдоконденсаторы можно отнести как к суперконденсаторам, (если энергия накапливается только в поверхностном слое электродов), так и к аккумуляторам (если энергия накапливается не только в поверхностном слое, но и в объеме электродов). По величине удельной энергии и мощности, температурному диапазону эксплуатации и количеству циклов псевдоконденсаторы ближе всех остальных типов конденсаторов к аккумуляторам.

В заключение можно отметить следующее. На сегодняшний день по показателю удельной энергии СК значительно уступают лучшим типам аккумуляторов. Несмотря на это, анализ теоретических исследований СК и конкретных достижений в области нанотехнологий при производстве поверхностно развитых электродных материалов и связанной с этим динамикой роста удельной энергии СК показывает неизбежную перспективу замены аккумуляторов на СК. Достигнутые уже сегодня показатели удельной мощности до 10 кВт/кг и до одного миллиона циклов заряд – разряд в комментариях не нуждаются.

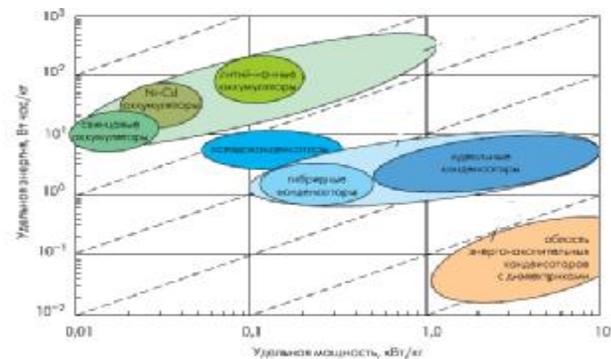


Рис. 2 – Характеристики электрохимических накопителей энергии

К проблемным вопросам на сегодня можно отнести следующие. Остается открытым вопрос что следует понимать под внутренним сопротивлением СК, каковы временные характеристики электрокинетических процессов. Как следствие, открытым остается вопрос о параметрических границах режима быстрого заряда СК.

В литературе посвященной разработкам СК практически отсутствует рассмотрение процессов в сепараторе. Принято считать, что электрокине-

тические процессы в сепараторах аккумуляторов с СК идентичны. Возможно ли применение принципиально новых материалов для сепараторов СК, которые будут более эффективны для энергообмена в условиях значительно более высоких величин удельной мощности СК по сравнению с аккумуляторами. К проблемным вопросам можно отнести также то, что подавляющее большинство работ по изучению свойств двойного электрического слоя акцентируют внимание на моделировании границы раздела электролита с металлическим электродом, в то время как граница раздела между электролитом и неметаллическим материалом электродов суперконденсатора изучена недостаточно и может иметь отличия от классической модели.

Список литературы: 1. Дамаскин Б.Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаски, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – М.: Химия, 2001. – 624 с. 2. Деспотули А.Л. Суперконденсаторы для электроники (Часть1) / А.Л.Деспотули, А.В.Андреева // Современная электроника. – 2006. - №5. - С.10. 3. Изотов В.Ю. Моделирование та розрахунок робочих параметрів суперконденсатора / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадський, Ю.А. Малетін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 6.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

УДК 621.316

А. А. МИРОШНИК, канд. техн. наук; доц., ХНТУСГ, Харьков

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ НЕСИММЕТРИИ В СЕТЯХ 0,38 кВ

В статье описаны исследования вопросов энергосбережения и улучшения качества электрической энергии в низковольтных сетях 0,38 кВ, в частности проблемы снижения несимметрии токов и напряжений в этих сетях.

В статті описані дослідження питань енергозбереження та покращення якості електричної енергії в низьковольтних мережах 0,38 кВ, зокрема проблеми зниження несиметрії струмів та напруг в цих мережах.

In clause the researches of questions of the powersavings and improvements of quality of electrical energy in low-voltage networks 0,38 kV, namely problem of decrease no symmetry of currents and voltage in these networks are described.

Постановка проблемы. В современных условиях развития электрификации сельского хозяйства, характеризующейся увеличением мощностей нагрузок сельскохозяйственных предприятий, развитием электро-технологии и автоматизации технологических процессов, а также повышением степени использования электрического оборудования, следует уделять особое внимание наиболее эффективному использованию электрической энергии.

Анализ последних исследований и публикаций. Эффективность использования электрической энергии определяется в основном созданием таких условий её потребления, при которых обеспечивается требуемое качество электрической энергии (КЭЭ) и минимум производственных потерь. Актуальность вопроса улучшения качества и уменьшения потерь электрической энергии особенно возрастает в условиях объективно-несимметричной работы электроприёмников в сельских распределительных сетях напряжением 0,38 кВ.

Цель, задачи исследования. Обосновать пути снижения несимметрии токов и напряжений в сетях 0,38 кВ.

Основной материал исследований. Одним из способов достижения поставленной цели является воздействие на показатели качества электрической энергии (ПКЭ), Нормы и качество электрической энергии регламентирует ГОСТ 13109-97, который устанавливает нормально и предельно допустимые значения в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц [1]. К одним из основных ПКЭ в распределительных сетях 0,38 кВ относят коэффициенты несимметрии обратной и нулевой последовательностей напряжения (нормированные значения составляют: 2 % –

нормальное и 4 % – предельно допустимое) и отклонение напряжения ($\pm 5\%$ – нормальное, $\pm 10\%$ – предельно допустимое) [1].

Качество электрической энергии у потребителей, наряду с надёжностью электроснабжения, является одной из важных характеристик электрических сетей при рассмотрении вопроса эффективного электропотребления. Низкое качество электрической энергии оказывает существенное влияние, как на рабочие, так и на технико-экономические характеристики элементов сети и характеристики электроприёмников. При ухудшении качества напряжения, повышается нагрев элементов сети, увеличиваются потери мощности. Кроме того, происходит снижение эксплуатационной надёжности и сокращение срока службы электродвигателей, возникает ряд отрицательных электромагнитных явлений в сетях, увеличиваются дополнительные потери электрической энергии, обусловленные несимметрией токов. Например, около 4 % всей потребляемой сельским хозяйством электрической энергии дополнительно теряется в асинхронных электродвигателях при их работе в сетях с постоянно несимметричной системой напряжений, возникающей вследствие несимметрии токов. Так увеличение напряжения на 10 % ведет к возрастанию светового потока и освещенности рабочей поверхности до 40 % и уменьшению срока службы ламп накаливания втрое, к увеличению потребления реактивной мощности сети, что снижает коэффициент мощности. Уменьшение напряжения сети на 10 % приводит к уменьшению светового потока ламп накаливания до 40 % и уменьшению момента вращения электродвигателя на 20 % [2].

В зарубежных развитых странах обеспечение показателей качества электрической энергии в сети, приемлемых для потребителей, требует значительных затрат денежных средств и материалов. На настоящее время наблюдается неуклонный процесс снижения инвестиций в энергетику, что, в совокупности с низкой эффективностью использования уже поступивших инвестиций, приводит к недопустимому сокращению ввода новых и замещающих мощностей.

При продолжении этих тенденций уже в недалеком будущем электроэнергетическая отрасль может столкнуться с кризисом, который окажет негативное влияние на экономику и население страны [3].

Поэтому в настоящее время выбор правильных решений по развитию электроэнергетики, механизмов и структуры её управления имеет ключевое значение для будущего не только энергетики, но и всей экономики страны в целом. Существенно возросла цена на сооружение высоковольтных ЛЭП. Во многих регионах страны ставится вопрос об оплате стоимости отводимой под пролёты опор участков земли, а также арендной плате земельного коридора вдоль линии. В связи с этим наиболее целесообразным является более рациональное использование инвестиций при строительстве новых и реконструкции старых ЛЭП. Решение этого вопроса может быть осуществлено путём максимального использования

линий электропередачи за счёт увеличения их пропускной способности и управления передаваемой по ним мощности, а также глубокого и тщательного анализа структуры передаваемой электроэнергии, её качества и возникающих потерь.

Однако, для правильной оценки эффективности использования энергии необходим более глубокий анализ режимов работы сельских сетей 0,38 кВ, а также разработка совершенных методов расчёта показателей КЭЭ.

Многочисленные исследования, посвященные анализу режимов работы сельских сетей низкого напряжения [4, 5] показали, что несимметрия токов обусловлена работой коммунально-бытовой нагрузки, основную часть которой составляют неравномерно распределённые однофазные электроприёмники, имеющие случайный характер включения. При общем рассмотрении сети 0,38 кВ можно выделить следующие несимметричные режимы работы:

1. Режимы, возникающие при аварийных ситуациях (короткое замыкание, потеря фазы).
2. Режимы, вызванные неравномерным распределением однофазных потребителей (систематическая или неслучайная несимметрия),
3. Режимы, возникающие при случайном характере включений и отключений, однофазных электроприёмников в течение суток (вероятностная несимметрия).
4. Неполнофазные (двух- и однофазные) режимы работы распределительных сетей.

С каждым годом в сельских распределительных сетях 0,38 кВ наблюдается рост коммунально-бытовых нагрузок. Причём увеличивается, как правило, мощность однофазных потребителей (электронагревательные приборы, электрочайники и т.п.). Следствием этого является увеличение несимметрии токов и напряжений, то есть значений их симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей. Например, ток обратной последовательности в трёхфазных асинхронных электродвигателях может достигать больших значений даже при малых значениях напряжения обратной последовательности (из-за небольшого сопротивления обратной последовательности). Это приводит к дополнительному нагреву электродвигателей, быстрому старению изоляции и сокращению сроков их службы. В низковольтных сетях из-за несимметрии нагрузок и неравномерности графика потребления значительно увеличиваются потери мощности, ухудшается качество электрической энергии у потребителей (в низковольтных сетях потеря электрической энергии по расчёту должна быть 2...3 % от передаваемой мощности, в действительности она составляет 12 ..18 %). По причине несимметрии напряжений в сети суммарные добавочные потери мощности в двигателях равны 37,3 % от суммарных потерь в этих же машинах, если они работают при средней на-

грузке и номинальном напряжении. Несимметрия токов приводит к возрастанию потерь мощности и энергии в сетях на 30...50 %, по сравнению с симметричным режимом [2]. Кроме того, причиной низкого качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ является высокий уровень реактивной мощности ($\cos\varphi = 0,6...0,8$), появление которой связано с применением большого числа асинхронных электродвигателей и отсутствием соответствующих компенсирующих устройств.

Несимметрия напряжений отрицательно влияет на работу практически всех электроприёмников. Например, при работе асинхронных двигателей, в условиях несимметрии нагрузок, наблюдается сбой в системе автоматического управления и контроля, уменьшается вращающий момент, появляется вибрация, сокращается срок службы почти вдвое. Кроме того, при несимметрии напряжений ухудшается работа конденсаторных установок, а также средств релейной защиты и автоматики. Напряжение, не удовлетворяющее требованиям ГОСТа 13109-97, причиняет значительный материальный ущерб, ухудшает технико-экономические показатели работы системы электроснабжения в целом. Поэтому, наряду с разработкой точных методов оценки неблагоприятного влияния несимметрии токов и напряжений на режимы работы сельских распределительных сетей 0,38 кВ, актуальной является проблема разработки средств выравнивания режима электропотребления и симметрирования фазных нагрузок.

Уменьшения потерь и повышения качества электроэнергии можно добиться разными способами и средствами [1-3]. При этом каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, применением такого способа, как перераспределение однофазных нагрузок не удастся минимизировать случайную несимметрию токов (хотя дополнительные потери мощности снижаются на 15 – 20 %). К тому же случайная несимметрия токов характеризуется вероятностным режимом работы присоединенных однофазных приёмников и является постоянно действующим фактором в сетях 0,38 кВ даже при одинаковой суммарной мощности фаз.

Стремление к сокращению протяжённости распределительных сетей может привести к их формированию, как разветвлённых радиальных сетей. Такие сети, как известно, имеют ряд особенностей. Во-первых, токовые нагрузки одной и той же линии, например, в начале её и в конце, резко различны, что может приводить к затруднениям при выполнении чувствительной защиты распределительных сетей от коротких замыканий. Во-вторых, существенно отличаются между собой значения напряжения в различных точках сети, что является одной из основных причин, усложняющих задачу обеспечения надлежащего качества электрической энергии у потребителей,

В настоящее время несимметричные режимы работы сельских распределительных сетей 0,38 кВ изучены не в полной мере в связи с трудностями, возникающими при экспериментальных исследованиях в дейст-

вующих сетях, и отсутствием современных методов расчёта этих режимов. Для получения более точных результатов, при проведении экспериментальных исследований, требуется регистрация значительного числа параметров (девяти и более), а также наличие высокоточной многоканальной измерительной аппаратуры. Усложняет решение этой задачи и то, что регистрация параметров необходима в многочисленных точках сети. Отсутствие достоверной и полной информации о режиме работы сети не позволяет обеспечить эффективные меры по снижению уровня несимметрии токов и напряжений.

Выводы. Таким образом, решение задач энергосбережения и улучшения качества электрической энергии в низковольтных сетях 0,38 кВ тесно связано с решением проблемы снижения несимметрии токов в этих сетях. Поэтому актуальным и своевременным является рассмотрение вопросов, связанных с разработкой способов снижения несимметрии токов и подготовкой практических рекомендаций использования мероприятий по уменьшению потерь электрической энергии.

Список литературы: 1. ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. 2. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И. М. Сирот., С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – К. : Наукова думка, 1985. – 264 с. 3. Стогний Б. С. Анализ эффективности существующих режимов нейтрали сетей 6-35 кВ в энергетике / Б.С. Стогний, В.В. Масляник, В.В. Назаров // Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». – К., 2002. – №3. – С. 37–41. 4. Пивняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие / Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец. – М. : Недра, 1993. – 192 с. 5. Самойлович И. С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. – М. : Недра, 1976. – 175 с.

Поступила в редколлегию 03.11.10

Е.С. МОСКВИТИН, ассистент, НТУ «ХПИ»

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Выполнен анализ результатов прямых и совокупных измерений параметров изоляционных промежутков силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Для кабеля напряжением 6 кВ наблюдается значительная **разница** уровня тангенсу угла диэлектрических потерь в зависимости от схемы обследования. Это является признаком того, что поясная изоляция в большей мере **старее** относительно фазной.

Виконано аналіз результатів прямих та сукупних вимірювань параметрів ізоляційних проміжків силових кабелів з паперово-просякнутою ізоляцією. Для кабелю напругою 6 кВ спостерігається значна різниця рівня тангенсу кута діелектричних втрат в залежності від схеми обстеження. Це є ознакою того, що поясна ізоляція в більшій мірі зістарена відносно фазної.

The analysis of results of direct and cumulative measurements of parameters of insulation intervals of power cables with the paper-impregnated insulation is executed. For a cable the voltage 6 kV observes significant distinctions of a level of a tangent of a corner of dielectric losses depending on the circuit of inspection: It is an attribute of the greater degree ageing zone insulation in comparison with phase.

Старение изоляции кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией обусловлено термоокислительными процессами и деструкцией целлюлозы, увлажнением изоляции, стеканием пропиточного состава, старением пропитывающего состава, образованием воздушных пор из-за стекания вязкой пропитки, образованием воскообразных отложений под действием частичных разрядов в масляных прослойках и воздушных включениях между слоями бумаги.

Следует учитывать также различие процессов старения низковольтных и высоковольтных кабелей. При высоком напряжении начинают проявляться *пороговые явления*:

а) накопление объемных зарядов в толще состаренного диэлектрика, приводящее к перераспределению напряженности электрического поля и образованию дендритов;

б) неполные пробои ослабленных участков изоляции – частичные разряды.

Общими признаками медленных процессов старения изоляции кабелей, которые могут наблюдаться при контроле в эксплуатационных условиях, являются: снижение сопротивления изоляции (или рост токов утечки при испытаниях постоянным напряжением); рост емкости и тангенса угла диэлектрических потерь; рост коэффициента абсорбции; рост

уровня частичных разрядов; появление локальных неоднородностей [1-2].

Контролируя эти характеристики в эксплуатации, можно оценить степень старения кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ).

Силовые кабели имеют два вида изоляции – фазную (вокруг каждой жилы по отдельности) и поясную (вокруг трех жил вместе). Изоляция выполняется путем обмотки жил лентами кабельной бумаги. После этого следует вакуумная сушка бухт кабеля, а затем – вакуумная пропитка масляно-канифольными составами. После пропитки бухта кабеля выдерживается в пропиточной ванне до остывания, а затем направляется на пресс для нанесения защитной (алюминиевой) оболочки.

В исходном состоянии свойства фазной и поясной изоляции должны быть *идентичными*. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов ее разложения (воды, фуранов) в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию. В результате свойства поясной изоляции со временем ухудшаются: растет тангенс угла диэлектрических потерь, падает сопротивление изоляции, уменьшается механическая прочность кабельных бумаг [3,4].

Цель статьи: наблюдение изменений диэлектрических характеристик изоляционных промежутков трехфазных силовых кабелей напряжением 1 и 6 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией в процессе теплового старения.

1. Схема замещения 3-х фазного кабеля показана на рис.1. Она содержит 6 звеньев, отражающих свойства изоляции жил на оболочку (емкости C_1, C_2, C_3) и между собой (емкости C_4, C_5, C_6). Параллельно каждой из емкостей включены резисторы, отражающие диэлектрические потери в изоляции, если измерения выполняются на переменном напряжении или утечки – если на постоянном напряжении. Параметры частичных емкостей могут быть найдены методом *прямых* измерений с использованием приборов с тремя клеммами либо методом *совокупных* измерений с использованием приборов с двумя клеммами [5 -6].

2. Прямые измерения.

Измеряемая ветвь электрической цепи объекта контроля, например, между клеммами 1 и 2, подключается к прибору, а *все остальные* клеммы объекта – к экранирующей цепи прибора (Э) – рис.2. Тогда будут измеряться параметры комплексного сопротивления Z_{12} , а мешающие токи цепей Z_1 и Z_2 – отведутся на землю.

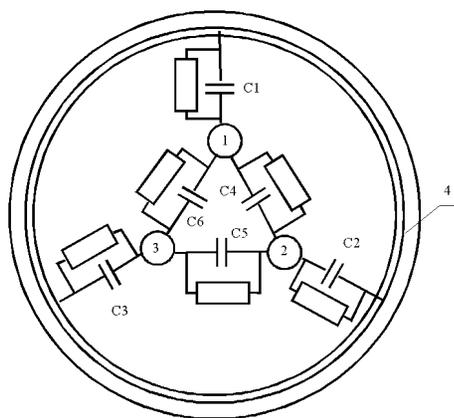


Рис.1 – Схема замещения трехфазного кабеля с фазной и поясной изоляцией: 1, 2, 3 - жилы кабеля; 4 - оболочка. Сопротивления, подключенные параллельно частичным емкостям, отражают потери энергии в компонентах изоляции кабеля

При измерениях на переменном напряжении используются 5-ти клеммные приборы, измерительные цепи которых выполнены раздельными – две токовые (I, I') и две потенциальные (U, U'), что позволяет исключить влияние на результаты измерений соединительных проводов.

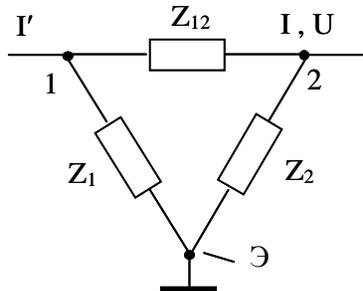


Рис.2 – Треугольник импедансов (полных сопротивлений) выделенной ветви 1-2 объекта контроля: Z_{12} – измеряемый импеданс; Z_1, Z_2 – шунтирующие импедансы. Токовые I, I' и потенциальные U', U зажимы прибора замыкаются на узлах измеряемой ветви

3. Совокупные измерения.

Метод совокупных измерений более универсален, чем метод непосредственных измерений частичных емкостей. Но параметры контролируемой цепи находятся не непосредственно в ходе измерений, а в результате решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Метод может быть реализован как с помощью приборов с тремя клемма-

ми (в этом случае экранирующая клемма не используется), так и с помощью приборов с двумя клеммами [5,6].

Между кабелем и измерителем (И) помещается двухпозиционный коммутатор (К) – рис.3. Каждая из клемм 1 – 4 объекта контроля подключается либо к одному, либо к другому входу измерителя иммитанса. Определим состояние ключей коммутатора *матрицей коммутации АК*, элементы которой равны «1», если клемма объекта подключена, например, к левой клемме прибора и «0», если - к правой:

Матрица содержит 4 строки (по числу клемм объекта контроля) и $2^4 = 16$ столбцов (по числу всех возможных вариантов состояния ключей коммутатора). Первый и последний столбец соответствуют вырожденным случаям: 0000 – когда все полюса объекта подсоединены к одной клемме, и

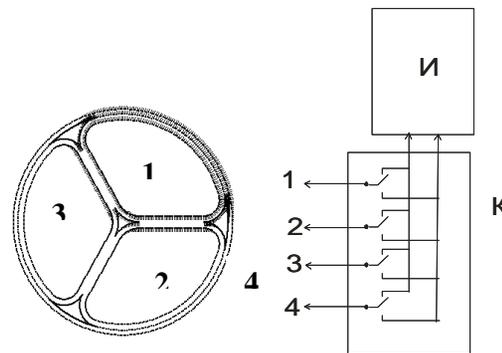


Рис.3 – Схема обследования трехфазного кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией методом совокупных измерений: И – измеритель иммитанса; К – двухпозиционный коммутатор

1111 – к другой клемме измерителя. Эти опыты могут использоваться для оценки паразитной емкости коммутатора и соединительных проводов. Остальные опыты - их всего $Ne=2^4 - 2 = 14$ – делятся на две группы. Первые 7 опытов назовем *основными* (столбцы 2 - 8), а остальные – *инверсными* (столбцы 9 - 15), т.к. они соответствуют перемене полярности подключения к прибору всех полюсов.

Для нахождения параметров 6 ветвей схемы замещения рис.1 достаточно выполнить 6 опытов из указанных 7 основных, например, 2 - 7. Можно также выполнить все 7 опытов: 2 - 8. Тогда СЛАУ будет переопределенной – в ней число уравнений больше числа неизвестных [6].

$$AK = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Неизвестные частичные емкости найдутся по результатам совокупных измерений из системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [6]:

$$AC * Cx = Ce, \quad (2)$$

где Ce – матрица-столбец результатов измерений; Cx – матрица-столбец неизвестных частичных емкостей ($C_{12}, C_{13}, C_{23}, C_{14}, C_{24}, C_{34}$); AC – матрица “участия” частичных емкостей в образовании общей емкости данного опыта. Элемент a_{ij} матрицы AC равен 1, если разность кодов полюсов i и j отлична от нуля, и равен 0 в противном случае:

В опыте 2 (первая клемма потенциальная «1», все остальные - нулевые) измеряются емкости, включенные параллельно: $C_{12} + C_{13} + C_{14}$. В опыте 3 (вторая клемма потенциальная «1», все остальные - нулевые) измеряются следующие емкости, включенные параллельно: $C_{12} + C_{23} + C_{24}$. Частичные емкости, участвующие в образовании результирующей емкости опыта, находятся путем перемножения строки матрицы AC на столбец матрицы Cx .

$$AC = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad Cx = \begin{array}{|c|} \hline C_{12} \\ \hline C_{13} \\ \hline C_{23} \\ \hline C_{14} \\ \hline C_{24} \\ \hline C_{34} \\ \hline \end{array}$$

Система, аналогичная (2), составляется и для нахождения $\text{tg}\delta$ частичных емкостей [6].

$$ATG * TGx = TGe, \quad (3)$$

где TGe – матрица-столбец измеренных значений $\text{tg}\delta$ (результат совокупного действия ряда частичных емкостей с потерями, включенных параллельно); TGx – матрица-столбец истинных значений $\text{tg}\delta$ частичных емкостей с потерями (цель расчета).

Здесь ATG – матрица коэффициентов, подобная по структуре матрице AC , но содержащая вместо единичных коэффициентов – дроби, в числителе которых частичные емкости C_{ij} , найденные в результате реше-

ния (2), а в знаменателе – суммы частичных емкостей, участвующих в данном опыте. Коэффициенты матрицы ATG определяют долевые вклады реальных частичных емкостей (с потерями энергии) в суммарных потерях данного опыта.

При реализации всех 7 основных опытов системы (2), (3) становятся переопределенными (число опытов больше числа неизвестных) и для нахождения решений используем метод наименьших квадратов [6]:

$$AC' * AC * Cx = AC' * Ce$$

$$(AC' * AC)^{-1} * AC' * AC * Cx = (AC' * AC)^{-1} * AC' * Ce. \quad (4)$$

$$Cx = (AC' * AC)^{-1} * AC' * Ce$$

Здесь штрих ' – означает транспонирование, степень $^{-1}$ – нахождение обратной матрицы, знак * – матричное умножение.

Аналогично находятся неизвестные значения тангенсов углов потерь частичных емкостей (цель исследований):

$$TGx = (ATG' * ATG)^{-1} * ATG' * TGe. \quad (5)$$

Если реализовать только **6 опытов** – (2-7 столбцы матрицы AK), то получим СЛАУ 6-го порядка с матрицей AC вида:

1	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0
0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	0	1
1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1

Соответствующая обратная матрица AC^{-1} равна:

$$0,5 * \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

Тогда искомые частичные емкости найдутся путем перемножения строк обратной матрицы на столбец экспериментальных данных. Например, первая неизвестная C_{12} найдется путем перемножения первой строки матрица AC^{-1} на столбец результатов измерений:

$$C_{12} = 0,5 * (C_1 + C_2 - C_3 + 0 * C_4 + 0 * C_5 + 0 * C_6), \quad (6)$$

где $C_1 - C_6$ - экспериментальные результаты совокупных измерений, последовательность которых задана столбцами 2 -7 матрицы коммутации (1).

Аналогично выглядит формула для $tg\delta_{12}$:

$$tg\delta_{12} = 0,5 * \left(\frac{C_{12}}{C_{s1}} tg d_1 + \frac{C_{13}}{C_{s1}} tg d_2 - \frac{C_{23}}{C_{s1}} tg d_3 + 0 * tg d_4 + 0 * tg d_5 + 0 * tg d_6 \right). \quad (7)$$

где $C_{s1} = C_{12} + C_{13} + C_{23}$ - совокупная емкость опыта, соответствующего первой строке матрицы AC .

Заметим, что формулой (7) можно воспользоваться только после того, как будут найдены частичные емкости C_{12}, C_{13}, C_{23} .

Формулы для параметров остальных частичных емкостей получают по аналогии с (6) и (7).

Таким образом, решения СЛАУ (2) и (3) на практике сводятся к формулам вида (6) и (7), представляющих собой линейные комбинации результатов измерений, взятых с определенными весовыми коэффициентами. Расчет по ним не представляет особых сложностей.

4. Пример представления результатов обследования трехфазного кабеля – дан на рис.4.

Для каждого образца выделены по четыре области значений частичных емкостей.

Области **первого типа** (обозначены как А1 и В1 для сравниваемых кабелей) – соответствуют емкостям C_{12}, C_{13} и C_{23} истинным емкостям между фазами кабелей. Это – области свойств фазной изоляции. Для кабеля 1 кВ (ААШВ-3х150-1) эти емкости почти в 2 раза больше, чем для кабеля 6 кВ (ААШВ-3х95-6). Это объясняется меньшей толщиной фазной изоляции кабеля 1 кВ. По величине тангенса угла электрических потерь фазные изоляции сравниваемых кабелей близки по качеству.

Области **второго типа** (обозначены как А2 и В2 для сравниваемых кабелей) – соответствуют емкостям C_{41}, C_{24} и C_{34} истинным емкостям между фазами и оболочками кабелей. Это – области свойств фазной и полой изоляции. Для кабеля 6 кВ $tg\delta_{12}$ здесь существенно больше, чем для 1 кВ кабеля. Значит, при одной и той же длине худшее качество полой изоляции кабеля 6 кВ. Это подтверждается результатами механических измерений числа двойных переломов, которое для полой изоляции оказалось существенно меньше [3].

Области **третьего** (А3 и В3) и **четвертого** (А4 и В4) типов соответствуют результатам **совокупных** измерений фазной и полой изоляции. Даже по совокупным измерениям видно худшее качество изоляции кабеля 6 кВ: точки А3 и А4 лежат выше точек В3 и В4.

При разных схемах обследования зондирующее электрическое поле сосредотачивается в разных участках кабеля. Емкости промежутков при этом оказываются *разными*, а $tg\delta$ должен быть практически *одинаков* (признак однородности изоляции при ее нормальном состоянии) [6]. Емкости изоляционных промежутков при разных схемах обследования варьируются от 90 до 1000 пФ. (Большие значения относятся к совокупным схемам обследования, меньшие – к индивидуальным).

Заметим, что для высоковольтного кабеля наблюдаются значительные различия уровня $tg\delta$ в зависимости от схемы обследования: области А1 – А4 находятся на разных уровнях. Это уже само по себе свидетельствует о большей степени состаренности этого кабеля.

Для низковольтного кабеля уровень $tg\delta$ оказался одинаков во всех областях В1 – В4. Следовательно, изоляция кабеля не состарена, возможно, из-за малой нагрузки в процессе эксплуатации.

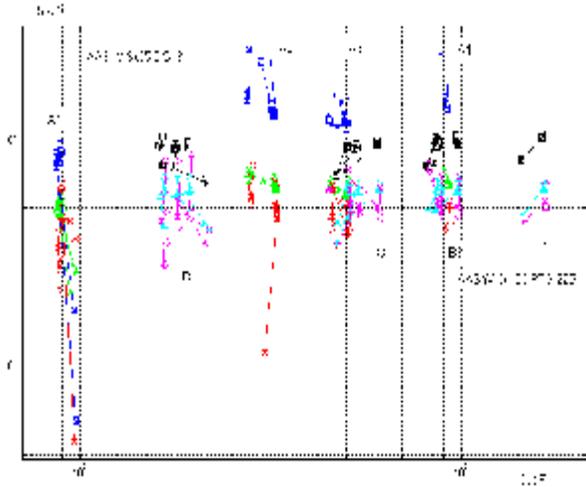


Рис.4 – Параметры частичных емкостей сравниваемых кабелей:
 А1 – А4 – для образца 6 кВ кабеля ААШВ-3х95-6 ДГ13;
 В1 – В4 – для образца 1 кВ кабеля ААШВ-3х150-1 ПТС-22Б.
 Длины образцов – по 1,3 м. Измерения при частотах 0,1; 1 и 10 кГц

5. Контроль характеристик изоляционных промежутков образцов кабелей АСБ-3х90+1х35 – 1 кВ в процессе дополнительного теплового старения.

Тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции описывается известным соотношением Аррениуса:

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W_a}{kT}}, \quad (8)$$

где t - ресурс; W_a - энергия активации процесса термоокислительного старения, Дж; k - постоянная Больцмана, Дж/К; T - абсолютная температура; A - эмпирический коэффициент.

Обычно при увеличении температуры на $\Delta T_{1/2} = 8 - 10$ °С ресурс уменьшается в 2 раза (правило Монтзингера). Значению параметра $\Delta T_{1/2} = 10$ °С соответствует энергия активации $W_a \approx 1$ эВ (рис.5):

$$\tau_2 = A \cdot e^{\frac{W_a}{k(T+\Delta T_{1/2})}} = \frac{1}{2} A \cdot e^{\frac{W_a}{kT}}; \quad \ln 2 = \frac{W_a}{kT} - \frac{W_a}{k(T+\Delta T_{1/2})};$$

$$\frac{W_a}{k} \cdot \frac{\Delta T_{1/2}}{T \cdot (T + \Delta T_{1/2})} = \ln 2;$$

$$W_a = k \ln 2 \cdot \frac{T \cdot (T + \Delta T_{1/2})}{\Delta T_{1/2}} \approx$$

$$1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \ln 2 \cdot \frac{(273 + 100) \cdot (273 + 100 + (8 - 10))}{(8 - 10)} \approx 1,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1 \text{ эВ.}$$

Если температура эксплуатации БПИ составляет в нормальных условиях 65 °С, то, выполняя ускоренные испытания при температуре 105 °С, получим ускорение процессов старения в $2^{(105-65)/10} = 2^4 = 16$ раз. Три недели ускоренного старения эквивалентны в этом случае году эксплуатации в нормальных условиях. С помощью подобных соотношений оценивают длительность ускоренного старения образцов БПИ при оценке ее остаточного ресурса.

Альтернативный подход заключается в имитации стандартной процедуры подтверждения базового ресурса БМИ, равного 25 годам. При типовых испытаниях кабели должны выдержать 250 циклов нагрева до 105 °С. Отсюда 25 циклов эквивалентны эксплуатации в течение 2,5 года.

Оценка технического состояния образцов кабелей с БМИ выполнялась в исходном состоянии (после 20 летней эксплуатации в нормальных условиях) и после дополнительного ускоренного старения, эквивалентного 2,5 – 5 годам нормальной эксплуатации.

На рис.6 – 7 приведены результаты измерений диэлектрических параметров кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ в исходном состоянии и в процессе теплового старения на трех частотах: 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц.

При однородной фазной и поясной изоляции, межфазном пространстве величина $\text{tg}\delta$ не должна зависеть от схемы включения кабеля, что подтверждается для образца II.

Для образца I наблюдаются значительно более высокие уровни $\text{tg}\delta$ по сравнению с образцом II. Кроме того, в областях межфазного пространства (1-3, 2-4) уровень $\text{tg}\delta$ выше, чем в остальных областях (фазной и поясной

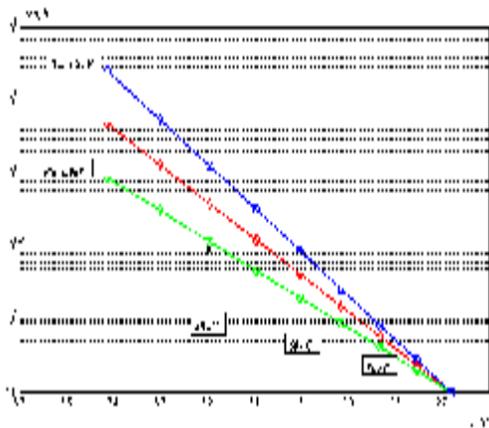


Рис.5 – Зависимости ресурса от температуры в масштабе закона Аррениуса (по горизонтали – шкала обратных температур; по вертикали – логарифмическая шкала). Показано три зависимости при энергиях активации $W_a=0,8$ эВ (нижняя линия), 1 эВ (средняя линия); 1,2 эВ (верхняя линия)

изоляции). Похоже, что влага сосредоточена и в толще изоляции, и в межфазном пространстве образца *I*. После 1-й недели термостарения при 105 °С (рис.7, область 2) произошла подсушка образца. И, как результат, тангенс угла диэлектрических потерь уменьшился. После 5-ти недель старения при 105 °С и двух суток при 206 °С (рис.7, область 3) наблюдается значимое увеличение $tg\delta$ на частоте 10 кГц: потери возросли более чем в 4 раза (сравни границы области 2 и 3), что обусловлено процессами старения БПИ. Критерием значимости отличия $tg\delta$ в процессе теплового старения может быть параметр Тьюки T_k . Он равен сумме двух чисел: $T_k = M + K$, где M - число элементов первой выборки, превосходящих наибольший из элементов второй выборки; K - число элементов второй выборки, меньших наименьшего элемента первой выборки. Если $T_k > 7$, то при доверительной вероятности $P_d = 95\%$ выборки отличаются значимо.

Для сравниваемых выборок по $tg\delta$ до и после теплового старения это подтверждается для частот 10 кГц и 100 Гц (см. рис. 7).

В правом углу рис.6 приведена фотография фазной изоляции кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ после цикла теплового старения. Кабельная бумага потемнела, при разматывании с жилы ломается.

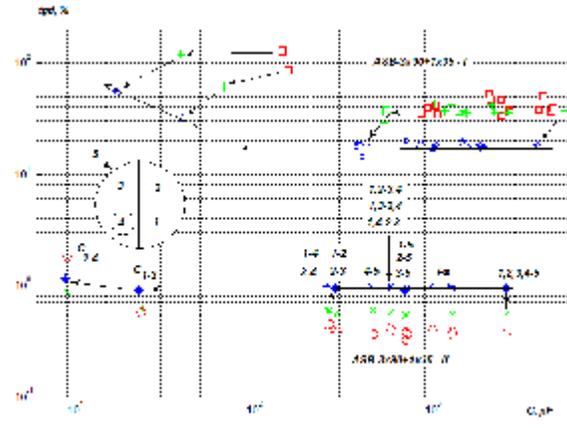


Рис.6 – Параметры образцов кабеля АСБ в исходном состоянии (перед ускоренным старением): *I* - образец, отобранный с края бухты (увлажненный); *II* – образец, отобранный на расстоянии 2,5 м от края бухты. Длина образцов – по 2,5 м

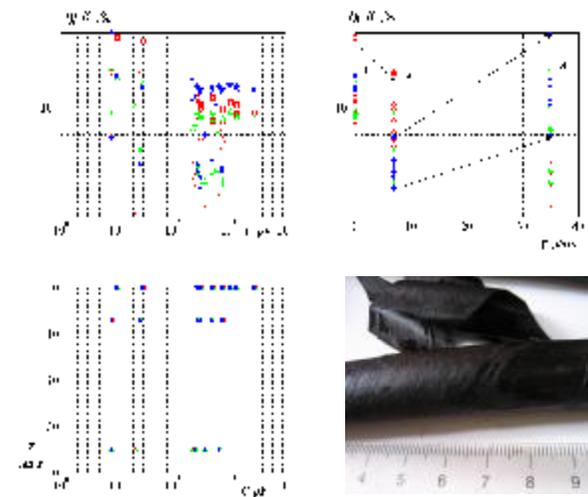


Рис.7 – Диаграмма параметров изоляционных промежутков образца кабеля АСБ-3х90+1х50 в исходном состоянии (1), после 1-й недели термостарения при 105 °С (2) и после 5-ти недель старения при 105 °С и двух суток при 206 °С (3)

Тепловое старение кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ привело к уменьшению $tg\delta$ на частоте 100 Гц и росту тангенса угла диэлектрических потерь

на частоте 10 кГц. Снижение потерь на частоте 100 Гц свидетельствует о подсушке образцов в термостате; увеличение $\text{tg}\delta$ на частоте 10 кГц – об окислении кабельных бумаг. Уровень тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 10 кГц свыше 2% свидетельствует о состоянии изоляции, при котором может произойти тепловой пробой кабеля в эксплуатации.

Выводы.

1. Оперативный контроль результатов обследований силовых кабелей методом совокупных измерений затруднен: пока не закончится последнее измерение и не выполнена математическая обработка, трудно оценивать качество результатов. Поэтому оперативный анализ процессов старения при обследовании кабелей методом совокупных измерений следует выполнять без математической обработки.

2. Корректное ускоренное тепловое старение должно выполняться при температурах, соответствующих условиям адекватности процессов старения при нормальной рабочей температуре, т.е. практически одинаковых энергиях активации.

3. При однородной фазной и поясной изоляции, межфазном пространстве силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией величина $\text{tg}\delta$ не зависит от схемы обследования кабеля.

4. Наблюдаемые различия уровня $\text{tg}\delta$ в зависимости от схемы обследования – признак старения кабелей.

5. Диэлектрическая спектроскопия силовых кабелей, т.е. измерения потерь на разных частотах, позволяет идентифицировать как процессы увлажнения – сушки, так и непосредственного окисления бумажно-пропитанной изоляции в процессе старения. Первые проявляются на нижней границе звукового диапазона, вторые – на верхней.

Список литературы: 1. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6 – 35 кВ / И.Н. Привалов // Электротехнический рынок. – 2008. – №2. 2. Канискин В. А. Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / В. А. Канискин, С. А. Коцур, И. Н.Привалов / Новости электротехники. – 2005. – № 5 (35). 3. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С.Москвитин // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2006. – №34. – С.34 – 40. 4. Беспрозванных А.В. / Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке/ А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.С. Москвитин // Электричество – 2010. – №1 – С.48 – 54. 5. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных // Технічна електродинаміка. – № 3. – 2008. – С. 30 – 37. 6. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных //Электротехника и электромеханика. – 2007. – №1. – С.62-66.

Поступила в редакцию 27.12.2010

УДК 621.311

И.А. НЕМИРОВСКИЙ, канд. техн.наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Н.Ю. ЮРИН, магистр, НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ И ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В статье был проведен анализ проблемы утилизации твердых бытовых отходов в мире и на Украине. Проанализированы различные методы переработки и утилизации отходов потребления. Проведена оценка потенциала использования бытовых отходов.

В статті був проведений аналіз проблеми утилізації твердих побутових відходів в світі і на Україні. Проаналізовані різні методи переробки і утилізації відходів споживання. Проведена оцінка потенціалу використання побутових відходів.

In the article the analysis of problem of utilization of hard domestic wastes was conducted in world and on Ukraine. Different methods of processing and utilization of wastes of consumption are analysed. Estimation of potential of utilization of domestic wastes is conducted.

На сегодняшний день одной из глобальных проблем человечества является экономически выгодная и экологически безопасная утилизация отходов производства и потребления. В среднем в мире доля промышленных отходов составляет порядка 85 – 90 %, остальные 10 – 15% приходятся на твердые бытовые отходы. Однако, острой мировой проблемой является утилизация именно бытовых отходов. Это связано с тем, что во-первых, твердые промышленные отходы (ТПО), в отличие от твердых бытовых отходов (ТБО), представляют собой более или менее однородные продукты, которые являются результатом производственного процесса и не требуют предварительной сепарации по группам для их переработки, что в свою очередь упрощает процесс переработки и утилизации. Во-вторых, между существованием относительно небольшой массы ТБО и огромной массой промышленных отходов существует прямая связь. Именно производство первичных материалов для изготовления товаров в конечном результате приводит к образованию промышленных отходов. Подсчитано, что каждой тонне бытовых отходов соответствует пять тонн промышленных отходов на стадии изготовления продукции и двадцать тонн – на стадии получения первичных ресурсов из недр.

К твердым бытовым отходам относятся отходы, образующиеся в жилых и общественных зданиях, торговых, зрелищных, спортивных и других предприятиях (включая отходы от текущего ремонта квартир), отходы от отопительных устройств местного отопления, смет, опавшие листья, собираемые с дворовых территорий, и крупногабаритные отходы. Такое определение соответствует зарубежному термину «твердые муниципальные отходы» (Municipal Solid Waste) . Данный класс отходов пред-

ставляет собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава. Основные компоненты отходов потребления – использованная упаковка, пищевые остатки, отработанные товары и материалы (в том числе опасные – аккумуляторы, батарейки, ртутные и обычные лампы накаливания, бытовая химия), изношенные автомобильные шины, уличный мусор, срезаемые ветви, листья и т.п.

В среднем каждый человек в мире за день образует около 1 кг бытовых отходов. Сегодня на одного жителя Соединенных Штатов ежедневно приходится около 2 кг мусора. Это рекордная величина, но и в других развитых странах показатели немалые – в Бельгии, Великобритании, Германии, Японии на одного человека ежегодно приходится 340 – 440 кг бытовых отходов, в Австрии и Финляндии – свыше 600 кг. Для Украины данный показатель составляет порядка 300 кг ТБО на одного человека в год. По подсчетам экспертов, в США количество бытовых отходов на душу населения возрастает на 10 % каждые 10 лет, аналогичная ситуация и в других развитых странах.

Масса мирового потока бытовых отходов составляет ежегодно около 400 миллионов тонн, из которых около 70 % уничтожается путем захоронения под землей. Такое количество, без преувеличения, достигает геологических масштабов: с мусором в биосферу попадает около 85 млн. тонн органического углерода. Для сравнения: природное поступление этого элемента в почвенные пласты планеты составляет 40 млн. тонн в год.

В Украине количество бытовых отходов не очень отстает от средне-европейского и составляет около 38 – 40 млн. м³ ежегодно (или около 10 млн. тонн). При незначительном сокращении населения, в Украине наблюдается неуклонный рост количества образуемых ТБО, вызванный развитием потребительского рынка, повышением благосостояния части населения, дифференциацией торговли, использованием современных логистических технологий, возросшими требованиями к безопасности жизнедеятельности и т.д. Средний ежегодный прирост объемов бытовых отходов в стране составляет 5 – 6%.

На данном этапе твердые бытовые отходы тают в себе значительную экологическую опасность. Более 70 % всех твердых бытовых отходов в мире утилизируется путем захоронения, для Украины эта цифра ещё более критична и составляет 97 %.

Захоронение отходов крайне негативно воздействует на окружающую среду. Во-первых, попадающий с территории свалок фильтрат загрязняет подземные воды соединениями тяжелых металлов, токсичными веществами. Гниение органических соединения приводит к возникновению опасных для здоровья человека инфекций и болезнетворных бактерий. Так же опасность для окружающей среды несет свалочный газ, который во-первых, вносит свой вклад в глобальное потепление (глобальная эмиссия свалочного метана составляет 40 млн. тонн в год, или около 8 %

его общепланетного потока), во вторых является источником несанкционированных возгораний, в результате чего в атмосферу попадают крайне токсичные соединения. Кроме того, под свалочные полигоны отводятся значительные территории, которые впоследствии консервируются и становятся непригодными для использования. Многочисленные исследования доказывают крайне негативное воздействие свалочных токсинов на здоровье людей. Ученые из Йельского университета, исследовав здоровье 27115 младенцев, пришли к выводу, что женщины, проживающие по близости со свалочными полигонами, имеют на 63 % большую вероятность родить больного ребенка. Дальнейший анализ показал, что проживание возле свалок повышает вероятность развития нарушений нервной системы на 29 %, костно-мышечной системы на 16 %, кожи на 32 % (таблица 1.1.).

Таблица 1- Воздействие свалочных токсинов на здоровье человека

Заболевание	Увеличение вероятности, %
Рождение больного ребёнка	63 %
Нарушения нервной системы	29 %
Нарушения костно-мышечной системы	16 %
Заболевания кожи	32 %
Расщелина позвоночника у детей	33 %

Помимо отрицательного воздействия самих полигонов, в результате захоронения под землю уходят значительные энергетические и материальные ресурсы, которые можно было повторно использовать. Таким образом, захоронение, как доминирующий метод утилизации отходов, является экологически опасным и экономически не выгодным.

В мире на данный момент, помимо захоронения, используются достаточно большое количество разнообразных методов утилизации твердых бытовых отходов, это объясняется как отличиями в подходах к решению этой проблемы, так и спецификой развития технической базы.

В мировой практике нашли промышленное применение следующие методы утилизации и переработки ТБО: захоронение на специальных полигонах; термическая обработка (сжигание, пиролиз); биотермическое аэробное компостирование (с получением удобрения или биотоплива); анаэробная ферментация (с получением биогаза); сортировка (с извлечением тех или иных ценных компонентов для вторичного использования, наиболее пригодных технически, экологически и экономически).

Наглядное представление методов утилизации в виде схемы приведено на рисунке 1.1.

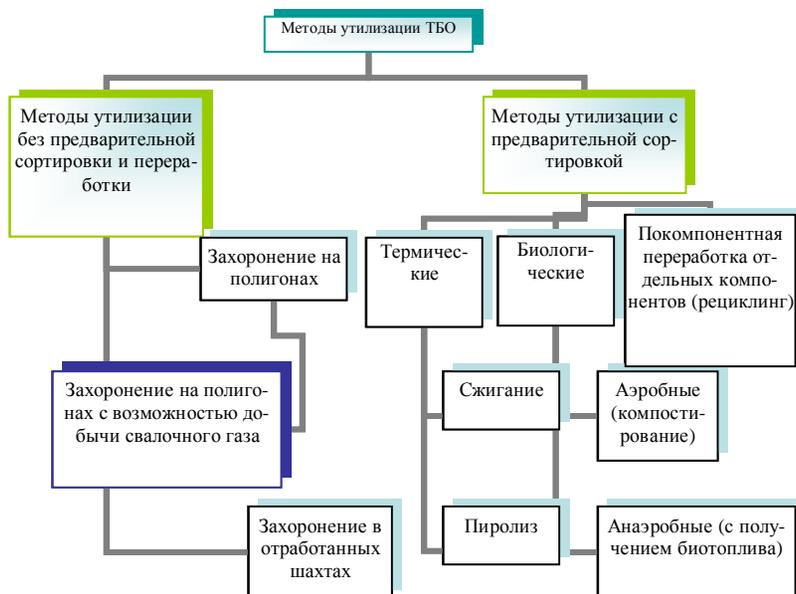


Рис. 1 – Методы утилизации твердых бытовых отходов

Одним из наиболее распространенных и технически отработанных методов промышленной обработки ТБО перед их удалением на свалки является сжигание. В европейских странах сжиганием перерабатывают 20 – 25 % объема городских отходов, в Японии - около 65% , в США - около 15%. Сжигание бытовых отходов позволяет использовать их энергетический потенциал (теплота сгорания ТБО около 9 Мдж/кг), уменьшить количество захороняемых отходов (объем отходов уменьшается в 10 раз). Недостатками мусоросжигания является: опасность загрязнения атмосферы; уничтожение ценных компонентов; высокий выход золы и шлаков (около 30% по массе); сложность стабилизации процесса сжигания. Но данные проблемы постепенно решаются путем разработки новых конструктивных решений. Наиболее оптимальным методом сжигания ТБО, является совмещение системы по сжиганию предварительно переработанных отходов с котельным оборудованием ТЭС, при долевого энергетическом вкладе ТБО порядка 10 – 15 %. Такая схема позволяет сократить капитальные затраты, улучшить экологические показатели, а так же в 2–3 раза повысить эффективность сжигания бытовых отходов.

Сжигание не является единственным методом термической переработки твердых бытовых отходов. В последнее время все больше внимания стали уделять такой утилизационной технологии как пиролиз.

Пиролиз может стать дешевым и не вредным для окружающей среды методом обеззараживания отходов. Технология пиролиза заключается в необратимом химическом разложении мусора под действием температуры без доступа кислорода. По степени температурного воздействия на вещество, пиролиз условно разделяется на низкотемпературный (до 900°C) и высокотемпературный (сверх 900°C).

Преимущество пиролиза по сравнению с непосредственным сжиганием подходов заключается, в первую очередь, в его эффективности с точки зрения предотвращения загрязнения окружающей среды. С помощью пиролиза можно перерабатывать составляющие отходов, которые трудно поддаются утилизации, такие как автопокрышки, пластмасса, отработанные масла. После пиролиза не остается биологически активных веществ, поэтому подземное складирование пиролизных отходов не наносит вред окружающей среде. Образующийся пепел имеет высокую плотность, которая резко уменьшает объем отходов.

Следующий метод переработки ТБО, применяемый в мировой практике - биотермическое аэробное компостирование (с получением удобрения или биотоплива), при которых твердые бытовые отходы могут разлагаться почвенными микроорганизмами до простых химических элементов. С помощью компостирования можно избавиться от большинства органических материалов, таких как листья, древесина, пищевые, садовые и сельскохозяйственные отходы. Данный метод не получил широкого распространения в мире, к примеру в Европе с получением компоста перерабатывают около 2 % отходов. В СНГ было так же построено ряд компостных заводов, но практически все они производят компост низкого качества. Основной недостаток данного метода в том, что отходы не проходят должной первичной переработки и конечный продукт может содержать соединения тяжелых металлов, химически опасные вещества и пр.

Другой биологический метод промышленной переработки ТБО – получение и утилизация биогаза, образующегося при анаэробном разложении органических компонентов ТБО – чаще всего используется непосредственно на полигонах захоронения (в США, например, имеется около 80 установок по сжиганию метана, получаемого за счет гниения мусора на свалках). Вместе с тем в Германии и Японии разработана технология получения биогаза из органической фракции, выделенной из ТБО при их обогащении на специальных заводах. Возможность применения анаэробной ферментации органической фракции ТБО следует учитывать в тех случаях, когда имеется практическая потребность в биогазе (с учетом его невысокого качества).

В последнее время во многих европейских странах широкое распространение получил метод механизированной покомпонентной сортировки отходов, с извлечением и последующим использованием ценных компонентов. В настоящее время в различных странах действует несколько десятков заводов, применяющих сортировку ТБО (извлечение металлов, легкой фракции, стеклобоя и др.). В ряде европейских стран вторичная переработка отходов достигает 20 %. Как показывает практика, сортировка сама по себе, как самостоятельная операция, не решает задачу санитарной очистки города и оптимальной переработки ТБО: выявляемые компоненты (за исключением металлов) сбываются с трудом, либо требуют создания специальных производств для их переработки, значительная часть отходов не утилизируется и подлежит удалению на полигоны. Вместе с тем важным преимуществом сортировки ТБО является возможность выделения из них тех компонентов, которые в процессе дальнейшей переработки (например, методом сжигания или компостирования) могут угрожать здоровью людей или не удовлетворять требованиям процессов дальнейшей обработки.

Таким образом, в результате анализа можно сделать следующие основополагающие выводы.

На данном этапе большая часть отходов в мире утилизируется путем захоронения на полигонах. Данный метод является экологически опасным и экономически не выгодным. В ближайшем будущем необходимо отказаться от прямого захоронения отходов без предварительной переработки. При этом существующие полигоны необходимо обеспечить всеми требуемыми средствами экологической защиты. Кроме того, для использования энергетического потенциала свалочного газа экологически и экономически целесообразным является строительство на существующих полигонах газодобывающих станций.

Наиболее эффективным современным методом утилизации является пиролизная технология, которая позволяет без экологических последствий перерабатывать отходы и при этом использовать их энергетический потенциал для выработки тепловой и электрической энергии.

Целесообразно, так же, переработка органической составляющей отходов методом компостирования при условии предварительной сепарации с выделением опасных составляющих. Получение высококачественного и недорогого удобрения позволит повысить конкурентоспособность сельского хозяйства, а так же обеспечит более эффективную переработку отходов.

В целом для построения наиболее безопасной и эффективной системы по утилизации бытовых отходов необходима комбинация различных методов переработки. При этом объединяющим процессом должна стать сортировка. Благодаря чему, повысится не только доля рецикла ряда компонентов ТБО как прибавки к сырьевому балансу страны, но и во многом

решится вопрос удаления опасных бытовых отходов и балластных компонентов, а так же вопрос оптимальной подготовки тех или иных фракций компонентов ТБО к дальнейшей переработке.

Список литературы: 1. Мороз О. Економічні аспекти проблем утилізації твердих побутових відходів / О. Мороз, А. Свентух, О. Свентух. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003, - 110 с.; 2. Савуляк В. Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів / В. Савуляк., О. Березюк. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006, - 218 с. 3. Пронина О. Технологические аспекты использования ТБО в теплоснабжении / Пронина О // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 2(90). 4. Супруненко О. Мусорная эра: от рассвета до заката / О.Супруненко // Экология и Общество.

Поступила в редколлегию 03.11.10

А.В.САПРЫКА, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЛАМП «REVOLUM»

Розглядаються технічні і експлуатаційні характеристики енергозберігаючих ламп з вбудованими пускорегулюючими апаратами Revolum® T5

Рассматриваются технические и эксплуатационные характеристики энергосберегающих ламп со встроенными пускорегулирующими аппаратами Revolum® T5

Technical and operating descriptions of energy-saving lamps are examined with built-in puskoreguliruyuschimi vehicles Revolum® T5

Введение. Проблема энергосбережения стала одной из актуальнейших проблем на современном этапе развития энергетики многих стран. Необходимость бережного отношения к природным ресурсам и к охране окружающей среды, а также к проблеме экономного расхода электроэнергии делает работу топливно-энергетического комплекса с каждым годом все более напряженным. Но не только экономический здравый смысл, но и ужесточение директив ЕС и стран СНГ усиливают давление на потребителей с целью перехода на энергосберегающие технологии.

В настоящее время парк светильников с люминесцентными лампами в Украине составляет свыше 70 миллионов шт. Основными местами применения осветительных приборов с люминесцентными лампами в настоящее время являются: заводские цеха, офисы, железнодорожные вокзалы, метро, подземные автостоянки, гостиницы, складские помещения, универмаги, супермаркеты, школы, учебные и проектные институты, больницы и т.п. При этом значительную часть люминесцентных ламп устанавливают в устаревшие осветительные системы с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами. Модернизация осветительного комплекса энергосберегающими люминесцентными лампами позволит сделать качественный скачок в современные технологии света и одновременно сэкономить от 40% до 70% электроэнергии.

При оценке системы освещения необходимо учитывать не только реально существующее качество электроэнергии, но и качество применяемых источников света. На современном этапе необходимо признать, что импортные лампы могут быть не всегда высокого качества, что в значительной мере может дискредитировать идею энергосбережения, так как поступающие люминесцентные лампы со встроенными пускорегулирую-

щими аппаратами часто демонстрируют очень низкие коэффициенты мощности и очень высокие уровни полного коэффициента гармоник, в следствие чего эти лампы создают серьезные проблемы. Поэтому исследование технических и эксплуатационных характеристик энергосберегающих ламп имеет важное народно-хозяйственное значение.

Исследования специалистов и ученых [1-9] показывают актуальность и необходимость решения проблемы энергосбережения и модернизации освещения.

Целью настоящей работы является исследование технических и эксплуатационных характеристик энергосберегающих ламп со встроенными пускорегулирующими аппаратами Revolum® T5.

Основная часть. Основными требованиями к исследуемым источникам света являются надежность, большой срок службы, потребление электроэнергии и высокая эффективность преобразования энергии в излучение.

Преимущество ламп «Revolum» заключается в том, что можно без высоких затрат, путем простой замены старых ламп произвести модернизацию систем освещения.

Лампы «Revolum» изготавливаются в широком диапазоне цветности и мощности. Качество освещения и их эксплуатационная надежность возрастают за счет того, что лампа работает в высокочастотном режиме (32000 Гц), дает постоянный немерцающий свет и автоматически отключается в случае дефекта или по истечении срока службы [10].

Проверка на соответствие в Национальном научном центре «Институт метрологии» энергосберегающих ламп со встроенными пускорегулирующими аппаратами модели Revolum-T5 28W показала, что они соответствуют требованиям ГОСТ 12.2.007.13-2000 и ГОСТ 21177-82.

Так как наиболее тяжелыми режимами для катодов разрядных ламп являются режимы пуска ламп, то нами были проведены исследования, которые позволили установить некоторые особенности пусковых режимов современных осветительных установок с лампами типа Revolum-T5 28W.

Исследования формы напряжения и тока в момент пуска лампы проводились при нормальных условиях окружающей среды на серийно выпускаемых образцах ламп «Revolux Services GmbH», Германия. Отклонение напряжения от номинального не превышало $\pm 1\%$. Для измерений использовались микропроцессорные анализаторы токов и напряжений в электрических сетях «Ресурс-UF2» и анализатор режимов электрических сетей АНФАС. В момент включения наблюдались импульсы тока, амплитудные значения которых, в 5-6 раз превышают значение тока в установившемся

режиме. Результаты измерений мощности в момент пуска лампы Revolum -T5 28W приведены в табл.1.

Таблица 1 - Мощность лампы Revolum -T5 28W в момент пуска

Активная мощность	17,52(B*A)
Реактивная мощность	1,35 (B*A) инд.
Полная мощность	17,58(B*A)

Для определения количественных характеристик влияния на сеть были проведены исследования гармонического состава входных напряжений и токов энергосберегающих ламп Revolum® T5. Спектральная характеристика рассматриваемого напряжения приведена на рис. 1.

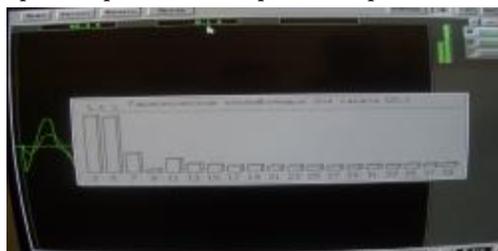


Рис.1– Гармонические составляющие напряжения

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 3,4%, что не превышает нормально допустимого значения согласно ГОСТ13109-97[11]. Обычно электронная схема улучшает характеристики лампы, увеличивая ее световую отдачу, но приводит к появлению гармоник и, тем самым, к искажению формы тока, в результате чего возникает коэффициент нелинейных искажений, благодаря которому происходит уменьшение общего коэффициента мощности.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики входных токов исследуемых ламп, которые монотонно убывают по мере возрастания их порядкового номера. Коэффициент нелинейных искажений составил 14,5%, что практически не превышает нормы ДСТУ ІЕС 61000-3-2[12], которые устанавливают предельные уровни высших гармоник для светотехнической аппаратуры.

На протяжении последних лет на станциях метрополитена проводится реконструкция осветительных установок. Так исследования освещенности проведенные на станции метро «Университет» показали, что после замены люминесцентных ламп L 58 W на лампы Revolum T5 освещенность объекта возросла в 2 раза по сравнению с нормативной (рис. 3).

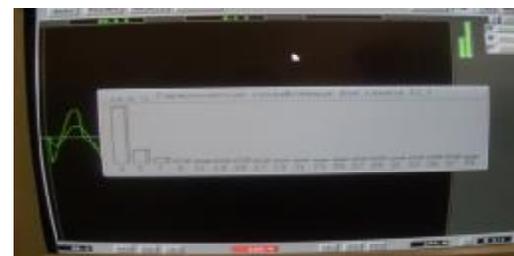


Рис.2 – Гармонические составляющие тока

Результаты замеров токов на щитах освещения станции метро также подтверждают значительное снижение токов (табл.2), а следовательно и потребляемой мощности на освещение при эксплуатации ламп Revolum T5.

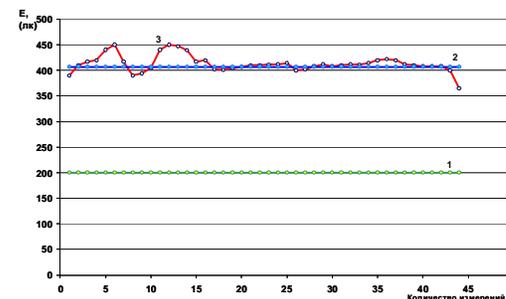


Рис.3 – Горизонтальная освещенность лампами Revolum T5 в зале станции метро «Университет» (1- нормативная горизонтальная освещенность, 2 – средняя горизонтальная освещенность, 3 – горизонтальная освещенность)

Проведенные исследования температуры на станциях метро подтверждают, что энергосберегающие люминесцентные лампы фирмы «Revolum» также не будут способствовать повышению температуры (рис. 4).

Таблица 2 – Результаты замеров токов на щитах освещения

№	Помещение	Место за-меров	Фаза	Ток до за-мены, А	Ток после замены, А
				Лампы L58W	Лампы Re-volum Ts
1	Зал	Щит 3, Секция 1, Группа 1	А	14,00	3,50
2			В	18,00	4,20
3			С	23,00	5,70
4	Зал	Щит 3, Секция 2, Группа 1	А	23,50	5,90
5			В	22,90	6,40
6			С	26,30	5,00
7	Зал	Щит 3, Секция 2, Группа 1	А	18,60	4,00
8			В	24,00	5,00
9			С	14,00	2,90
10	Платформа 1	Щит 2, Секция 2, Группа 1	А	30,90	7,50
11			В	23,90	5,20
12			С	15,40	4,50

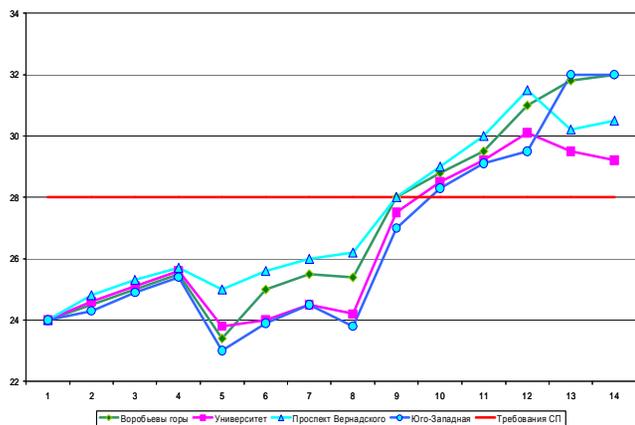


Рис. 4 – Температура на станциях метрополитена

Выводы. Таким образом, применение энергосберегающих люминесцентных ламп фирмы «Revolum» не приведет к обострению проблемы качества электрической энергии в осветительных сетях и не будет способствовать повышению температуры на станциях метрополитена.

Применение энергосберегающих ламп Revolum T5 вместо ламп L 58 W позволит улучшить качество освещения на станциях метрополитена, повысить уровень средней освещенности на объекте, а также значительно уменьшить потребляемую мощность.

Список литературы: 1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. / Ю.Б. Айзенберг. – 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Знак, 2006. - 972 с. 2. Айзенберг Ю. Б. Энергосбережение в освещении. / Ю.Б. Айзенберг. – М. : Издательство «Знак», 1999. – 264 с. 3. Кожушко Г.М. О необходимости разработки государственной политики по экономии электроэнергии на освещение/ Г.М. Кожушко // Коммунальное хозяйство городов. Научн.- техн. сборник. Вып.22. – К.:Техника, 2000.–С. 213-217. 4. Жаркин А. Ф. Анализ энергоэффективности энергосберегающих компактных люминесцентных ламп./ А. Ф. Жаркин, А. В. Козлов, С. А. Палачев, Ю. Г Дробот // Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. наук.-техн. журнал. №1. – Харків : ХНАМГ, 2007. – С.4-9. 5. Мазумдар С. Коэффициент мощности и гармонический анализ компактных люминесцентных ламп со встроеными ПРА / Мазумдар С., Мандал Р., Мухерджи А., Сур А. // Светотехника. 2010. – №1. – С 32-35. 6. Сапрыка А.В. Современные технологии в осветительных системах мегаполиса. / А.В. Сапрыка. – Х. : ХНУРЕ, 2010. – 260 с. 7. Сапрыка А.В. Модернизация осветительного комплекса мегаполиса. / А.В. Сапрыка // ПРОМЕЛЕКТРО. – Информ. зб. «Промислова електроенергетика та електротехніка» Вип. 1. – 2010. – С.31-35. 8. Сапрыка А.В. Исследование эксплуатационных характеристик современных энергосберегающих осветительных установок/ А.В. Сапрыка // Коммунальное хозяйство городов: межвед. науч.-техн. сб. – К. : «Техніка», 2008. – Вып. 84. – С. 265-270. 9. О городской целевой программе «Энергосбережение в г. Москве на 2009-2011 годы и на перспективу до 2020 года» // Светотехника.– 2009. – №1. – С. 61-62. 10. Каталог продукции фирмы Revolum [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.revolum.de. 11. ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”. 12. ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2007 (ІЕС 61000-6-3:2006, ІDT) Електромагнітна сумісність. Загальні стандарти. Емісія завод у житловому і торговельному середовищі та у виробничих зонах з малим енергоспоживанням.

Поступило в редколлегию 18.12.2010

Ю.А. СИРОТИН, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ПУЛЬСАЦИИ И ОСЦИЛЛЯЦИИ МОЩНОСТИ ПРИ СБАЛАНСИРОВАННОЙ НАГРУЗКЕ

Выяснено характеристическое свойство наличия колебаний (пульсации) мгновенной мощности и осцилляции потока энергии (ПЭ) в месте подключения потребителя с сбалансированной (симметричной) нагрузкой к распределительной сети с несимметричным напряжением. Возможность осцилляции ПЭ (обменных процессов) между нагрузкой и источником (распределительной сетью) обусловлена только фазовым сдвигом между током и напряжением оценена неравенством между введенным коэффициентом самоортогональности напряжения (качеством поставки) и коэффициентом мощности (качеством потребления).

З'ясована характеристична властивість наявності коливань (пульсації) миттєвої потужності і осциляції потоку енергії (ПЕ) в місці підключення споживача із збалансованим (симетричною) навантаженням до розподільної мережі з несиметричною напругою. Можливість осциляції ПЕ (обмінних процесів) між навантаженням і джерелом (розподільною мережею) обумовлена тільки фазовим зсувом між струмом і напругою оцінена нерівністю між введеним коефіцієнтом самоортогональності напруги (якістю поставки) і коефіцієнтом потужності (якістю споживання).

Characteristic property of presence of vibrations (pulsations) of instantaneous power and oscillations of energy stream (SE) in the place of connecting of user with the balanced (symmetric) loading to the distributive network with asymmetrical tension is found out. The oscillations of SE (exchange processes) possibility between loading and source (by a distributive network) is conditioned only by a phase change between a current and tension is appraised by inequality between the entered coefficient of samoortogonalnosti tension (by quality of delivery) and power-factor (by quality of consumption).

Введение. Для однофазной цепи синусоидального тока между реактивной мощностью Q , коэффициентом мощности I и обменными процессами имеется однозначная связь. Однако, если для однофазной цепи условие $Q \neq 0$ равносильно наличию обменных процессов (осцилляции ПЭ) между нагрузкой и источником, то для трехфазной цепи это не так. Одним из существенных отличий трехфазной цепи от однофазной цепи синусоидального тока является возможность передачи энергии с постоянной скоростью только в одном направлении: от источника в нагрузку (система уравновешена [1- 2]). Передача энергии от симметричного синусоидального источника в симметричную линейную нагрузку трехфазной системы происходит с постоянной скоростью.. Мгновенная мощность (ММ) не имеет колебательной компоненты, а ПЭ постоянный и однонаправленный даже при реактивной, но симметричной нагрузке. Нарушение симметрии напряжений или симметрии нагрузки в месте подключения потребителя к распределенной системе (разбаланс интерфейса «по-

ставщик- потребитель») может привести к пульсации ММ [2-3]. Неуравновешенный режим приводит к ухудшению работы нагрузок, чувствительных к колебаниям ММ. Пульсации не преобразуются в полезный вращающий момент вала двигателей, а переходят в тепло и вибрацию, что, в конечном счете, сокращает срок их службы [3-8].

В месте подключения потребителя к сети возможны три типа нарушения уравновешенного режима (разбаланс интерфейса «поставщик-потребитель»):

- 1) асимметрия нагрузки при симметричном напряжении,
- 2) несимметрия напряжения при симметричной нагрузке,
- 3) несимметрия напряжения и асимметрия нагрузки.

Разбаланс интерфейса первого и второго типа - частные случаи разбаланса третьего типа. Однако оба эти интерфейса имеют самостоятельный интерес. Они описывают два крайних случая нарушения уравновешенного режима: первый – только поставщиком, второй – только потребителем.

Исследованию нарушения первого типа посвящены работы [7-15]. В [10] для трехпроводной системы с нагрузкой типа треугольник получено выражение для амплитуды переменной компоненты ММ через мощность небаланса. В четырехпроводной системе для описания переменной компоненты ММ необходимо ввести понятие *вектора* мощности разбаланса [12-15]. В [15]. Показано, что как трех-, так и в четырехпроводной системе пульсации никак не связаны с реактивной мощностью. Анализ колебаний ММ для разбаланса третьего типа в терминах симметричных компонент проведен в [16]. Однако, введение 18 «элементарных» мощностей и придание им смысла амплитуд осцилляций не обосновано и математически не корректно. Эти «элементарные» мощности не инвариантны при преобразованиях координат. Не ясно, что означают эти «элементарные» мощности в фазовых координатах, а их физический смысл сомнителен. Многолетняя дискуссия [10-11, 16-21] о физическом смысле реактивной мощности и ее связи с вектором Пойтинга оставила открытым вопрос о связи обменных процессов как с реактивной мощностью, так и с вектором Пойтинга в разбалансированных системах даже при синусоидальном режиме.

Из трех типов разбаланса интерфейс второго типа наиболее близок к однофазной цепи, так как полная (кажущаяся) мощность полностью определена комплексной мощностью, а уравнение мощности в точке подключения симметричного потребителя имеет такой же вид, как и уравнение мощности для однофазной цепи (не содержит мощность небаланса [14]).

Целью работы является выяснение как фундаментальная энергетическая расчетная величина - реактивная мощность (определяемая во всех случаях синусоидального режима как мнимая часть комплексной

мощности $Q = \text{Im}(\mathcal{S})$, по-разному проявляющаяся во всех вышеприведенных случаях, связана с амплитудой колебательной компонентой ММ в точке подключения симметричного (точнее, сбалансированного) потребителя к сети с несимметричным напряжением.

В предлагаемой работе проведен анализ влияния несимметрии напряжения на ПММ в синусоидальной ситуации. Показано, что система может быть уравновешена (ПММ отсутствуют) и при несимметричном напряжении. Введенный коэффициент самоортогональности (СО) напряжения однозначно характеризует наличие ПММ. Возможность ПММ обусловлена только качеством поставляемого напряжения и никак не связана с реактивной мощностью. Возможность осцилляции ПЭ (обменных процессов) между нагрузкой и источником (распределительной сетью) оценена неравенством между введенным коэффициентом СО напряжения (*качеством поставки*) и коэффициентом мощности (*качеством потребления*).

Однофазная цепь

Представим известные энергетические соотношения для синусоидального режима в общей комплексной математической форме, чтобы показать как равносильные (эквивалентные) утверждения для однофазной цепи для трехфазной цепи становятся неэквивалентными. Рассмотрим однофазную цепь с мгновенными синусоидальными величинами напряжения и тока

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + j_v) = \sqrt{2} \Re[V \mathcal{V} e^{j\omega t}], \quad (1)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + j_i) = \sqrt{2} \Re[I \mathcal{I} e^{j\omega t}]. \quad (2)$$

Здесь

$$\mathcal{V} = V e^{j j_v}, \quad \mathcal{I} = I e^{j j_i} \quad (3)$$

- комплексные действующие величины (фазоры) тока и напряжения. Для мгновенной мощности из (1) и (2) следует

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = v(t)i(t) = \Re[\mathcal{V} \mathcal{I}^* + \mathcal{V} \mathcal{I} e^{j2\omega t}]. \quad (4)$$

$W = W(t)$ - поток энергии между источником и нагрузкой.

Вводя комплексную мощность (КМ) и *комплексную мощность колебаний*

$$\mathcal{S} = \mathcal{V} \mathcal{I}^*, \quad \mathcal{N} = \mathcal{V} \mathcal{I} = S^* e^{j2j_v}, \quad (5)$$

представим мгновенную мощность

$$p(t) = \Re[\mathcal{S} + \mathcal{N} e^{j2\omega t}] = \Re[\mathcal{S} + S^* e^{j2(\omega t + j_v)}]. \quad (6)$$

Здесь и дальше $\stackrel{\text{def}}{=}$ означает определение левой части через правую часть.

Обозначим фазовый сдвиг между комплексом напряжения \mathcal{V} и тока \mathcal{I} как $\Delta j = j_v - j_i$. Тогда из (3) следует, что КМ (5) можно записать как

$$\mathcal{S} = VI e^{j\Delta j} = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} e^{j\Delta j}. \quad (7)$$

Вещественная и мнимая части

$$P = \Re(\mathcal{S}) = VI \cos \Delta j, \quad Q = \Im(\mathcal{S}) = VI \sin \Delta j. \quad (8)$$

КМ (5) определяют среднюю за период T ($\omega T = 2\pi$) мощность и фазовый сдвиг между напряжением и током

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt, \quad \Delta j = \arctg(Q/P). \quad (9)$$

Мгновенная мощность

$$p(t) = P + \sqrt{P^2 + Q^2} \cos[2(\omega t + j_v) - \arctg(Q/P)] \quad (10)$$

содержит постоянную составляющую, равную активной мощности $P = \Re(\mathcal{S})$, и переменную составляющую, амплитуда которой равна полной (кажущейся) мощности

$$|\mathcal{N}| = |\mathcal{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = V \cdot I.$$

Из (10) следует:

1. Если реактивная мощность $Q = 0$ (чисто активная цепь / резонанс), то

$$p(t) = P[1 + \cos(2\omega t + 2j_v)]; \quad (11)$$

Амплитуда колебаний переменной компоненты равна активной мощности, а ПЭ однонаправлен (для всех моментов времени t выполнено $p(t) = \frac{dW}{dt} \geq 0$).

2. Наличие реактивных элементов в нагрузке (точнее, при $Q \neq 0$) влияет на амплитуду колебания переменной составляющей ММ и приводит к тому, что поток энергии W с комплексной мощностью $\mathcal{S} = P + jQ$ (точнее с активной мощностью P и фазовым сдвигом между напряжением и током $\Delta j = \arctg(Q/P)$) будет двунаправленным (существуют моменты времени t , когда выполнено $p(t) = \frac{dW}{dt} < 0$).

Так как мгновенную мощность можно записать как

$$p(t) = S[I + \cos(2\omega t + 2j_v - \Delta j)], \quad (12)$$

то следующие пять условий эквивалентны:

- a.) коэффициент мощности $I = P/S$ равен единице $I = 1$;
- b.) реактивная мощность равна нулю $Q = 0$;
- c.) фазовый сдвиг между напряжением и током равен нулю $\Delta j = \arctg(Q/P) = 0$;

- d.) поток энергии однонаправленный $\frac{dW}{dt} \geq 0$;

- e.) амплитуда колебаний переменной компоненты равна активной мощности $|N^{\&}| = P$.

Нарушение любого из этих пяти условий приведет к нарушению остальных четырех и появлению осцилляции ПЭ между нагрузкой и источником.

Таким образом, для однофазной цепи синусоидального тока:

ü ПММ будут всегда, - даже когда отсутствуют реактивные элементы. ПММ внутренне присущее (ингерентное) свойство однофазной цепи, обусловленное синусоидальным напряжением.

ü Реактивная мощность ($Q \neq 0$) является одним из характеристических свойств двунаправленности ПЭ.

Покажем, что для трёхфазной цепи отличие реактивной мощности от нуля ($Q \neq 0$) не является характеристическим свойством осцилляции ПЭ.

Трёхфазный интерфейс «поставщик – потребитель»

В трёхпроводном сечении $\langle a, b, c \rangle$ трёхфазной системы с синусоидальными процессами мгновенные значения напряжения и тока

$$\mathbf{v}(t) = (v_a(t), v_b(t), v_c(t))^* = \sqrt{2} \Re e[\mathbf{V} e^{j\omega t}], \quad (13a)$$

$$\mathbf{i}(t) = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^* = \sqrt{2} \Re e[\mathbf{I} e^{j\omega t}] \quad (13b)$$

однозначно определены трехмерными комплексными векторами (3D-комплексными) напряжения $\mathbf{V} = (V_a^{\&}, V_b^{\&}, V_c^{\&})^*$ и тока $\mathbf{I} = (I_a^{\&}, I_b^{\&}, I_c^{\&})^*$ – векторами комплексных действующих величин:

$$\mathbf{V} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{v}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (14)$$

где \bullet^* – знак транспонирования, T – период ($T\omega = 2\pi$).

Пара 3D-комплексов (14) в трёхпроводном сечении $\langle a, b, c \rangle$ определяет:

ü комплексную мощность (КМ)

$$\mathcal{S}_{def}^{\&} = V_a^{\&} I_a^{\&*} + V_b^{\&} I_b^{\&*} + V_c^{\&} I_c^{\&*} = |\mathcal{S}^{\&}| e^{j\theta}, \quad (15)$$

$$\mathcal{S}^{\&} = \sqrt{P^2 + Q^2} e^{j\theta}, \quad \theta = \arg \mathcal{S}^{\&} = \arctg Q/P$$

ü и ее квадратурные составляющие

$$\mathcal{S}^{\&} = P + jQ, \quad P = \Re e(\mathcal{S}^{\&}), \quad Q = \Im m(\mathcal{S}^{\&}); \quad (16)$$

ü комплексную мощность пульсаций (МП) [4]

$$N^{\&} = V_a^{\&} I_a^{\&} + V_b^{\&} I_b^{\&} + V_c^{\&} I_c^{\&} = |N^{\&}| e^{j \arg N^{\&}}; \quad (17)$$

ü мгновенную мощность

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = v(t)^* i(t) = \Re e[\mathcal{S}^{\&} + N^{\&} e^{j2\omega t}]. \quad (18)$$

Энергия, переданная через трёхпроводное сечение $\langle a, b, c \rangle$ за интервал наблюдения $[t, t + T]$, равна

$$W = \int_t^{t+T} p(t) dt = \int_t^{t+T} [P + |N^{\&}| \cos(2\omega t + \arg N^{\&})] dt = P \cdot T. \quad (19)$$

Пространство 3D-комплексов и синусоидальные процессы

Комплексное и стандартное скалярное произведение

Рассмотрим множество (пространство) различных 3D-комплексов. Для произвольного 3D-комплекса $\mathbf{F} = [F_a^{\&}, F_b^{\&}, F_c^{\&}]^*$ определим комплексно сопряженный вектор и его норму

$$\mathbf{F}^*_{def} = (F_a^*, F_b^*, F_c^*), \quad (20)$$

$$|\mathbf{F}|_{def} = \sqrt{|F_a^{\&}|^2 + |F_b^{\&}|^2 + |F_c^{\&}|^2}. \quad (21)$$

Для пары 3D-комплексов $\mathbf{H} = (H_a^{\&}, H_b^{\&}, H_c^{\&})^*$ и $\mathbf{F} = (F_a^{\&}, F_b^{\&}, F_c^{\&})^*$ определим комплексное скалярное произведение

$$(\mathbf{H}, \mathbf{F})_{def} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^* = H_a^{\&} F_a^* + H_b^{\&} F_b^* + H_c^{\&} F_c^*, \quad (22)$$

КМ (15) и комплексная МП (17) выражаются с помощью скалярного произведения (22) как

$$\mathcal{S}^{\&} = (\mathbf{V}, \mathbf{I}) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^*, \quad N^{\&} = (\mathbf{I}, \mathbf{V}^*) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{V}. \quad (23)$$

Для 3D комплекса \mathbf{H} можно определить синусоидальный (гармони-

ческий) трехфазный процесс $\mathbf{h}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{H}e^{j\omega t}]$ Для любой пары 3D синусоидальных процессов $\mathbf{h}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{H}e^{j\omega t}]$ и $\mathbf{f}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{F}e^{j\omega t}]$ справедливо тождество

$$\mathbf{h}(t) \cdot \mathbf{f}(t) = \Re[\mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^* + \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{F}e^{j2\omega t}]. \quad (24)$$

Из (24) в частности следует [4]

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = \Re[\mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^* + \mathbf{V}^* \cdot \mathbf{I}e^{j2\omega t}]. \quad (25)$$

Усреднение тождества (24) на интервале $[t, t+T]$ длиной в период дает

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{h}(t) \cdot \mathbf{f}(t) dt = \Re[\mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^*]. \quad (26)$$

Равенство (26) позволяет связать комплексное скалярное произведение (22) в пространстве 3D-комплексов со стандартным скалярным произведением

$$(\mathbf{h}, \mathbf{f}) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{h}(t) \cdot \mathbf{f}(t) dt, \quad (\mathbf{h}, \mathbf{f}) = \Re e(\mathbf{H}, \mathbf{F}) \quad (27)$$

в пространстве синусоидальных процессов.

Для гармонического трехфазного процесса $\mathbf{h}(t) = \sqrt{2}\Re[\mathbf{H}e^{j\omega t}]$ норма его 3D-комплекса (21) и действующая величина равны

$$|\mathbf{H}| = |\mathbf{h}| = H, \quad H = |\mathbf{h}| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{h}(t) \cdot \mathbf{h}(t) dt}, \quad (28)$$

3D-комплексы \mathbf{H} и \mathbf{F} ортогональны, если $(\mathbf{H}, \mathbf{F}) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^* = 0$.

$$\mathbf{H} \wedge \mathbf{F} \text{ Ы } (\mathbf{H}, \mathbf{F}) = 0$$

Процессы $\mathbf{h}(t)$ и $\mathbf{f}(t)$ ортогональны если $(\mathbf{h}, \mathbf{f}) = 0$. Из (27) следует

ет

$$(\mathbf{H}, \mathbf{F}) = 0 \Rightarrow (\mathbf{h}, \mathbf{f}) = 0.$$

Обратное утверждение не верно.

Несимметричное напряжение и сбалансированная нагрузка

Коллинеарность 3D-комплексов тока и напряжения

Пара 3D-комплексов \mathbf{H} и \mathbf{F} комплексно коллинеарны $\mathbf{H} \parallel \mathbf{F}$, если их координаты комплексно пропорциональны, т. е. существует комплексное число $\mathbf{b}^{\&}$ такое, что $\mathbf{H} = \mathbf{b}^{\&} \mathbf{F}$

$$\mathbf{H} \parallel \mathbf{F} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} \mathbf{H} = \mathbf{b}^{\&} \mathbf{F}, \quad \mathbf{b}^{\&} = \mathbf{b}' + j\mathbf{b}'' \neq 0. \quad (29)$$

Если $\mathbf{H} \parallel \mathbf{F}$, то соответствующие процессы $\mathbf{h} = \mathbf{h}(t)$ и $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$ уравновешены. Если $\mathbf{b}'' = 0$ ($\mathbf{b}' = 0$), то будем говорить, что 3D-комплексы \mathbf{H} и \mathbf{F} реально (мнимо) параллельны.

Для трёхпроводного сечения $\langle a, b, c \rangle$ определим эквивалентные проводимости фаз

$$Y_k^{\&} = I_k^{\&} / V_k^{\&} = (I_k / V_k) e^{jDj_k} \quad k \in \{a, b, c\}, \quad (31)$$

Dj_k -разность фаз между током и напряжением в k - фазе. Если в трёхпроводном сечении подключена нагрузка типа звезды с заземленной нейтралью, то введенные проводимости (31) равны проводимостям фаз нагрузки.

Если проводимости (31) во всех фазах одинаковы

$$Y_k^{\&} = Y_S^{\&} = |Y_S^{\&}| e^{j\theta_S} \quad k \in \{a, b, c\}, \quad (32)$$

то пара 3D-комплексов напряжения и токов комплексно коллинеарны ($\mathbf{I} \parallel \mathbf{V}$)

$$i(t) = |Y_S^{\&}| u(t + j_s / \omega) \quad \text{Ы} \quad \mathbf{I} = Y_S^{\&} \mathbf{V}, \quad (33)$$

Величина $|Y_S^{\&}| > 0$ и имеет размерность проводимости, а j_s – общий фазовый сдвиг между трёхфазными токами и напряжениями. Если в этом месте подключена нагрузка, то условие (32) означает, что нагрузка сбалансирована (симметрична).

Реактивная мощность и фазовый сдвиг

Если нагрузка сбалансирована (33), то умножая $\mathbf{I} = Y_S^{\&} \mathbf{V}$ скалярно справа на \mathbf{V} для КМ получим

$$S^* = (\mathbf{I}, \mathbf{V}) = Y_S^{\&} / V^2 = |V| |I| e^{j\theta_S}. \quad (35)$$

Откуда следует, что полная (кажущаяся) мощность [23]

$$S_B = \frac{1}{|V|} |I| \quad (36)$$

равна геометрической мощности [16] (модулю КМ)

$$S_B = S_G, \quad S_G = |S^*| = |S_a^* + S_b^* + S_c^*|.$$

Так как $S^{\&} = P + jQ$, то из (35) следует

$$P = \Re e[Y_S^{\&} / V^2] = G_S / V^2, \quad Q = \Im m[Y_S^{\&} / V^2] = -B_S / V^2, \quad (37)$$

что дает уравнение мощности и фазовые соотношения

$$S_B^2 = P^2 + Q^2, \quad j_s = \arctg \frac{B_S}{G_S} = -\arctg \frac{Q}{P}. \quad (39)$$

Таким образом, при асимметричном напряжении и сбалансированной (симметричной) нагрузке реактивная мощность Q определяет фазовый сдвиг между трехфазными токами и напряжениями, а полная мощность полностью определена комплексной мощностью.

Активный и реактивный токи

Реально сбалансированная нагрузка ($Y_S = G_S$) соответствуют *реальной* коллинеарности, а *мнимо* сбалансированная нагрузка ($Y_S = jB_S$) – *мнимой* коллинеарности 3D-комплексов напряжения и тока.

Если 3D-комплексы напряжения и тока комплексно коллинеарны, то вектор тока можно представить суммой двух 3D компонент:

$$I = I_a + I_r \quad (40)$$

реально коллинеарной I_a и мнимо коллинеарной I_r , по отношению к 3D-комплексу напряжения

$$I_a = G_S V = \frac{P}{|V|^2} V, \quad I_r = jB_S V = \frac{Q e^{-j90^\circ}}{|V|^2} V. \quad (41)$$

Компоненты (41) задают мгновенный активный и реактивный токи

$$i_a = \sqrt{2} \Re e(I_a e^{j\omega t}) = \sqrt{2} \Re e\left(\frac{P}{|V|^2} e^{j\omega t}\right), \quad (42.a)$$

$$i_r = \sqrt{2} \Re e(I_r e^{j\omega t}) = \sqrt{2} \Re e\left(\frac{Q}{|V|^2} e^{j(\omega t - 90^\circ)}\right), \quad (42.б)$$

Эти токи определяют мгновенную активную и реактивную мощности

$$p_a(t) = u \cdot i_a, \quad p_r(t) = u \cdot i_r. \quad (43)$$

Справедливо разложение

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t), \quad p(t) = p_a(t) + p_r(t). \quad (44)$$

Активный и реактивный токи ортогональны как синусоидальные процессы

$$(i_a, i_r) = \Re e(I_a, I_r) = \Re e[jB_S G_S |V|^2] = 0. \quad (45)$$

Однако их 3D-комплексы не ортогональны (I_a, I_r) $\neq 0$. Из (24) следует, что при несимметричном напряжении

$$p_a(t) = u \cdot i_a = G_S |V|^2 + G_S \Re e[V \cdot V e^{j2\omega t}], \quad (46)$$

$$p_r(t) = u \cdot i_r = B_S \Re e[V \cdot V e^{j(2\omega t + 90^\circ)}]. \quad (47)$$

Если напряжение симметрично, т.е. $V = \sqrt{3} e_1$, где $e_1 = (1, a^*, a) / \sqrt{3}$ нормированный вектор прямой последовательности

($a = e^{j2\pi/3}$, $1 + a + a^* = 0$, $a^2 = a^*$, $aa^* = 1$), то $V \cdot V = \sqrt{3}(1 + \alpha + \alpha^*) = 0$ и активный ток обеспечивает только ПЭ с постоянной активной мощностью $G_S |V|^2 = P$.

При несимметричном напряжении величина $V \cdot V \neq 0$ и она вносит вклад $G_S \Re e[V \cdot V e^{j2\omega t}] = p_a(t) - P$ в ПММ

$$\Re e[V \cdot I e^{j2\omega t}] = (p_a(t) - P) + p_r(t). \quad (48)$$

В силу ортогональности разложения полного тока (44) имеем

$$|i|^2 = |i_a|^2 + |i_r|^2, \quad |i|^2 \geq |i_a|^2. \quad (49)$$

Активный ток является решением условно экстремальной задачи

$\min_{i, P=(i, u)} |i|^2$ и равен ортогональной проекции полного тока на напряжение в пространстве синусоидальных процессов. Активный ток (42a) имеет однозначный энергетический смысл: «При заданном напряжении активный ток поставляет ту же самую активную мощность P , что и полный ток, и дает минимальные тепловые потери (на Юм): $\min_{i, P=(i, u)} |i|^2 = |i_a|^2$ ».

При несимметричном напряжении реактивный ток $i_r = i_r(t)$ вносит вклад равный $B \Re e[V \cdot V e^{j(2\omega t + 90^\circ)}]$ только в пульсации ПММ (48) и дает дополнительные потери $|i_r|^2 > 0$.

Само-ортогональность напряжения

Обозначим $\kappa = \frac{V \cdot V}{|V|^2}$. Тогда

$$(V, V^*) = V \cdot V = |V|^2 \kappa, \quad \kappa = |\kappa| e^{j\theta}. \quad (50)$$

Поскольку

$$V^* \perp V \Leftrightarrow \kappa = 0, \quad (51)$$

то $\kappa = \kappa e^{j\theta}$ будем называть коэффициентом само-ортогональности (СО) напряжения. Если $V \perp V^*$ ($\kappa = 0$), то будем говорить, что V самоортогонален.

При сбалансированной нагрузке выражение (23) для КМ колебаний

$$\kappa = Y_S^* V \cdot V = \frac{Y_S^* / |V|^2 V \cdot V}{|V|^2} = S^* \kappa \quad (52)$$

имеет такую же математическую структуру (5), как и в однофазной цепи. Однако, если для однофазной цепи выполнено

$$\kappa = e^{j2\phi_v}, \quad |\kappa| = 1 \text{ и } |\kappa| = |S|,$$

то для трехфазной цепи модуль коэффициента СО напряжения не превосходит единицы

$$|N| \leq 1, \quad |S| \leq |S|.$$

Из (52) следует, что $N = S^* \mu = \mu P e^{j\varphi_\mu} + \mu Q e^{j(\varphi_\mu - 90^\circ)}$. Согласно (46) и (47) имеем

$$p_r(t) = \mu Q \cos(2\omega t + \varphi_\mu - 90^\circ), \quad (53.a)$$

$$p_a(t) - P = \mu P \cos(2\omega t + \varphi_\mu). \quad (53.б)$$

Реактивная мощность не равна амплитуде мгновенной реактивной мощности.

Для КМ колебаний и ММ получим

$$|N| = \mu \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \arg(N S^*) = \arg(N) = j_m - \arg(S); \quad (54.a)$$

$$p(t) = P + m \sqrt{P^2 + Q^2} \cos(2\omega t + j_m - \arctan \frac{Q}{P}). \quad (54.б)$$

При асимметричном напряжении и симметричной нагрузке колебания ММ будут, даже если реактивная мощность равна нулю. Однако, если ПММ в однофазной цепи с синусоидальным источником будут всегда, то в трехфазной цепи с симметричной нагрузкой ПЭ постоянен, если 3D-комплекс напряжения V самоортогонален ($\mu = 0$). В частности, ПММ отсутствуют, если напряжение симметрично. Обратное утверждение неверно.

Несимметричное напряжение и уравновешенный режим

Каждый 3D-комплекс $V \in U$ ($|V| = 1$) из нормированного двухпараметрического семейства

$$U = U(c, d) = \frac{1}{2|c|} \begin{bmatrix} -j\sqrt{2(c^2 - d^2)} \\ c - jd \\ c + jd \end{bmatrix}$$

самоортогонален ($V^T V = V^2 \mu = 0$) и обеспечивает передачу энергии с постоянной скоростью.

При $c = -1/2$, $d = \sqrt{3}/2$ семейство (55) определяет симметричный 3D-комплекс прямой последовательности

$$V_1 = U(-1/2, \sqrt{3}/2) = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1/2 - j\sqrt{3}/2 \\ -1/2 + j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120^\circ} \\ e^{j120^\circ} \end{bmatrix}.$$

Асимметричный 3D-комплекс ($c = -\sqrt{3}$, $d = -1$)

$$V_2 = U(-\sqrt{3}, -1) = \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -2j \\ -\sqrt{3} + j \\ -\sqrt{3} - j \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -j \\ e^{j150^\circ} \\ e^{-j150^\circ} \end{bmatrix} \quad (55)$$

также содержится в семействе (55) и обеспечивает ПЭ с постоянной скоростью для симметричной нагрузки.

Вектор нулевой последовательности $V_0 = e^{ij} e_0$ ($e_0 = (1, 1, 1)^T / \sqrt{3}$ орт прямой последовательности) не принадлежит семейству (53). Для него $V_0^* V_0 = V^2 \mu = e^{j2\varphi}$, $\mu = 1$. При этом $V_0 \parallel V_0^*$, так как $V_0 = \beta V_0^*$, $\beta = e^{j2\varphi}$ и осцилляции энергии будут всегда при любой нагрузке.

Двунаправленность потока энергии

В отличие от однофазной цепи, при $Q \neq 0$, ПЭ с комплексной мощностью $S = P + jQ$ может быть как однонаправленным, так и двунаправленным. Действительно из (40) следует, что обменные процессы будут, если

$$P < m \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Это неравенство дает условие осцилляции

$$Q_0 < |Q|, \quad (56)$$

где величина $Q_0 = P \sqrt{(m^2 - 1)} > 0$ и при заданной активной мощности зависит от степени несимметрии напряжения.

Таким образом, т. к. при $|Q| \geq Q_0$ отсутствуют обменные процессы, то осцилляции не могут быть физическим смыслом реактивной мощности. Физический смысл реактивной мощности (если он существует) должен быть одинаковым вне зависимости от структуры и свойств цепи.

Из (52) следует, что

$$p(t) = S_B [I + m \cos(2\omega t + j_m - j_s)] \quad (57)$$

и наличие моментов, когда $p(t) < 0$, возможно если

$$I < m. \quad (58)$$

Т.к. I характеризует качество потребления, а m – качество поставки, то неравенство (58) можно понимать как: «качество потребления I хуже качества поставки m ». Если ввести коэффициент осцилляции

$$I_{osc} = \frac{|N|}{P} = \frac{m}{I},$$

то для мгновенной мощности имеем

$$p(t) = P[1 + I_{osc} \cos(2\omega t + j_m - j_s)]$$

и ясно, что при выполнении неравенства $I_{osc} > 1$ ПЭ будет двунаправленным.

Группа из пяти эквивалентных условий осцилляции энергии в однофазной цепи:

- коэффициент мощности меньше единицы $I < 1$;
 - реактивная мощность не равна нулю ($Q \neq 0$);
 - фазовый сдвиг между напряжением и током не равен нулю $\Delta j = j_v - j_i = \arctg(Q/P) \neq 0$;
 - поток энергии $W = W(t)$ двунаправленный;
 - амплитуда колебаний ММ больше активной мощности $|M\&| > P$
- для трехфазной цепи распадается на две группы эквивалентных условий.

Группа 1 эквивалентных условий, связанная с качеством симметричной нагрузки (реактивность) и не связанная с колебаниями ММ:

- реактивная мощность отлична от нуля ($Q \neq 0$);
- коэффициент мощности меньше единицы $I < 1$;
- фазовый сдвиг между током и напряжением не равен нулю $\Delta j = j_v - j_i = \arctg(Q/P) \neq 0$;

Группа 2 эквивалентных условий, связанная с осцилляцией энергии между нагрузкой и источником:

- поток энергии $W = W(t)$ двунаправленный;
- амплитуда колебания ММ больше активной мощности $|M\&| > P$;

дополняется новыми двумя условиями

- неравенством $I < m$ между коэффициентами качества потребления и поставки;
- условием (48) превышения модуля реактивной мощности пороговой величины $Q_0 = P\sqrt{(m^2 - 1)} > 0$.

Вторая группа условий обусловлена влиянием, как качества поставки ($m > 0$), так и качества потребления ($I < 1$) на осцилляции энергии между нагрузкой и источником ($I < m$)

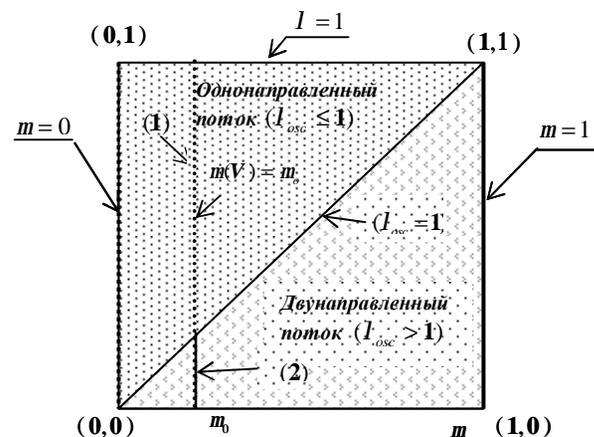


Рис .1 – (m, I) -плоскость состояния потока энергии через трехфазное сечение $\langle a, b, c \rangle$

Безразмерные величины I и m независимы. Пара (m, I) определяет точку на (m, I) -плоскости (m -абсцисса, I - ордината) и характеризует качество потребления и поставки через трехфазное сечение $\langle a, b, c \rangle$ (Рис .1). Каждое напряжение поставки V характеризуется коэффициентом СО напряжения $m(V)$. Для m_0 ($0 \leq m_0 \leq 1$) уравнение $m(V) = m_0$ на (m, I) -плоскости задает вертикальную прямую.

1. При $m(V) = 0$ (ордината (m, I) -плоскости) для любой реактивной мощности $|Q| \geq 0$ колебания ММ невозможны.

2. Если $0 < m(V) < 1$, то в зависимости от коэффициента мощности возможен как однонаправленный поток (только ММ колебания - отрезок (1)) так и двунаправленный поток (осцилляции энергии - отрезок (2)).

3. При $m = 1$ всегда будут осцилляции энергии между нагрузкой и источником (подобно однофазной ас цепи).

Только неравенство $m(V) > 0$ является характеристическим свойством колебаний ММ. При $m > 0$ неравенство $I_{osc} = m/I > 1$ является *характеристическим* свойством осцилляции энергии между нагрузкой и источником в трехфазном сечении.

Заключение

1. При работе трехфазной системы в условиях, для которых она не проектировалась, возникают ПММ. Введенный коэффициент СО напряжения m адекватно отражает вклад несимметрии напряжения (обусловленный искажающим воздействием сети) для симметричной нагрузки в колебательную компоненту ММ.

2. В рассматриваемом режиме реактивная мощность не равна амплитуде колебаний ММ. Обменные процессы возникают если реактивная мощность больше некоторой пороговой величины. Тем самым реактивная мощность при сбалансированном токе обусловлена только фазовым сдвигом между трехфазным током и напряжением.

3. При синусоидальном режиме системы с несимметричным напряжением и сбалансированной нагрузкой неравенство $I < m$, характеризует наличие обменных процессов. когда качество потребления «хуже» качества поставки. Скомпенсировав реактивный ток (сделав коэффициент мощности $I = 1$ при $m > 0$), потребитель уменьшит дополнительные потери поставщика до возможного для него минимума ($i_r \neq 0$), но, тем не менее, не обеспечит поставку энергии с постоянной скоростью. Таким образом, сделав нагрузку сбалансированной (не обязательно чисто активной $I < 1$), потребитель, имеющий чувствительное к колебаниям ММ оборудование, может вполне обосновано предъявить экономические претензии к качеству поставки в рамках несимметрии напряжения

4. Математический аппарат использует понятие скалярного произведения в пространстве 3D- комплексов и пространстве синусоидальных процессов. Все выкладки проведены в векторной форме. При сбалансированной нагрузке характеристическое свойство ПММ ($m > 0$) и осцилляции энергии $I_{osc} = m/I > 1$ остаются справедливыми для любой N -фазной системы. В однофазной цепи два вектора V и V^* никогда не могут быть ортогональны, так как $(V, V^*) = |V|^2 \neq 0$, что дает $m = 1$, и поэтому осцилляции являются неотъемлемым свойством однофазных ас цепей.

5. При разбалансе третьего типа уравнение мощности содержит мощность небаланса. Связь квадратурных компонент уравнения мощности (активной, реактивной и мощности небаланса) как с колебательной компонентой ММ, так и с осцилляцией ПЭ, усложняется и требует введения таких энергетических понятий, как ток небаланса и вектор мощности небаланса [12-15].

Список литературы: 1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин. - М. : Госэнергоиздат, 1955. 2. Шидловский А. К. Анализ режимов в трехфазных электрических цепях с несимметричными элементами / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко – К. : ИЭД, 1983 3. Милых А.Н. Схемы симметрирования однофазных на-

грузок в трехфазных цепях / А.Н. Милых, А. К. Шидловский, А.Г. Кузнецов. – К. : Наукова думка, 1973 4. Willems J. L. Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal polyphase situations / J. L. Willems // IEEE Trans. Power Del. – Vol. 19. – No. 2. – P. 835–840. 5. Wang Y. J. Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor / Y. J. Wang // IEEE Trans. Energy Conv. – Vol.16. – No. 3. – P. 270- 275. 6. Willems J. L. The computation of the alternating torque of an ac machine / J. L. Willems // Int. J. Electr. Eng. Educ. – Vol. 19. – P. 79-85. 7. Czarnecki L. S. Power related phenomena in three phase unbalanced systems / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Power Delivery. – Vol. 10. – P. 1168–1176. 8. Czarnecki L.S. Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality / L. S. Czarnecki // Archiv fur Elektrotechnik. – No. 4. – P. 10-15. 9. Czarnecki L. S. Misinterpretations of some power properties of electric circuits / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Power Del. – Vol. 9. – No. 34. – P. 1760-1764. 10. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / Czarnecki L. S. // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2004– Vol.10. – No. 3. – P. 828-836. 11. Czarnecki L.S. Could power properties of three-phase systems be described in terms of the Poynting Vector // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2006– Vol. 21. – No. 1. – P. 339-344. 12. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю. А. Сиротин // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. VI МНТК. ЕРQ-2008: сб. трудов. Мариуполь : Изд. ПГУТ, 2008. – С. 211–214. 13. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие трёхфазного тока интерфейса "поставщик–потребитель" / Ю. А. Сиротин // Электрика. – 2008. –С. 16-22. 14. Сиротин Ю. А. Качество энергоснабжения и энергопотребления в разбалансированной трехфазной системе / Ю. А. Сиротин // Электрика. – 2009. – №6. – С. 22-27 15. Сиротин Ю. А. Мощность разбаланса и пульсации мгновенной мощности при симметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Электрика. – 2009. – №11. – С. 15-21. 16. Emanuel E. On the definition of power factor and apparent power in unbalanced polyphase circuits with sinusoidal voltage and currents / E. Emanuel // IEEE Trans. Power Del. – 1993. – Vol. 8. – No. 3. – P. 841–852. 17. Francisco de León. Discussion of "Could Power Properties of Three-Phase Systems Be Described in Terms of the Poynting Vector? / Francisco de León, José Cohen // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – No. 2. 18. Ferrero A. An approach to the nonactive power concept in terms of the Poynting-Park Vector / A. Ferrero, S. Leva, A.P. Morando // European Trans. on Electric Power, ETEP. – 2001. – Vol. 11. – No. 5. – P 301-308. 19. Cekareski Z. On the physical meaning of nonactive powers in three-phase systems / Z. Cekareski, A.E. Emanuel // Power Engineering Review, IEEE/ – 1999. – Vol.19. – No.7. – P. 46-47. 20 Emanuel A.E. Poynting Vector and physical meaning of nonactive powers / A.E. Emanuel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 2005. – Vol. 54. – No. 4. – P.1457-1462. 21. Emanuel A.E. About the Rejection On Poynting Vector in Power Systems Analysis / A.E. Emanuel // Electrical Power Quality and Utilization Journal. – 2007. – Vol. XIII. – No. 1. – P. 43–49 22. Emanuel A.E. Intrinsic Power: Some Observation / A.E. Emanuel // Electrical Power Quality and Utilization Journal – 2007. – Vol. XIII. – No. 1. – P. 83–87. 23. Buchholz F. Die Drehstrom-Scheinleistung bei ungleich-mepiger Belastung drei Zweige / F. Buchholz // Licht und Kraft/ – 1922. –No. 2. – P. 9-11.

Поступила в редколлегию 03.10.2010

С.Ю. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А.А. ОКУНЬ, аспирант, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СТЕКЛЯННОГО ИЗОЛЯТОРА ВЛ 110 КВ

Рассматриваются конструктивные особенности стеклянных изоляторов. Приведены результаты расчетов напряженности электрического поля в объеме сухого чистого изолятора путем моделирования поля посредством метода конечных элементов, реализованного в пакетах Maxwell и CST EM Studio.

Розглядаються конструктивні особливості скляних ізоляторів. Приведені результати розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі сухого чистого ізолятора шляхом моделювання поля за допомогою методу кінцевих елементів, реалізованого в пакетах Maxwell та CST EM Studio.

Design features of glass insulators are considered. Results of calculation of electric field intensity in volume of a dry pure insulator by modeling the field using the finite element method implemented in Maxwell and CST EM Studio are given.

До конца 70-х годов XX столетия электротехнический фарфор являлся основным материалом для изготовления изоляторов, что объяснялось его высокой механической и электрической прочностью, малой гигроскопичностью, гладкостью поверхности.

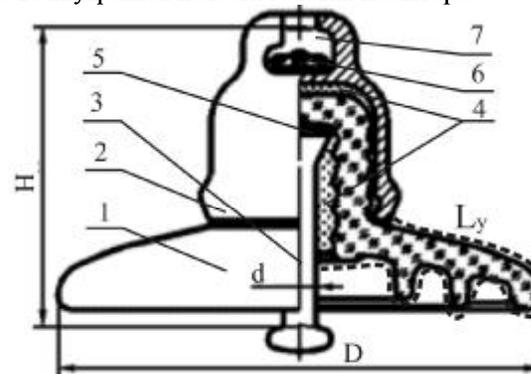
Трудности обнаружения дефектных фарфоровых изоляторов в процессе эксплуатации привели к постепенной их замене изоляторами из закаленного электроизоляционного стекла, которые и продолжают доминировать, несмотря на широкое применение полимерных стержневых изоляторов, имеющих ряд преимуществ по сравнению с вышеописанными (высокие электрические и механические характеристики, меньше масса и габариты).

По механическим и электрическим характеристикам стеклянные изоляторы не уступают, а в некоторых случаях превосходят фарфоровые. Также они более удобны в эксплуатации: пробой фарфоровых изоляторов визуально определить нельзя, а при пробое изоляторов из закаленного стекла происходит видимое разрушение тарелки, причем механические характеристики изоляторов изменяются незначительно. Если происходит перекрытие гирлянды с пробитым фарфоровым изолятором, например, при грозе, то выделяющаяся в узком канале внутри тела изолятора энергия приводит к разрыву изолятора и расцеплению гирлянды, в результате чего происходит авария. Поэтому периодически проводят проверку изоляторов, что требует больших трудозатрат. При перекрытии гирлянды с разрушенной тарелкой разряд развивается снаружи изолятора и, как правило, не приводит к потере его механической прочности. Кроме того, раз-

рушенный изолятор можно выявить во время осмотра с земли. При длительной эксплуатации (20 – 30 лет) электрические свойства стеклянных изоляторов снижаются, что приводит в конечном итоге к разрушениям изолирующего материала в области шапки.

Цель статьи. Данная статья посвящена теоретическому исследованию распределения электрического поля в объеме стеклянного изолятора при изменении приложенного напряжения.

Метод решения. Конструкция стеклянного тарельчатого изолятора представлена на рисунке 1. На изолирующей головке изолятора при помощи цементно-песочной связки крепится шапка из высокопрочного или ковкого чугуна. В верхней части шапки имеется паз, в который вставляется пестик другого изолятора при соединении их в гирлянду. Для предотвращения самопроизвольного расцепления изоляторов имеются специальные пружинные замки, вставляемые в тот же паз. Пестик, имеющий утолщение (с одной стороны – коническое, с другой - в виде эллипсоида вращения), крепится при помощи цементно-песочной связки своей конической частью во внутренней полости головки изолятора.



1 - изолирующее тело изолятора; 2 - шапка изолятора; 3 - пестик; 4 - цементно-песочная связка; 5 - прокладка; 6 - пружинный замок; 7 - паз

Рис. 1 – Подвесной тарельчатый стеклянный изолятор

Внутренняя часть головки изолятора и часть пестика, которая соприкасается со связкой, покрываются тонким, порядка 0,1 мм, слоем компенсирующей промазки. Для уменьшения внутренних механических напряжений между пестиком и телом изолятора устанавливается прокладка из пробки или кирзы.

Цементно-песочная связка защищается от проникновения влаги специальными полупроводящими лаками, которые одновременно снижают напряженность электрического поля около пестика и шапки, где она наи-

большая. Для предотвращения коррозии все металлические части оцинковываются.

При напряжении, меньшем разрядного, около пестика и шапки изолятора возникают коронный или скользящий разряды, которые создают радиопомехи, поэтому одной из характеристик изолятора является напряжение, соответствующее допустимому уровню радиопомех, которое возрастает с 25 до 50 кВ в зависимости от типа изолятора по мере роста механической прочности изолятора. Для повышения напряжения возникновения короны край шапки закругляют, а поверхность цементно-песочной связки покрывают полупроводящим лаком.

В нормальных условиях электростатические процессы на изоляторах настолько слабы, что их количественно определить экспериментальным путем практически не представляется возможным. Поэтому в данной работе определены электрические параметры поля изоляторов в нормальном режиме их работы путем математического моделирования.

Поскольку поля промышленной частоты (50 Гц) являются квазистатическими [1], то возможно описывать их, подобно электростатическим. Таким образом, уравнение, описывающее распределение электрического поля в рассматриваемой области, имеет следующий вид:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla j) = -r_v, \quad (1)$$

где ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ρ_v - объемная плотность заряда.

В качестве примера был взят стеклянный изолятор типа ПС 120Б для сети переменного тока с номинальным напряжением 110 кВ. Исходные геометрические параметры изолятора, принятые в расчетах, приведены в таблице 1. Относительная диэлектрическая проницаемость электроизоляционного стекла равна $\epsilon_r = 5,5$, цементная связки - $\epsilon_r = 6$, воздуха - $\epsilon_r = 1,0006$ [2].

Таблица 1 – Основные размеры изолятора ПС 120Б [3]

Тип изолятора	Максимальный номинальный диаметр изоляционной детали D, мм	Номинальная строительная высота H, мм	Минимальная номинальная длина пути утечки L _y , мм	Стандартное сферическое соединение по ГОСТ 27396 d, мм
ПС 120Б	255	146	280	16

Потенциал верхнего заземленного металлического элемента (шапки) принимаем равным нулю, а потенциал нижней части металлического

элемента (пестика) – наибольшему рабочему напряжению на изоляторе $U_{н.р.из.}$, которое составляет:

$$U_{н.р.из.} = \frac{1,15 \cdot 110}{\sqrt{3}} \cdot 0,18 \approx 13,14 \text{ кВ},$$

где 0,18 – коэффициент, который учитывает неравномерное распределение напряжения по гирлянде изоляторов на ЛЭП 110 кВ (рисунок 2).

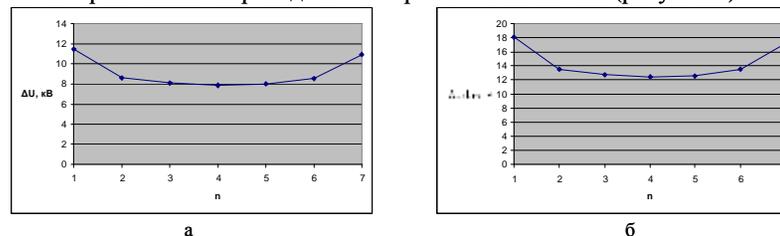


Рис. 2 – Расчетное распределение падений напряжений (а) и их процентное соотношение (б) по гирлянде из 7 изоляторов типа ПС 120Б для ВЛ 110 кВ

В общем случае система уравнений, описывающих квазистатическое поле, решается в трехмерной координатной системе. Существует различные программные средства, реализующие аналогичные задачи на персональных компьютерах - Ansys, FEMLAB, Ansoft Maxwell, CST EM Studio, IES Coulomb и другие [4, 11]. Для решения дифференциального уравнения (1) в работе использовался численный метод конечных элементов, реализованный в пакетах Ansoft Maxwell 3D [5] и CST EM Studio [6]. На рисунке 3 представлены расчетные модели изолятора типа ПС 120Б в разрезе.

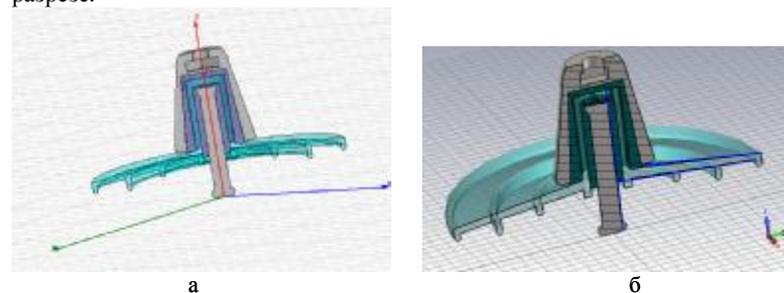


Рис. 3 – Общий вид расчетной модели изолятора ПС 120Б: а – Ansoft Maxwell, б – CST EM Studio

Результаты расчета напряженности электрического поля в объеме сухого чистого изолятора в случае приложенного напряжения $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ приведены на рисунках 4-5. Максимальное значение напряженности поля достигает на поверхности конического утолщения пестика во

внутренней области цементно-песочной связки. Здесь она достигает значений до 4,0 кВ/мм. Однако это не приводит к опасным последствиям, поскольку электрическая прочность стекла при такой его толщине составляет 45 кВ/мм [7].

Опасные значения напряженности поля возникают на поверхностях цементных заделок как пестика, так и шапки. Это наиболее слабые места с точки зрения электрической прочности. Здесь величина поля достигает значений 1,0 - 1,1 кВ/мм. При таких значениях напряженности возможны частичные поверхностные (скользящие) разряды [8]. Это обусловлено тем, что в данных местах поле неоднородно и при относительно небольшом напряжении (13,14 кВ) возникает коронный разряд, который и приводит к возникновению каналов стримеров на внутренней и внешней поверхности стекла.

Появления частичных разрядов инициирует возникновение целого спектра колебаний на достаточно высоких частотах. Это может приводить к возникновению высокочастотных перенапряжений.

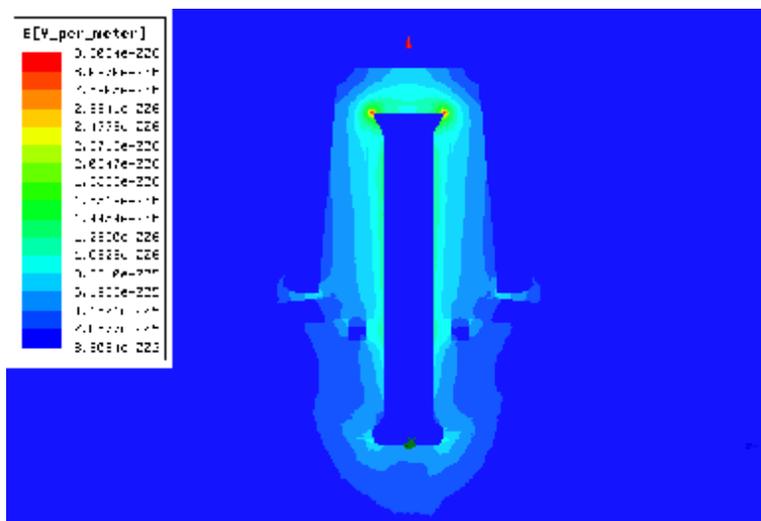


Рис. 4 – Распределение напряженности электрического поля $|E|$ изолятора ПС 120Б при $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ (Ansoft Maxwell)

Далее были проведены расчеты напряженности электрического поля при изменении приложенного напряжения в диапазоне значений $U_{н.р.из.} - 1,5U_{н.р.из.}$, что соответствует возможности появления режимных перенапряжений на промышленной частоте. Эти перенапряжения характеризуются

невысокой кратностью ($1,5 \div 2$) и относительно большой длительностью – от долей секунд до десятков минут [8].

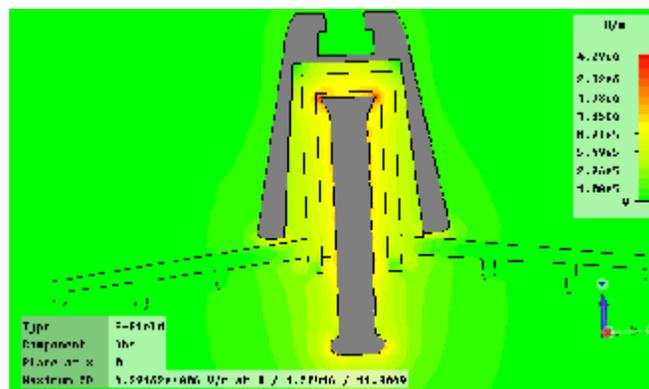


Рис. 5 – Распределение напряженности электрического поля $|E|$ изолятора ПС 120Б при $U_{н.р.из.} = 13,14$ кВ (CST EM Studio)

Результаты расчетов представлены на рисунках 6-8. Видно, что увеличение приложенного напряжения в большей степени влияет на максимальные значения в рассматриваемых областях и соответственно благоприятствует возникновению скользящих разрядов, которые в конечном итоге могут привести к полному перекрытию изолятора при совпадении разрядов, исходящих с поверхностей заделки шапки и стержня.

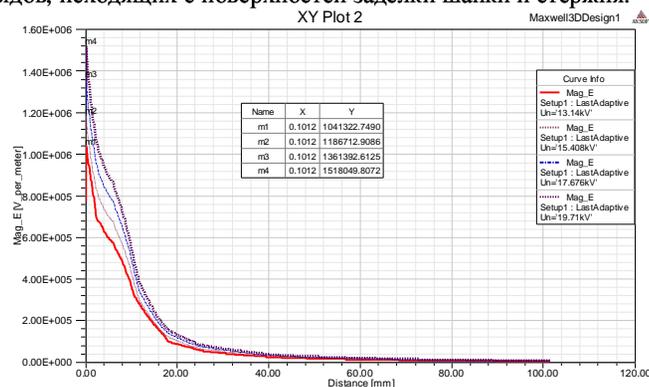


Рис. 6 – Распределение напряженности электрического поля $|E|$ и максимальные значения на поверхности изолирующего тела в направлении от цементной заделки шапки к краю изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения.

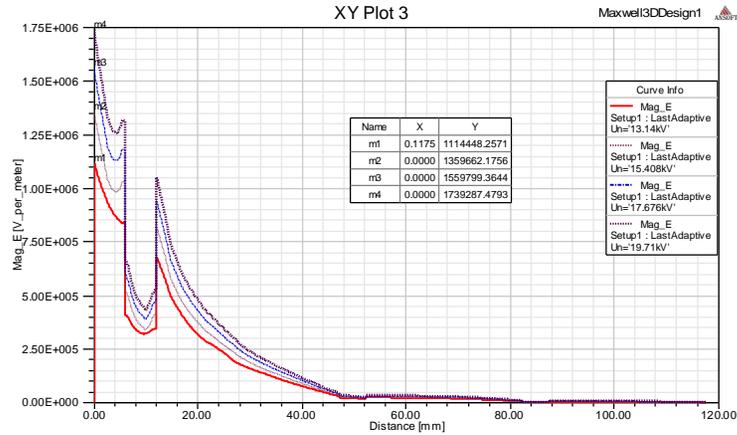


Рис. 7 – Распределение напряженности электрического поля $|E|$ и максимальные значения под поверхностью изолирующего тела в направлении от цементной заделки к краю изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения

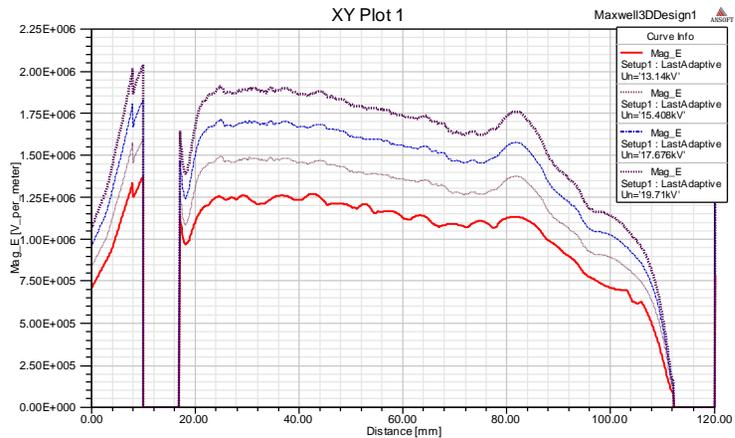


Рис. 8 – Распределение напряженности электрического поля $|E|$ по длине пестика в направлении от конического утолщения к краю в форме эллипсоида вращения для изолятора ПС 120Б при изменении значений приложенного напряжения. Нулевые значения напряженностей поля соответствуют переходам через утолщения пестика

Приведенные выше рассуждения относятся к изолятору, который рассматривался отдельно, т.е. без влияния соседних изоляторов, провода, траверсы опоры, которые несомненно повлияли бы на результата расчета. Поэтому необходимы исследования поля не только отдельного изолятора, но и гирлянды в целом с учетом влияния провода и траверсы опоры.

Выводы:

1. Изоляторы из электроизоляционного стекла являются наиболее применимыми для ВЛ напряжением свыше 35 кВ.
2. Результаты проведенных расчетных исследований свидетельствуют о том, что максимальное значение напряженности поля достигает на поверхности конического утолщения пестика (до 4 кВ/мм) во внутренней области цементно-песочной связки. Однако это не приводит к опасным последствиям, поскольку электрическая прочность стекла при толщине 1,5 мм составляет 45 кВ/мм.
3. Опасные величины напряженности поля возникают на поверхностях цементных заделок как пестика, так и шапки в местах соприкосновения с воздухом. Такие значения полей могут приводить к появлению поверхностных разрядов на его внутренней и внешней поверхностях, которые в конечном итоге могут инициировать перекрытие всего изолятора.
4. При увеличении приложенного напряжения значительно увеличиваются значения напряженностей в “слабых” местах изолятора, что приводит к усилению разрядных процессов.

Список литературы: 1. Колецицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Колецицкий Е.С. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 168 с. 2. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 2 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 464 с. 3. ГОСТ 27661-88 Изоляторы линейные подвесные. Типы, параметры и размеры. - Введ. 01.01.89. 4. Su C. Overview of Electromagnetic Modeling Software / C. Su, H.Ke, T. Hubing // 25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 8-12 March 2009 – P. 736-741. 5. Режим доступа : <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/> 6. Режим доступа : <http://www.cst.com/Content/Products/EMS/SolverElectrostatics.aspx> 7. Кучинский Г.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. Г.С. Кучинского. - М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с. 8. Техника высоких напряжений / под общей ред. Д.В. Разевица. - изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. – 488с. 9. Александров Г.Н. Установки сверхвысоких напряжений и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. – Л : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989. – 360 с. 10. Ким Е. Д. Электростатические характеристики линейных изоляторов для контактных сетей железных дорог / Е. Д. Ким, В. Г. Сыченко, В. Л. Калмыков // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - №27. – С. 72-76.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

Ю.Н. ШУМИЛОВ, докт. техн. наук, проф., ГП «НИИВН», Славянск;
М.Ю. ШУМИЛОВ, ГП «НИИВН», Славянск

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В работе приведены результаты исследования электрофизических процессов в стеклопластиковых стержнях, которые предшествовали их «хрупкому разрушению» при комплексном действии эксплуатационных факторов (сильных электрических полей, влаги, механических нагрузок). Поданы рекомендации относительно повышения стойкости высоковольтных полимерных изоляторов к данному виду разрушения в эксплуатации.

У роботі приведені результати дослідження електрофізичних процесів в склопластикових стрижнях, які передували їх «крихкому руйнуванню» при комплексній дії експлуатаційних чинників (сильних електричних полів, вологи, механічних навантажень). Подано рекомендації щодо підвищення стійкості високовольтних полімерних ізоляторів до даного виду руйнування в експлуатації.

The research shows results of study of electric and physical processes in fiberglass rods. The processes precede the rods' "brittle fracture" at combined influence of operational factors (intensive electric fields, moisture, mechanical strengths). Recommendations as for increasing of high-voltage polymer insulators' resistance to such kind of fracture during operation were made.

В настоящее время во всех промышленно развитых странах наметилась устойчивая тенденция к применению полимерных изоляторов на воздушных линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Более чем 25-летний опыт эксплуатации подтвердил высокую надежность полимерных изоляторов, однако в процессе эксплуатации были обнаружены и их немногочисленные недостатки [1 – 5].

Наиболее подробно типы и причины отказов, хотя и немногочисленных, приведены в отчетах американского института Electric Power Research Institute (EPRI), в которых проанализирована работоспособность около четырех миллионов полимерных изоляторов, установленных на воздушных линиях 110 – 750 кВ [6]. Виды отказов были сгруппированы и представлены в виде гистограммы (рис. 1).

Из гистограммы следует, что по данным зарубежной эксплуатации наибольшее число отказов это «хрупкое разрушение» стеклопластикового стержня полимерного изолятора. Несмотря на сравнительно небольшое количество отказов (74 из 4-х миллионов, установленных на воздушных линиях) по причине «хрупкого разрушения» каждый отказ полимерного изолятора сопряжен с необходимостью его замены. На отыскание места повреждения линии и проведение восстановительных работ может потребоваться большое количество времени.



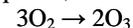
Рис. 1 – Виды разрушения полимерных изоляторов

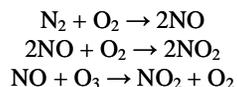
Явление «хрупкого разрушения» впервые было обнаружено в 1970 г. на полимерных изоляторах первого поколения, установленных в магистральных линиях Италии и Южной Африки [7]. Внешний вид разрушения, рис. 2, существенно отличается от обычного разрушения стеклопластика при растяжении – в виде «метелки». Как видно, значительная часть сечения разрушенного стеклопластикового стержня имеет идеально гладкую поверхность.



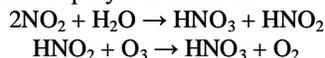
Рис. 2 – Внешний вид «хрупкого разрушения» полимерного изолятора

Подобные разрушения наблюдались также в 1980 г. и 1990 г. в США. В России такой тип разрушения был обнаружен на линии напряжением 330 кВ Магистральных электрических сетей Северо-Запада [8]. В сетях Украины явных признаков «хрупкого разрушения» изоляторов не было обнаружено. Как правило, «хрупкое разрушение» в подвесных изоляторах наблюдается около высоковольтного провода или внутри оконцевателя, поддерживающего высоковольтный провод. Несмотря на малую вероятность разрушений, возможность их появления вызывает беспокойство как у потребителей, так и у разработчиков изоляторов, поскольку «хрупкое разрушение» сопровождается падением провода. Механизм «хрупкого разрушения» полимерных изоляторов достаточно подробно описан в литературе [3, 9]. Суть состоит в проникновении через дефекты в защитной оболочке изолятора водных растворов азотной кислоты к стеклопластиковому стержню, подверженному растягивающей нагрузке от тяжения провода. Азотная кислота образуется как побочный продукт коронирования воздуха в присутствии влаги в зоне высоковольтных элементов подвески: проводов, экранов, оконцевателей:





В присутствии влаги образуется кислота:



Когда кислый водный раствор вступает в контакт со стекловолокном происходит обмен между ионами металлов на поверхности стекла с ионами водорода, образуемых при диссоциации кислоты. В основном, это ионы кальция, алюминия, бора и натрия. Процесс ионного обмена истощает слой стекловолокна и приводит к уменьшению его молярного объема. Поверхностный слой стекловолокна после выщелачивания состоит преимущественно из двуокиси кремния.

Уменьшение молярного объема в поверхностном слое сопровождается появлением в нем окружных растягивающих напряжений, которые в значительной степени снижают прочность стекловолокна. Совместное воздействие окружных и продольных растягивающих усилий от тяжения провода приводят к разрушению стекловолокон.

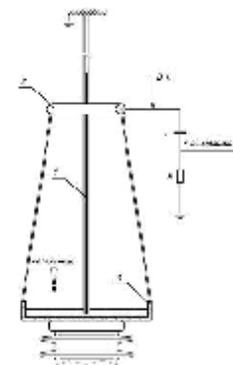
В связи с этим при разработке конструкции изоляторов нового поколения напряжением 110 кВ и выше необходимо ставить задачу – определить пути устранения или сведения до минимума «хрупких разрушений» в эксплуатации. При этом необходимо сохранить высокие требования по электрической прочности (не менее 40 кВ/см) и кратковременной механической (не менее 800 МПа) прочности.

Нужно отметить, что в исследованиях «хрупкого разрушения» полимерных изоляторов, приводимых в многочисленной литературе [103 – 113] по механизму разрушения, нигде не рассматривается вопрос о движении влаги в капиллярах и полостях под оболочкой в сильном электрическом поле и не рассматриваются электрофизические процессы, предшествующие разрушению. При описании механизма разрушения также отсутствует объяснение, почему «хрупкое разрушение» в подавляющем большинстве случаев происходит выше уровня установки электростатических экранов. Так же не установлены причины возрастания вероятности «хрупкого разрушения» изоляторов с увеличением класса напряжения воздушных линий, кроме тривиального объяснения, что в этом случае выше напряженность электрического поля, хотя с увеличением класса напряжения увеличивается степень экранирования изолятора.

Устранение данного «пробела» поможет лучше понять механизм «хрупкого разрушения» и более направлено провести поиск путей улучшения качества полимерных изоляторов. Для этой цели были поставлены специальные эксперименты.

Для исследования движения влаги в пористом диэлектрике в сильном электрическом поле использовались искусственные стеклянные капилляры с диаметром внутреннего канала 0,2 мм (рис.3).

Напряжение подавалось на тороидальный экран 2 и ванночку 3, установленную на опорном изоляторе. Верхняя часть капилляра заземлялась. Для исключения пробоя и разрушения стенок капилляра при разрядах ток через образец ограничивался до уровня 0,1 мА. По мере увлажнения фильтровальной бумаги на дне ванночки и подъема влаги в капилляре до точки, расположенной выше уровня тороидального экрана, в капилляре возникали частичные разряды, которые быстро прекращались из-за испарения влаги и повышения давления в полости капилляра. По мере образования нового столба жидкости процесс повторялся.



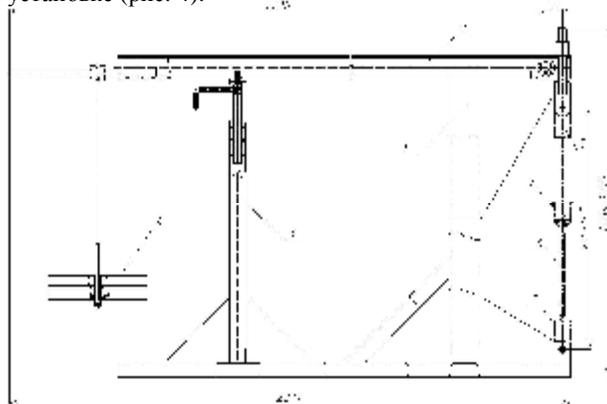
1 – стеклянный капилляр, Ø 0,2 мм; 2 – электростатический экран; 3 – металлическая «заземленная» емкость

Рис. 3 – Схема проведения эксперимента по исследованию движения влаги в стеклянном капилляре под действием сильного электрического поля

Высота подъема жидкости в сильном электрическом поле, как показали опыты, ограничивается зоной возникновения частичных разрядов, испарением влаги и ростом давления газа в капилляре. Эта зона располагается выше установки электростатического экрана. Когда столб жидкости в капилляре стеклопластикового стержня поднимается выше тороидального экрана на конце столба создается область повышенной напряженности электрического поля, причем напряженность электрического поля резко увеличивается по мере продвижения столба вверх и напряженность поля на конце столба достигает напряженности возникновения частичных разрядов. Именно в зоне горения частичных разрядов происходит накопление побочных продуктов электрического разряда, где и начинается «хрупкое разрушение».

Из описанных выше экспериментов становится ясно, что установка электростатических экранов при наличии дефектов в защитной оболочке и увлажнении изолятора не гарантирует его нормальную работу. Принимая во внимание, что при серийном производстве трудно избежать стопроцентного отсутствия дефектов и некачественной герметизации, устранение «хрупкого разрушения» изоляторов необходимо искать, очевидно, в повышении коррозионной стойкости материалов и, в первую очередь, стекловолокна.

Стеклопластики на основе алюмо-боро-силикатных стекловолокон (стекловолокно типа E) обладают недостаточной устойчивостью к «хрупкому разрушению». Бор, вводимый в шихту в качестве плавня, в малощелочном алюмо-боро-силикатном стекловолокне находится в тройной координации. Из химии стекла известно, что стекло, где бор находится в тройной координации, химически нестойко. По этой причине проведен поиск состава стекловолокна исключающего присутствие в структуре B_2O_3 при сохранении необходимых электроизоляционных свойств. В качестве объекта дальнейших исследований выбрано безборное ECR стекловолокно. Сравнительные испытания стеклопластиков типа E и ECR на устойчивость к хрупкому разрушению проводились на рычажной установке (рис. 4).



- 1 – несущая опора;
- 2 – рычаг;
- 3 – поддерживающая опора;
- 4 – груз;
- 5 – захват;
- 6 – образец стеклопластика;
- 7 – силиконовый стаканчик с электролитом.

Рис. 4 – Основные размеры рычажного устройства для определения устойчивости стеклопластиковых стержней к «хрупкому разрушению»

Устойчивость к «хрупкому разрушению» определялась при растягивающей нагрузке 6,7 т и 1-молярном растворе HNO_3 . Приведенные в табл. 1 результаты показали, что устойчивость стержней со стекловолоконного типа ECR несоизмеримо выше, по сравнению со стержнями на волокне типа E, что объясняется высокой химической стойкостью безборного стекловолокна.

Таблица 1 – Полученные характеристики отобранных стеклопластиков электротехнического назначения

Производитель стеклопластика	Golden Phoenix (Китай)	Golden Phoenix (Китай)	Bastion Glassfibre (Англия)	Golden Phoenix (Китай)	Bastion Glassfibre (Англия)	Тверь-стеклопластик (Россия)	Экипаж (Украина)
Тип стекловолокна	ECR	ECR	ECR	E	E	E	E
Диаметр, мм	15	16	16	15	16	15	15
Устойчивость к «хрупкому разрушению», час	> 96	> 96	> 96	2	2,1	1,9	1,9
Электрическая прочность в исх. состоянии, кВ/мм	4,04	4,4	> 6,4	5,4	> 6	4,7	4,5

Дополнительно были проведены сравнительные испытания стеклопластиковых стержней производства «Тверьстеклопластик», изготовленных на базе алюмоборосиликатного стекла (тип E) и стеклопластика производства «Bastion Glassfibre» на базе безборного стекловолокна (тип ECR) на определение механической прочности при растяжении после длительного одновременного воздействия однонормального раствора HNO_3 и статического растягивающего усилия. Образцы стеклопластиковых стержней, проточенные до $\varnothing 8$ мм, поочередно устанавливались в рычажное устройство (рис. 4). К каждому образцу прикладывалось статическое растягивающее усилие 11,7 кН с одновременным воздействием на образец раствора азотной кислоты (в емкость (рис. 4) наливался однонормальный раствор HNO_3) в течение времени 15 мин – для первого образца, 30 мин – для второго и т.д. По истечении заданного времени выдержки образец извлекался из растягивающего устройства, далее определялась его механическая прочность при растяжении до разрушения.

Результаты проведенного испытания (рис. 5) показывают, что механическая прочность стеклопластика, изготовленного на базе безборного

стекловолокна типа ECR под действием продуктов горения частичных или коронных разрядов (водный раствор HNO₃) и статического растягивающего усилия длительное время остается неизменной.

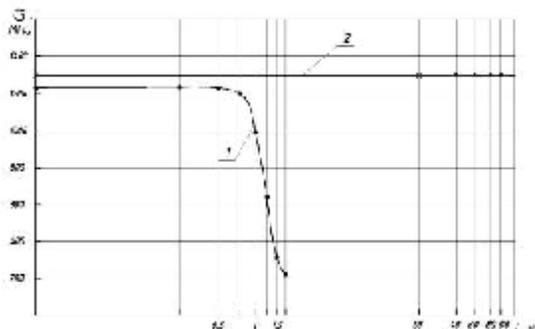


Рис. 5 – Зависимость механической прочности σ стеклопластиков от времени выдержки t под действием однонормального раствора HNO₃ и статической растягивающей нагрузки: 1 – стеклопластик производства «Тверьстеклопластик» на базе алюмоборосиликатного стекловолокна типа E; 2 – стеклопластик производства «Bastion Glassfibre» на базе безборного стекловолокна типа ECR.

Механическая прочность стеклопластика изготовленного на базе стекловолокна типа E под действием однонормального раствора HNO₃ и статического растягивающего усилия существенно снижается менее чем через час вследствие коррозионного «хрупкого разрушения» стекловолокон.

Выводы.

1. Исследование движения жидкости в капиллярах в сильном электрическом поле позволило установить:

- высота подъема водного электролита в капилляре в сильном электрическом поле ограничивается зоной возникновения частичных разрядов, возникающих на концах столба жидкости;
- в результате испарения влаги и роста давления газа частичные разряды в капилляре затухают, однако, по мере подъема новой порции влаги они вновь возникают;
- зона возникновения частичных разрядов расположена на несколько сантиметров выше тороидального экрана, где и происходит наблюдаемое в эксплуатации «хрупкое разрушение» изоляторов, в результате воздействия на стекловолокно продуктов газового разряда.

2. На основании приведенных в данном разделе исследований можно заключить, что при наличии дефектов в защитной оболочке и увлажнении изолятора установка электростатических экранов на защищаемый изолятор не эффективна, по причине выноса потенциала жидкостью, поднимающейся в капиллярах выше уровня установки

электростатического экрана и образования в зоне выноса частичных разрядов, приводящих к «хрупкому разрушению» стеклопластикового стержня.

3. Применение стеклопластиков, выпускаемых известными фирмами Bastion Glassfibre Rod (Англия) и Golden Phoenix (Китай) на основе безборных стекловолокон обеспечивает существенное повышение устойчивости изолятора к «хрупкому разрушению» при сохранении остальных необходимых для нормальной работы изолятора свойств; стеклопластики Bastion Glassfibre Rod (Англия) и Golden Phoenix (Китай) на основе безборных стекловолокон рекомендованы для производства изоляторов на напряжение 330 – 750 кВ.

Список литературы: 1. Владимирский Л. Л. Основные направления работ ОАО НИИПТ в области исследования, внедрения и эксплуатации полимерных изоляторов. / Л.Л. Владимирский // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытания, опыт эксплуатации, диагностика : международная научно-техническая конф., 4 – 9 окт. 2004 г. : тезисы докладов. – С.Петербург : ПЭИПК, 2004. – С. 15 – 33. 2. Шумилов Ю. Н. Точка зрения производителя современных композиционных изоляторов, основанная на многолетних эксплуатационных и лабораторных испытаниях / Ю. Н. Шумилов // Всемирная конференция по изоляторам, ограничителям перенапряжений и бушингам, Малага. Испания. 2000 г. : тезисы докл. – С. 105 – 108. 3. Kumosa M. Research Program on Brittle Fracture Concludes at University of Denver / М. Kumosa // Insulator News and Market Report Quarterly Review. – 2005. – № 3 (13). – Р. 78 – 83. 4. Розов В. А. Некоторые проблемы эксплуатации высоковольтных изоляторов / В. А. Розов, О. Ю. Корхов, Е. А. Каминская // Электрические системы и сети. – 2005. – № 6. – С. 49 – 53. 5. Гайворонский А. С. Опыт эксплуатации и перспективы применения полимерной изоляции в электрических сетях 110 – 500 кВ / А. С. Гайворонский, В. А. Чунчин // Об организации безаварийной работы электрических сетей в период высоких температур; грозовой активности и пожароопасности: совещание ОАО «ФСК ЕЭС», 24 – 27 июня 2003 г. : тезисы докл. - Волгоград : 2003. 6. Phillips A. Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America and Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database / A. Phillips // World Conference and Exhibition on Insulators, Arresters and Bushings. – Marbella, Spain, Nov. 16 – 19, 2003. – Р. 147 – 157. 7. Kumosa M. Research Program on Brittle Fracture Concludes at University of Denver / М. Kumosa // Insulator News and Market Report Quarterly Review. – 2005. – № 3 (13). – Р. 78 – 83. 8. Злаказов А.Б. Опыт эксплуатации полимерных изоляторов разработки НИИВН / А.Б.Злаказов, Е.Д. Ким, Ю.П. Афанасьев и др // Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытания, опыт эксплуатации, диагностика : международная науч.-техн. конф., 4 – 9 октября 2004 г. – С. Петербург : ПЭИПК, 2004. – С. 93 – 102. 9. Terry S. Corrosion Resistant Properties of Polymer Insulator Core Rods / Terry S. McQuarrie // Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology, June 12, 1996.

Поступило в редколлегию 03.10.2010

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

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПЛАСТМАСО- ВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконано аналіз результатів розрахунків пропускної спроможності силових кабелів на напругу 220 кВ.

Выполнен анализ результатов расчетов пропускной способности силовых кабелей на напряжение 220 кВ.

The analysis of datas of calculation of the current rating of cables at direct voltages up to 220 kV.

Постановка проблеми. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах. В практиці користуються, як правило готовими таблицями, які є досить уніфіковані для цілих груп кабелів. Оскільки номенклатура кабелів є дуже широкою і постійно змінюється, проблема визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією є вкрай актуальною. Особливо з огляду на їх відносно високу собівартість, притаманну інноваційному виробництву.

Аналіз літератури. Процеси тепломасообміну в кабелях при їх експлуатації і виготовленні розглядають за допомогою формул (моделей), однакових за своєю структурою і таких, що включають як базові, різницю потенціалів (електричних, теплових, концентрації речовини, тиску), потік, опір, провідність [1]. Відповідно, всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин і математичний опис того чи іншого процесу в системах диференційних рівнянь є досить універсальним і уніфікованим [2].

Пропускна спроможність силових кабелів визначається саме процесами тепло і масообміну в кабелі в номінальних умовах, але практично застосовні розрахункові моделі включають дуже велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі [3]. Рекомендація щодо доцільності прямого експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287 [4].

Ця серія разом з необхідними нормативними посиланнями в кожному з стандартів, поточними змінами до них включає кілька десятків нормативних документів, в кожному з яких зазначені широкі діапазони зна-

чень параметрів розрахункових моделей для традиційних конструкцій кабелів та умов їх застосування. Тому практичне визначення пропускної спроможності для інноваційної продукції безпосередньо за цією нормативною базою неможливе.

Ціль роботи. Розробка методу 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.

Одержані результати. На рисунку 1 наведені результати розрахунку за допомогою традиційних моделей деяких з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із поліетиленовою зшитою ізоляцією на напругу 220 кВ. Для розрахунків використано найпростіші моделі радіального електричного і теплового полів в однорідній ізоляції одиночного кабелю з багатопроволочною мідною жилою несегментальної конструкції з коефіцієнтом заповнення 0,95. Максимальна допустима температура ізоляції 90 °С. Основні джерела тепла – жила та ізоляція з відповідними лінійними залежностями від температури електричного опору провідника та фактору втрат в ізоляції. Теплопровідність захисних покриттів та навколишнього середовища незмінні.

Видно, що суттєве зменшення максимальної напруженості електричного поля (а отже – підвищення надійності ізоляції в експлуатації) шляхом збільшення товщини ізоляції неодмінно супроводжується зменшенням на кілька відсотків гранично допустимого струму та збільшенням майже в два рази вартості матеріалу ізоляції. А використання більших перерізів жили крім підвищення пропускної спроможності кабелю зумовлює зростання вартості матеріалу жили, що використовується неефективно через явище скін-ефекту і відповідне збільшення електричного опору.

Таким чином, навіть в разі застосування гранично спрощених моделей визначення пропускної спроможності нових для вітчизняної кабельної техніки силових високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією, необхідне одночасне застосування моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.

На рисунку 2 наведено приклад такого одночасного застосування електричної і теплової моделей і вигляді системи двох нелінійних рівнянь, що вирішуються разом (пакет MathCad).

Результати рішення моделі, представленої на рис.2 для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю перерізом 625 мм² на напругу 220 кВ свідчать, що зменшення напруженості, наприклад, з 10 кВ/мм до 8 кВ/мм вимагає збільшення товщини ізоляції майже в півтори рази (рис.3 б) і при цьому на декілька відсотків зменшується пропускна спроможність кабелю (рис.3 а). Причому пропускна спроможність зменшується нелінійно: крутіше в діапазоні віднос-

но менших значень напруженості (в області підвищеної надійності ізоляції) (рис.3 а).

З усіх застосованих спрощень тільки несементальна конструкція жили зменшує пропускну спроможність кабелю, але суттєво ускладнює його технологію виготовлення, що потребує окремого розгляду. Інші спрощення дають можливість аналізувати по суті «найкращий сценарій» щодо тенденцій змінювання споживчих властивостей кабелю.

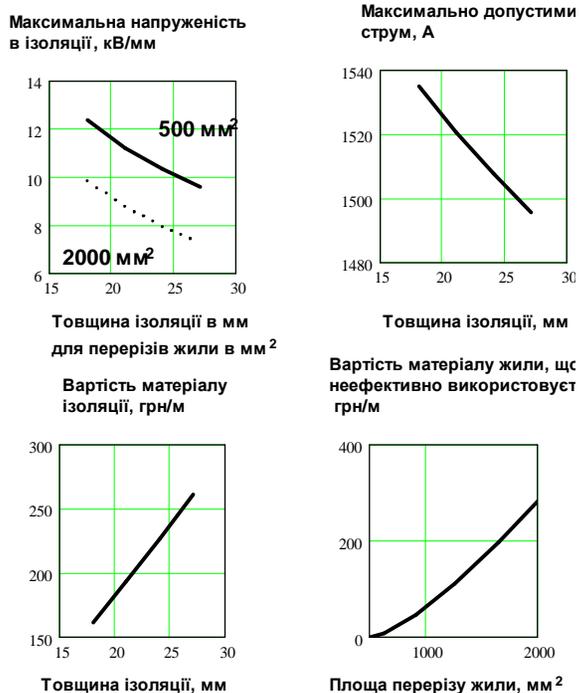


Рис. 1 – Деякі з основних тенденцій змінювання споживчих властивостей силового кабелю із поліетиленовою шитою ізоляцією на напругу 220 кВ

Конструктивні

$$F := 625 \quad \Delta z_p := 5 \quad \eta := 0.95 \quad r := \left(\frac{F}{\pi \cdot \eta} \right)^{0.5} \quad \Delta iz := 20$$

$$\gamma_{cu} := 8.89 \quad \Delta e := 1 \quad \gamma_{iz} := 1 \quad r_e := r + 2 \cdot \Delta e$$

Теплові

$$\Theta_1 := 90 \quad \Theta_2 := 25 \quad \Delta \Theta := \Theta_1 - \Theta_2$$

$$\sigma_{iz} := 3.7 \quad \alpha_p := 4 \quad \alpha := 8$$

Електричні

$$\rho_{20} := 0.017210^{-6} \quad \rho_{\Theta} := \rho_{20} \left[1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (\Theta_1 - 20) \right] \quad I := 600$$

$$f := 50 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad a := \left(2 \cdot \frac{\rho_{\Theta}}{\mu_0 \cdot \omega} \right)^{0.5} \cdot 10^3 \quad R := \frac{\rho_{\Theta}}{F \cdot 10^{-6}}$$

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \epsilon := 2.3 \quad \epsilon_{max} := 10 \quad F_{ef} := a \cdot \pi \cdot (2 \cdot r - a) \quad R_{per} := \frac{\rho_{\Theta}}{F_{ef} \cdot 10^{-6}}$$

$$\epsilon_0 := 8.8510^{-12} \quad U := 220000 \quad C := (2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0) \cdot \left[\ln \left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)} \right] \right]^{-1} \quad \tan \delta := 0.001$$

Економічні

$$C_{cu} := 50000 \quad m_{cu} := \gamma_{cu} \cdot (F \cdot 10^{-6}) \quad g_{cu} := C_{cu} \cdot m_{cu} \quad C_{sr} := 50000$$

$$C_{iz} := 50000 \quad \gamma_{sr} := 4 \quad F_{iz} := \Delta iz \cdot \pi \cdot \left[2 \cdot r + \frac{(\Delta iz + 2 \cdot \Delta e)}{2} \right]$$

$$m_{iz} := \gamma_{iz} \cdot (F_{iz} \cdot 10^{-6}) \quad g_{iz} := C_{iz} \cdot m_{iz} \quad Z_{atr} := 5000$$

Система з електричної (1), теплової (2) і економічної (3) моделей:

Given

$$E_{max} = \frac{U \cdot 10^{-3}}{r \cdot \ln \left[\frac{(r + \Delta e + \Delta iz)}{(r + \Delta e)} \right]} \cdot 3^{0.5}$$

$$I = \left[\frac{\Delta \Theta - \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C}{3 \cdot \tan^{-1} \left[\frac{\sigma_{iz}}{\pi \cdot 4} \cdot \ln \left(\frac{r_e + \Delta iz}{r} \right) \right] + \frac{0.510^3}{\pi \cdot \alpha \cdot (r_e + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\alpha_p}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_e + \Delta iz + \Delta zp}{r_e + \Delta iz} \right)}}{R_{per} \left[\frac{\sigma_{iz}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_e + \Delta iz}{r} \right) \right] + \frac{0.510^3}{\pi \cdot \alpha \cdot (r_e + \Delta iz + \Delta zp)} + \frac{\alpha_p}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_e + \Delta iz + \Delta zp}{r_e + \Delta iz} \right)} \right]^{0.5}$$

$$Z_{atr} = C_{sr} \cdot \gamma_{sr} \cdot \pi \cdot (r_e + \Delta iz + \Delta zp)^2 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Рішення системи відносно вибраних невідомих: допустимого струму товщини ізоляції затрат на матеріали} \quad \text{Find}(I, \Delta iz, Z_{atr}) = \begin{pmatrix} 1.267 \times 10^3 \\ 21.744 \\ 1.173 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис.2 - Проста модель для розрахунку пропускну спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією

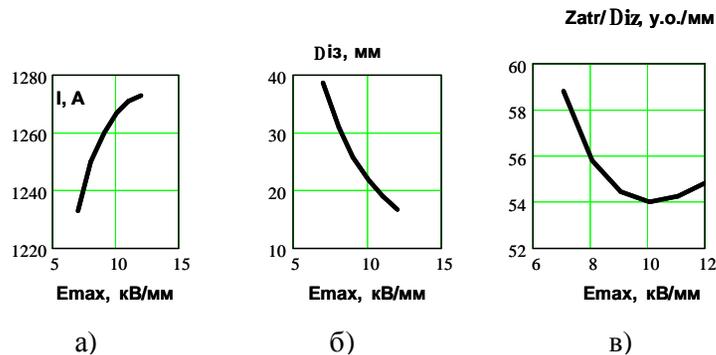
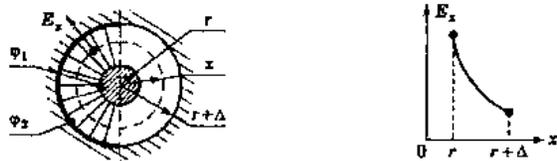


Рис.3 – Результати спільного рішення електричної, теплової і економічної моделей для різних значень максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю

Очевидно, що рішення має прийматись з урахуванням його економічної вартості.

Те, що зменшення напруженості електричного поля за рахунок збільшення товщини ізоляції зумовлює збільшення витрат на матеріали, є тривіальним. А от досить виразний оптимум питомих витрат на матеріали в діапазоні товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм (рис.3 в). і відповідність цього діапазону тому факту, що при подальшому зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю (рис.3 а) є важливим результатом саме спільного вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю.



E_x — напруженість алектричного поля в ізоляції на відстані x від центру жили; r — радіус жили (з урахуванням товщини екрану для екранованих жил); Δ — товщина ізоляції; ϕ — потенціал; $U = \phi_1 - \phi_2$ — різниця потенціалів

Рис. 4 - Схема простої моделі радіального електричного поля при змінному струмові, яка складає систему на рисунку 2 та схема відповідного графіка розподілу напруженості поля в ізоляції

За цим слід додати, що:

- прості моделі, які складають систему, можна ускладнювати, залежно від необхідності врахування особливостей конструкції кабелю, умов його прокладання і економічних реалій конкретного виробника;
- до системи можуть і повинні бути залучені технологічні моделі, які пов'язують технічні та споживчі параметри кабелю з його технологічними параметрами; очевидно, що зв'язок з економічною складовою системи, а значить і необхідність спільного вирішення, посиляться;
- постійною турботою користувача має стати доцільне спрощення системи, як з огляду на принципову наближеність числових методів її вирішення, так і для забезпечення можливості технічного аналізу результатів.

Висновки. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. Наведене відповідне рішення для одножилкового кабелю перерізом 625 мм^2 на напругу 220 кВ. Встановлено, що оптимальний діапазон товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм і при зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю. Визначені перспективні напрямки розвитку запропонованого методу визначення пропускної спроможності високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією.

Список літератури: 1. *Леонов В.М.* Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / *В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный*; под ред. *И.Б. Пешкова*. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с. 2. *Брагин С.М.* Электрический и тепловой расчет кАбеля / *С.М Брагин*. – М.: Энергоатомиздат, 1960. – 328 с. 3. *Карпушенко В.П.* Силовые кабели низкой та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: підруч. для студ. вузів / *В.П.Карпушенко, Л.А. Щербенюк, Ю.О. Антоненць, О.А. Науменко* – Харків.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с. 4. ДСТУ ІЕС 60287 – 1, 2, 3. Електричні кабелі . Розрахунок номінального струму.

Надійшла до редколегії 03.11. 2010

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
В.М. КИРИЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХП»

ДО АНАЛІЗУ ВТРАТ В НАПІВПРОВІДНИХ ЕКРАНАХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Проаналізовано затухання електромагнітного поля в напівпровідних екранах кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ. Досліджено вплив товщини екрану по жилі на товщину ізоляції кабелю.

Проанализировано затухание электромагнитного поля в полупроводниковых экранах кабелей со шитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. Исследовано влияние толщины экрана по жиле на толщину изоляции кабеля.

Fading of the electromagnetic field is analysed in the semiconductor screens of cables with the sewn together polyethylene isolation on tension 330 kV. Influencing of thickness of screen on a tendon on the thickness of isolation of cable is explored.

Постановка проблеми. Відповідно до діючих міжнародних стандартів [1] для кабелів високої напруги із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу до 110 кВ включно втратами в напівпровідних екранах, які виготовляють з матеріалу ізоляції, наповненого сажею, нехтують. Однак результати вимірювань електрофізичних характеристик матеріалу для напівпровідних екранів кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією [2] свідчать про те, що відношення комплексної діелектричної проникності (показник розсіяння енергії електричного поля в матеріалі) до дійсної є дуже високим (кілька сотень). Тому питання про необхідність врахування втрат в напівпровідних екранах для кабелів надвисокої напруги (330 кВ) із зшитою поліетиленовою ізоляцією, як інноваційної вітчизняної продукції, є актуальним.

Аналіз літературних джерел. Напівпровідні екрани по жилі і по ізоляції складаються з композиційного матеріалу – зшитого поліетилену, наповненого ацетиленовою сажею. Такий матеріал за структурою і характеристиками можна розглядати як неідеальний діелектрик, що проводить електричний струм. Для електромагнітного поля в неідеальному діелектрику, що проводить електричний струм [3] згідно з рівняннями Максвелла у комплексній формі:

$$\operatorname{rot} \dot{H}_m = (\gamma + j\omega\epsilon_a) \dot{E}_m = \dot{\delta}_m + \dot{\delta}_{m_{zm}}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \dot{E}_m = (-j\omega\mu_a) \dot{H}_m, \quad (2)$$

де \dot{H}_m – амплітуда напруженості магнітного поля; \dot{E}_m – амплітуда напруженості електричного поля; γ, ϵ_a – питома електропровідність та абсолютна діелектрична проникність матеріалу; $\dot{\delta}_m, \dot{\delta}_{m_{zm}}$ – амплітуди густини струмів електропровідності та зміщення; ω – кругова частота.

Вирішення (1) і (2) для напівпровідних екранів кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією дозволяє оцінити затухання електромагнітного поля в екранах.

Ціль, задачі дослідження. Проаналізувати затухання електромагнітного поля в напівпровідних екранах кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ за рівняннями (1) і (2), за умови розповсюдження електромагнітного поля вздовж однієї осі, що відповідає радіальному полю цих кабелів. Дослідити вплив товщини екрану по жилі на товщину ізоляції кабелю, а відтак на вартість матеріалів системи «надпровідний екран по жилі – ізоляція» таких кабелів за різних максимально допустимих напруженостей електричного поля в ізоляції.

Основний матеріал дослідження. Рівняння (1) і (2) за умови напрямлення осі z по вектору напруженості електричного поля і вибору напрямку розповсюдження електромагнітного поля вздовж осі y (розповсюдження вздовж однієї осі) у декартових координатах мають класичне рішення як диференціальне рівняння другого порядку:

$$\dot{E}_{mz} = \dot{E}_m = \dot{C}_1 e^{-\vartheta y} + \dot{C}_2 e^{\vartheta y}, \quad (3)$$

де ϑ - коефіцієнт розповсюдження:

$$\vartheta = (j\omega\mu_a (\gamma + j\omega\epsilon_a))^{0.5}. \quad (4)$$

У (3) постійні \dot{C}_1 і \dot{C}_2 є визначеними, якщо прийняти початкові умови: за $y \rightarrow \infty$, $\dot{E}_m \rightarrow 0$; за $y = 0$, $\dot{E}_m = \dot{E}_{mz}(0)$. Тоді $\dot{C}_1 = \dot{E}_{mz}(0)$; $\dot{C}_2 = 0$ і (3) може бути використана для конкретних розрахунків з урахуванням зроблених припущень.

В таблиці 1 наведені відповідні прийняті діапазони та результати розрахунків.

Дані таблиці свідчать про те, що у вибраних діапазонах електрофізичних характеристик поліетилену, наповненого сажею, на електричне поле в напівпровідному екрані суттєво впливає питома електропровідність і частота. Для промислової частоти визначальним є вплив питомої електропровідності матеріалу екранів по жилі і по ізоляції. Цей вплив ілюструє рисунок 1, на якому представлені результати розрахунку за (3) за різних значень питомої електропровідності матеріалу екрану.

Таблиця 1 – Діапазони можливих значень електрофізичних характеристик зшитого поліетилену, наповненого ацетиленовою сажею, і параметрів розповсюдження змінного електричного поля за різних частот

Частота Гц	Значення коефіцієнту затухання α (Нп/м) і коефіцієнту фази β (рад/м) в діапазоні відносної діелектричної проникності матеріалу $\epsilon \in [2,3 - 10]$ за наступних значень питомої електропровідності γ (См/м) (числові значення α і β співпадають)					
	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3
50	$1,407 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	0,014	0,044	0,141	0,445
60	$1,613 \cdot 10^{-3}$	$5,101 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,051	0,161	0,51
10^3	$8,05 \cdot 10^{-3}$	0,025	0,081	0,255	0,805	2,546
10^5	0,079	0,215	0,793	2,507	7,928	25,07
10^7	0,716	2,481	7,919	25,064	79,266	250,663
10^9	1,242	12,083	71,646	248,125	791,859	2506

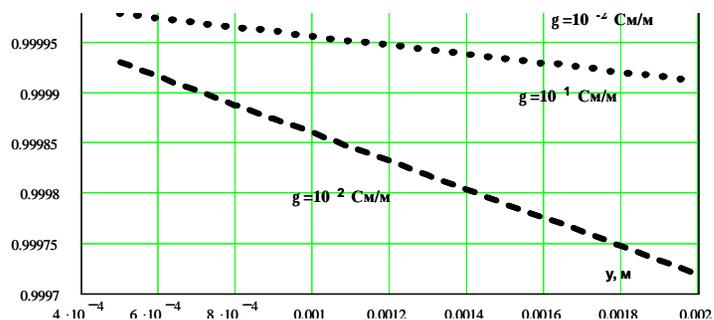


Рис. 1 – Залежності коефіцієнту зменшення амплітуди напруженості E_t змінного електричного поля в матеріалі напівпровідного екрану високовольтного кабелю від відстані y , м від поверхні струмопровідної жили за промислової частоти і різних значень питомої електропровідності матеріалу екрану

Значення коефіцієнту зменшення амплітуди напруженості електричного поля на рис.1 свідчать про те, що розсіяння енергії електромагнітного поля в матеріалі напівпровідних екранів в реальних кабелях дуже незначне, але таке розсіяння, по-перше, існує, а по-друге, суттєво залежить від електропровідності екрану і частоти електромагнітного поля.

Діапазон доцільних значень товщини напівпровідних екранів надвисоковольтних кабелів визначений їх призначенням, – регулюванням напруженості електричного поля в ізоляції кабелів. Товщина ізоляції пов'язана з максимальною допустимою напруженістю E_{max} і товщиною екрану Δe співвідношенням:

$$\Delta iz = (rg + \Delta e) \left[\exp\left(\frac{U}{E_{max} \cdot (rg + \Delta e) \cdot \sqrt{3}}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

де rg - радіус струмопровідної жили; U - номінальна напруга.

Відповідно до (6) може бути визначено витрати C на матеріал напівпровідного екрану по жилі і матеріал ізоляції при різних значеннях максимальної допустимої напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на задану напругу:

$$C = 2\pi \cdot c \left[\Delta e \cdot (rg + \Delta e \cdot 1.5) \cdot k_e + \Delta iz \cdot (rg + \Delta e + \frac{\Delta iz}{2}) \right], \quad (6)$$

де c - вартість матеріалу ізоляції на 1 мм^2 площі поперечного перерізу і на 1 м довжини кабелю; k_e – коефіцієнт вартості матеріалу екрану по відношенню до матеріалу ізоляції.

На рисунку 2 наведені залежності суми вартостей матеріалу напівпровідного екрану по жилі і матеріалу ізоляції від товщини екрану при різних значеннях максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на напругу 330 кВ з перерізом жили 625 мм^2 .

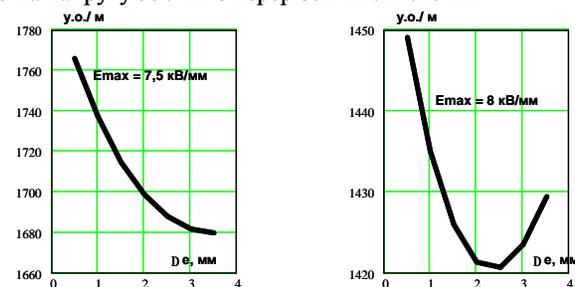


Рис. 2 – Залежності суми вартостей матеріалу напівпровідного екрану по жилі і матеріалу ізоляції від товщини екрану при різних значеннях максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на напругу 330 кВ з перерізом жили 625 мм^2 : умовна ціна матеріалу ізоляції $0,1 \text{ у.о./мм}^2 \text{ м}$

Результати розрахунків за (5) і (6), які ілюструє рис. 2, свідчать про те, що для кожної конкретної конструкції кабелю існує економічний оптимальний розмір товщини напівпровідного екрану, який визначається за заданої напруги, перш за все, розміром струмопровідної жили, допустимою максимальною напруженістю електричного поля в ізоляції і співвідношенням вартості матеріалу екрану і ізоляції.

При подальшому визначенні втрат в напівпровідних екранах розрахунки велись для відповідних діапазонів оптимальної товщини екранів. Для орієнтовного оцінювання потужності розсіювання енергії в напівпро-

відних екранах конкретних конструкцій кабелів можна використати різні схеми заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції». Наприклад, використати відому паралельну схему заміщення для кожного з елементів системи, наведену на рисунку 3

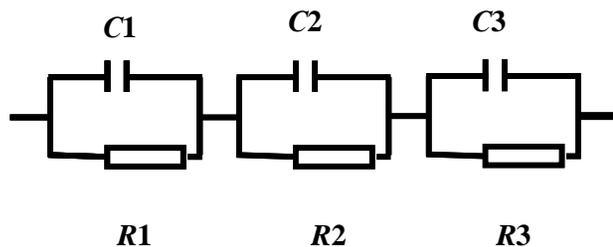


Рис. 3 – Схема заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції»

Якщо параметри схеми заміщення $C1, C2, C3$ (ємності елементів системи) і $R1, R2, R3$ (електричні опори елементів системи) визначити за відомими формулами для радіального електричного поля, то відповідні комплексні опори цих елементів визначаються формулою:

$$z = -j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \frac{R}{R - j\left(\frac{1}{\omega C}\right)}, \quad (7)$$

Струм, який протікає через ізоляцію і напівпровідні екрани кабелю визначається фазною напругою U_{ϕ} і сумою комплексних опорів цих елементів конструкції кабелю:

$$I = \frac{U_{\phi}}{z_1 + z_2 + z_3}, \quad (8)$$

Напруги на елементах системи і активні втрати в них визначаються формулами:

$$U_1 = I \cdot z_1; P_{a1} = U_1 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)], \quad (9)$$

$$U_2 = I \cdot z_2; P_{a2} = U_2 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)], \quad (10)$$

$$U_3 = I \cdot z_3; P_{a3} = U_3 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)], \quad (11)$$

Критерієм відповідності результатів розрахунків за схемою заміщення є значення розрахованої за (10) величини втрат в діелектрику P_{a2} , оскільки в цих розрахунках, в принципі не використане поняття тангенсу кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ ізоляції. Тому є принципово важливим порівняння результату розрахунку P_{a2} з оцінкою цієї величини за відомою формулою для P_{iz} (12), яка базується на експериментально визначеному

значенні $\operatorname{tg}\delta=0,0014$ [2] для зшитого поліетилену у високовольтних кабелях.

Потужність втрат в діелектрику P_{iz} у високовольтних кабелях з ізоляцією із зшитого поліетилену [1]:

$$P_{iz} = U_{\phi}^2 \omega C_2 \operatorname{tg}\delta, \quad (12)$$

$$P_{iz} = (330000/\sqrt{3})^2 2\pi \cdot 50 \cdot 0,47 \cdot 10^{-10} \cdot 0,0014 = 0,753 \text{ Вт/м.}$$

За схемою заміщення значення розрахованої за (3.6.13) при питомій електропровідності ізоляції кабелю 10^{-11} См/м : $P = 0,842 \text{ Вт/м}$.

Результати розрахунків за (9) і (11), по-перше, свідчать про те, що зменшення питомої електропровідності матеріалу екрану зумовлює збільшення втрат в екрані, але в достатньо широкому діапазоні значень питомої електропровідності матеріалу екрану, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м , потужність втрат в напівпровідних екранах знаходиться в межах від 10^{-3} Вт/м до 10^{-8} Вт/м . Тому при визначенні теплового режиму роботи надвисоковольтних кабелів на напругу 330 кВ, а значить при визначенні їх пропускної спроможності, потужністю втрат в напівпровідних екранах можна знехтувати. Цей висновок зберігається і для інших, більш складних, схем заміщення.

Висновки. 1. При визначенні теплового режиму роботи надвисоковольтних кабелів на напругу 330 кВ, а значить при визначенні їх пропускної спроможності, потужністю втрат в напівпровідних екранах можна знехтувати.

2. Для кожної конкретної конструкції кабелю існує економічний оптимальний розмір товщини напівпровідного екрану, який визначається за заданої напруги, перш за все, розміром струмопровідної жили, допустимою максимальною напруженістю електричного поля в ізоляції і співвідношенням вартості матеріалу екрану і ізоляції.

Список літератури: 1. IEC 287-1-1. Electric cables – Calculation of the current rating – Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General. 2. Mugala G.: Comparing Two Measurement Techniques for High Frequency Characterization / G. Mugala // IEE Transaction on Dielectrics and Electrical insulation, 2006.– Vol. 13. – № 4. – P. 712-716 3. Говорков В.А. Теорія електромагнітного поля / В.А.Говорков, С.Л. Купалян. – М.: Высш. шк., 1963. – 371 с.

Надійшла до редколегії 03.11. 2010

Ю.Н. ШУМИЛОВ, докт. техн. наук, проф., ГП «НИИВН», Славянск;
М.Ю. ШУМИЛОВ, канд. техн. наук, инж., ГП «НИИВН», Славянск

ИНДИКАТОР ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В статье описан новый вариант конструкции индикатора пробоя полимерных изоляторов для воздушных линий. Также представлены результаты проведения предыдущих испытаний экспериментальных образцов индикаторов пробоя изоляторов.

У статті описано новий варіант конструкції індикатора пробоя полімерних ізоляторів для повітряних ліній. Також представлено результати проведення попередніх випробувань експериментальних зразків індикаторів пробоя ізоляторів.

The article describes a new embodiment of indicator for detecting puncture in polymeric insulators for transmission lines. It also gives the results of pretests on experimental samples of insulator puncture indicators.

В процессе длительной эксплуатации полимерных изоляторов в линиях электропередачи было выявлено, что пробой полимерного изолятора в большинстве случаев не приводит к его механическому разрушению, а следы обгорания кремнийорганической оболочки могут быть замечены только с близкого расстояния. В связи с этим на поиск пробитого изолятора в обесточенной линии затрачивается значительное количество времени, следствием чего бывает недоотпуск электроэнергии и сбои в работе электрических установок потребителей. Не менее остро стоит проблема поиска места самоустраняющегося повреждения, при котором после успешного АПВ линия остается в рабочем состоянии.

Для обнаружения места аварии в обесточенной линии необходимо чтобы изоляторы или опоры линии электропередачи были оснащены специальными устройствами для визуального определения пробоя электрооборудования. Принцип действия таких устройств может быть основан на использовании энергии, выделяющейся в месте возникновения короткого замыкания. Подавляющее большинство известных устройств, предназначенных для индикации места короткого замыкания в линии электропередачи, серийно выпускаемых такими фирмами как Cooper Power System (США), Nortroll (Норвегия) и пр., реагируют на изменение магнитного поля в зоне короткого замыкания, вызванного повреждением изоляции. В зависимости от типа, индикаторы размещают прямо на линию – крепят к фазному проводу специальными зажимами или устанавливают на опоры линии электропередачи на 3 – 5 м ниже проводов. Визуальная индикация, как правило, выполнена в виде ярких светодиодов, расположенных в корпусе индикатора.

Существенными недостатками данных индикаторов являются их зависимость от срока службы элементов питания – литиевых батарей, а также снижение яркости свечения светодиодов, указывающих аварийный режим, при их загрязнении на участках линии, проходящих в промышленных районах. Цена на индикаторы неисправности линий такого типа колеблется в пределах от 40 до 400 долларов США, в зависимости от исполнения устройства.

В 70 + 80-х годах были опубликованы ряд советских патентов на устройства для определения опоры линии электропередачи с поврежденной изоляцией [1, 2, 3]. Принцип действия запатентованных устройств индикации пробоя изоляции основан на использовании тепловой энергии или энергии магнитного поля, выделяющейся при пробое или перекрытии гирлянд изоляторов. Их основными недостатками являются непродолжительный срок службы и сложность конструкции.

На основании сказанного выше очевидно, что проблема создания простого, надежного, долговечного и дешевого индикатора места короткого замыкания для линий электропередачи классов напряжения 220 кВ ÷ 750 кВ актуальна по сей день.

При разработке индикатора пробоя полимерных изоляторов во внимание были приняты следующие требования к конструктивным и функциональным свойствам индикатора:

1. Индикатор пробоя должен регистрировать протекание тока короткого замыкания линии, возникшего в результате электрического пробоя изоляции контролируемого электрооборудования линии электропередачи (полимерного изолятора), действующее значение которого составляет 5 кА – 40 кА, длительностью 0,12 с (6 полных периодов тока промышленной частоты) и более.

2. Сигнальный элемент индикатора пробоя, зарегистрировавшего протекание тока короткого замыкания через контролируемый элемент линии электропередачи, должен быть визуально различим с расстояния 40 м – 50 м.

3. Индикатор пробоя не должен срабатывать при грозовом перекрытии изоляции контролируемого элемента линии электропередачи, в случае если искровой разряд не переходит в дуговой.

4. Индикатор пробоя, установленный на контролируемый элемент линии электропередачи, не должен влиять на его электрические и механические характеристики.

5. Индикатор пробоя должен быть устойчив к вибрации, загрязнениям, влаге и перепаду температур от – 60 °С до + 50 °С.

6. Индикатор пробоя должен иметь возможность многократного использования.

7. Возвращение индикатора пробоя из состояния, указывающего регистрацию протекания тока короткого замыкания через контролируемый

объект линии электропередачи, в исходное состояние должно осуществляться вручную без применения какого-либо нестандартного инструмента.

8. Все элементы индикатора пробоя должны быть коррозионно-стойкими.

9. Гарантированный срок службы индикатора пробоя не должен быть менее гарантированного срока службы контролируемого элемента линии электропередачи.

Устройство (индикатор пробоя), разработанное на предприятии ГП «НИИВН» г. Славянск, предназначенное для визуального обнаружения электрического пробоя электрооборудования линий электропередачи и отвечающее всем указанным выше требованиям изображено на рис.1.

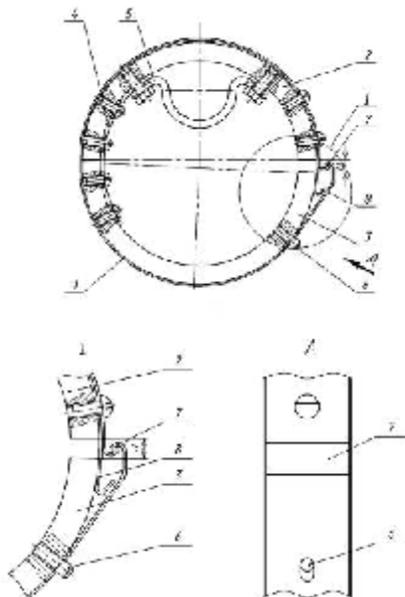


Рис. 1 – Индикатор пробоя высоковольтных полимерных изоляторов

Индикатор пробоя содержит элемент контроля протекающего тока и сигнальный элемент 1 (рис.1). Элемент контроля протекающего тока состоит из двух полуколец, выполненных из ферромагнитного материала, одно из которых неподвижное 2, другое - подвижное 3. С одной стороны полукольца соединены плоской пружиной 4, а с другой стороны разделены зазором d . На внутренней поверхности неподвижного полукольца 2 установлена скоба 5 для крепления индикатора пробоя к контролируемому-

му объекту – например, к металлическому оконцевателю полимерного изолятора. Сигнальный элемент 1 выполнен в виде плоской ленты из упругого материала, охватывающей наружную поверхность элемента контроля протекающего тока, один конец которой закреплен на неподвижном полукольце 2, а другой зафиксирован упорным винтом 6 подвижного полукольца 3. Концы сигнального элемента выполнены в виде замка 7, снабженного толкателем 8, предназначенным для раскрытия замка.

Индикатор пробоя работает следующим образом. С помощью скобы 5 индикатор крепится к контролируемому объекту, например, к металлическому оконцевателю полимерного изолятора (рис.2).

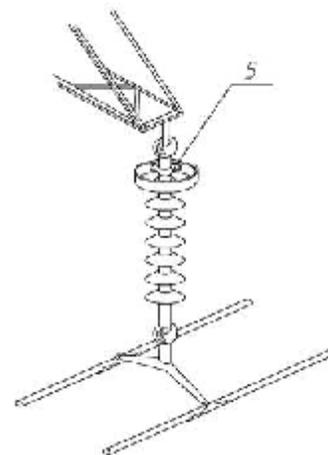


Рис. 2 – Вариант крепления индикатора пробоя к полимерному изолятору

В момент электрического пробоя полимерного изолятора ток короткого замыкания, протекающий вдоль его стержня, создаст переменный магнитный поток, пронизывающий ферромагнитные полукольца - неподвижное 2 и подвижное 3 элемента контроля протекающего тока, разделенные зазором d . Вследствие действия на ферромагнитные полукольца электродинамической силы, притягивающей подвижное полукольцо 3 к неподвижному 2, зазор d между полукольцами уменьшается, толкатель 8 вызывает размыкание замка 7, которым зафиксирован один конец сигнальной ленты. Вследствие упругого распрямления плоской ленты сигнального элемента 1 ее отброшенный конец сигнализирует о срабатывании индикатора пробоя (рис.3).

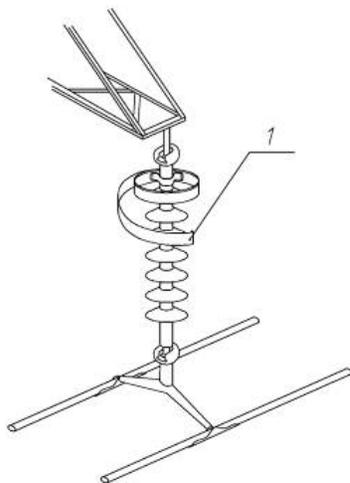


Рис. 3 – Индикатор пробоя сигнализирует о пробое изолятора

Для проверки работоспособности описанной выше индикатора пробоя было изготовлено два экспериментальных образца (см. рис.4). Первый образец с наружным диаметром 127 мм и площадью сечения полукольца 10 мм × 40 мм (малое кольцо). Второй образец с наружным диаметром 179 мм и площадью сечения полукольца 8 мм × 40 мм (большое кольцо).



Рис.4 – Экспериментальные образцы индикаторов пробоя полимерных изоляторов

Полукольца были изготовлены из стальной трубы – сталь 3. Для проведения экспериментов по определению порога срабатывания экспериментальных образцов индикатора пробоя было изготовлено три комплекта плоских пружин, соединяющих стальные полукольца, толщиной 1 мм, 1,5 мм и 2 мм. Плоские пружины изготовлены из пружинной стали марки

60Г2С. Индикаторная лента изготовлена из полосы пружинной стали толщиной 0,8 мм.

Усилие смыкания полуколец экспериментальных образцов, рассчитанное по формуле:

$$F = \frac{m_0}{2} \cdot \frac{l^2}{d_0^2} \cdot S ,$$

где d_0 - ширина воздушного зазора, разделяющего ферромагнитные полукольца; S – площадь сечения ферромагнитного полукольца.

- для образца с наружным диаметром 127 мм (малое кольцо) и площадью сечения полукольца 10 мм × 40 мм, разделенных воздушным зазором шириной $\delta = 7$ мм, при токе 10 кА составляет 512, 6 Н;

- для образца с наружным диаметром 179 мм (большое кольцо) и площадью сечения полукольца 8 мм × 40 мм, разделенных воздушным зазором шириной $\delta = 7$ мм, при токе 10 кА составляет 410 Н;

Определение порога срабатывания по току, описанных выше экспериментальных образцов индикатора пробоя, было проведено в испытательном центре ГП «Научно-исследовательский институт высоких напряжений».

Экспериментальные образцы индикаторов пробоя устанавливались на макет полимерного изолятора стеклопластиковый стержень которого был заменен алюминиевым стержнем с целью имитации пробоя изолятора. Макет изолятора с индикаторами пробоя был подключен к вторичной обмотке испытательной установки для испытаний выключателей и разъединителей на стойкость при сквозных токах к.з.

В каждый опытный образец индикатора пробоя в процессе испытаний устанавливались пружины различной упругости (пружины изготовленные из одного материала – сталь 60Г2С, но различной толщины), определяющие чувствительность индикаторов.

Уверенное срабатывание индикаторов пробоя наблюдается при токе более 6 кА. На рис.5 изображены опытные образцы индикаторов пробоя, зафиксировавшие протекание тока короткого замыкания – концы сигнальных лент освободились из замков.

Индикатор с наружным диаметром 127 мм (малое кольцо) обладает более высокой чувствительностью (срабатывание при токе 4,5 кА), в сравнении с индикатором, наружный диаметр которого 179 мм (большое кольцо).



Рис. 5 – Индикаторы пробоя зафиксировали протекание тока короткого замыкания вдоль макета изолятора – концы сигнальных лент освободились из замков

По окончании токовых испытаний экспериментальных образцов индикаторов пробоя они были подвергнуты испытанию импульсным напряжением стандартного коммутационного импульса с формой волны 250/2500 мкс (требования ГОСТ 1516.2 – 97).

Испытание экспериментальных образцов индикаторов пробоя воздействием напряжения коммутационных импульсов проводилось в испытательном центре ГП «НИИВН» на установке ГИН 400/5000. Экспериментальные образцы индикаторов пробоя были установлены на оконцеватели полимерного изолятора типа ЛК 120/110. Индикатор пробоя с наружным диаметром 127 мм (малое кольцо) был установлен на нижнем оконцевателе изолятора, индикатор, наружный диаметр которого 179 мм (большое кольцо) – на верхнем оконцевателе. С обеих сторон изолятора были установлены обострители напряженности поля в виде отрезков проволоки 1, рис.6, расположенные так, что один конец отрезка проволоки закреплен на металлическом оконцевателе, а другой расположен между полукольцами индикатора пробоя, выступая за плоскость кольца индикатора до 3-го ребра изолятора, считая от оконцевателя. Оба экспериментальных образца индикатора пробоя были собраны с плоскими пружинами, толщина которых – 1 мм. Изолятор типа ЛК 120/110, с установленными на его оконцевателях индикаторами пробоя, пятикратно перекрывался импульсами положительной и отрицательной полярности. Разряды проходили между проволочными обострителями.

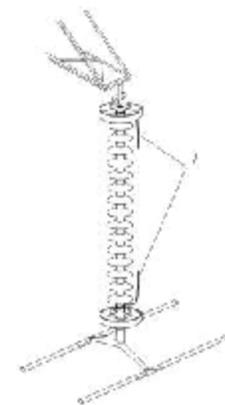


Рис. 6 – Макет изолятора с индикаторами пробоя и проволочными обострителями напряженности электрического поля

Результат испытаний – индикаторы не сработали при перекрытии изолятора коммутационным импульсом.

По результатам проведенных испытаний опытных образцов индикаторов имитирующих пробой протекающими токами короткого замыкания и при перекрытии изоляторов грозовым импульсом с установленными на них индикаторами установлено, что индикаторы пробоя не реагируют на импульсное перекрытие изоляторов, однако уверенно срабатывают при протекании токов короткого замыкания промышленной частоты вдоль оси изолятора, т.е. фиксируют его электрический пробой. Указанные явления свидетельствуют о пригодности предложенной конструкции индикатора пробоя для создания на ее базе образцов индикаторов предназначенных для массового использования в линиях электропередачи и выпускаемых серийно.

На упомянутые образцы индикаторов пробоя получен патент Украины №84497, МПК (2006) G01R 31/08 «Устройство для визуального обнаружения электрического пробоя электрооборудования линий электропередачи».

Список литературы: 1. А. с. 885934 СССР, МПК³ G 01 R 31/08. Устройство для определения перекрытых гирлянд изоляторов линии электропередачи / А. Г. Бойко, С. А. Юрьев, Н. А. Марковский. - № 2869285/24-21 ; Заявл. 08.01.80 ; Оpubл. 30.11.81, Бюл. № 44. 2. А. с. 712784 СССР, МПК² G 01 R 31/08. Устройство для определения опоры и гирлянды линии электропередачи с поврежденной изоляцией / А. И. Айзенфельд, В. А. Борухман, А. З. Красновский, А. Ф. Погосский. - № 2454174/24-21 ; Заявл. 17.02.77 ; Оpubл. 30.01.80, Бюл. № 4. 3. А. с. 1182445 СССР, МПК² G 01 R 31/08. Устройство для определения перекрытой гирлянды изоляторов линии электропередач (его варианты) / В. И. Якименко. - № 3709636/24-21; Заявл. 27.01.84 ; Оpubл. 30.09.85, Бюл. № 36.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

Ю.Н. ШУМИЛОВ, докт. техн. наук проф., ГП «НИИВН», Славянск;
М.Ю. ШУМИЛОВ, канд. техн. наук, инж., ГП «НИИВН», Славянск

ПОВЫШЕНИЕ ВЛАГОРАЗЯДНЫХ СВОЙСТВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В работе описаны механизмы вулканизации герметиков, традиционно используемых для герметизации силовых узлов полимерных изоляторов. Проведенный теоретический и экспериментальный анализ возможности использования жидких силиконовых резин аддитивной вулканизации для улучшения герметизации силовых узлов полимерных изоляторов. Поданы рекомендации относительно применения данных резин при производстве полимерных изоляторов.

У роботі описані механізми вулканізації герметиків, традиційно використовуваних для герметизації силових вузлів полімерних ізоляторів. Проведений теоретичний і експериментальний аналіз можливості використання рідких силіконових гум аддитивної вулканізації для поліпшення герметизації силових вузлів полімерних ізоляторів. Подано рекомендації щодо застосування даних гум при виробництві полімерних ізоляторів.

The research describes mechanisms of curing of traditionally used sealants for sealing of polymer insulators' line assemblies. The theoretic and experimental analysis of possible usage of liquid silicon rubbers with additive curing for improvement of sealing of polymer insulators' line assemblies is made. Recommendations regarding application of such rubbers at manufacturing of polymer insulators are made.

Статистика повреждений полимерных изоляторов показывает, что значительное число повреждений вызвано недостаточной герметизацией силовых узлов, рис. 1.



Рис. 1 – Нарушение герметизации силового узла линейного полимерного изолятора типа ЛК

В настоящее время герметизация силовых узлов линейных изоляторов типа ЛК и железнодорожных изоляторов типов ПСК, НСК, ФСК и КСК осуществляется с помощью герметиков КЛТ-30 или ЭКП-102, вулканизирующихся при комнатной температуре. В состав указанных герметиков входят силиконовый низкомолекулярный каучук СКТН, наполнитель (титановые белила) и вулканизирующий агент (К-10С, метилтриацетоксисилан).

Отличительными свойствами указанных герметиков являются: простота технология нанесения, поскольку они являются одноупаковочными; не требуют смешения перед нанесением; отверждаются при комнатной температуре. Они обладают высокими диэлектрическими свойствами ($\rho_v = 10^{10} - 10^{12}$ Ом·см, $E_{np} = 15 - 20$ кВ/мм) и высокой светопропускностью. К недостаткам следует отнести низкие разрушающие напряжения при растяжении, сопротивление раздиру и отслаиванию. Отслаивание от металлов, особенно в присутствии влаги, является их главным недостатком. Этот недостаток выявляется, прежде всего, при стандартных испытаниях изоляторов по показателю «Стойкость к проникновению влаги» (п. 5.1.8, СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004 «Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия» [1]) или «Испытание погружением в воду» (согласно требованиям п. 5.1.3.3 МЭК 61109:1992 «Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередач с номинальным напряжением свыше 1000 В – Определения, методы испытаний и приемочные критерии» [2]).

Этот вид испытаний предусматривает погружение изоляторов на 42 часа в сосуд с кипящей деионизированной водой, содержащей 0,1 % NaCl, с последующим испытанием изоляторов импульсным напряжением с крутым фронтом волны. На рис. 2 показан результат воздействия импульсных напряжений с крутым фронтом волны.



Рис.2 – Изолятор типа ПСК 120-3,3-7, пробитый импульсным напряжением с крутым фронтом волны

Кроме этого, при снятии с изоляторов оконцевателей отчетливо просматриваются следы ржавчины на внутренней поверхности раструба оконцевателя.

Следы ржавчины в раструбах оконцевателей обнаруживаются и при испытании изоляторов в загрязненном и увлажненном состоянии. После кипячения наблюдается существенный рост токов утечки через стеклопластиковый стержень, а изоляторы при воздействии переменного напряжения $0,8 \cdot U_{\text{ср}}$ начинают нагреваться. Все это указывает на недостаточную герметизацию силовых узлов при использовании герметиков КЛТ и ЭКП.

Поставленная в работе задача улучшения эксплуатационных свойств полимерных изоляторов вызвала необходимость проведения анализа влияния состава герметиков, механизма их отверждения и используемой технологии на качество герметизации.

Известно [3, 4], что отверждение герметиков КЛТ-30 и ЭКП-102 осуществляется с помощью катализатора К-10С при комнатной температуре в присутствии влаги воздуха. Катализатор К-10С (метилтриацетоксисилан) имеет кислую реакцию, т.к. при соприкосновении с влагой воздуха быстро гидролизуетсся с образованием уксусной кислоты. Она же в больших количествах выделяется при отверждении каучука СКТН в результате присоединения атомов водорода гидроксильных групп каучука к кис-лотным остаткам катализатора.

Вулканизация протекает только в присутствии влаги воздуха. При этом прежде происходит гидролиз ацетатных групп, и затем конденсация молекул с помощью сшивающих агентов, содержащих три функциональные группы, в результате чего возрастает молекулярная масса. Выделяющаяся уксусная кислота, имеющая характерный запах, улетучивается из системы.

Агрессивная концентрированная уксусная кислота, как показали испытания, вызывает коррозионное повреждение углеродистой стали. Выделение кислоты также сопровождается усадкой герметика. Усадка герметика и коррозия стали являются главными причинами недостаточной адгезионной прочности соединения металла с герметиком, что проявляется в отслаивании герметика от металла и проникновении влаги к стеклопластиковому стержню и границе раздела «стеклопластик – резина».

Попытка применения других катализаторов отверждения каучука СКТН, не образующих уксусную кислоту, не дали положительных результатов.

Так, применение хорошо известного катализатора К-18 (тетраэтоксисилан)

существенно усложнило технологию герметизации, увеличило время отверждения и не улучшило качества изоляторов. Усложнение техноло-

гии заключалось в том, что герметики с катализатором К-18 являются двухкомпонентными и требуют смешения перед нанесением.

Реакция вулканизации протекает очень медленно, поэтому она требует ускорения соответствующими катализаторами кислого или щелочного характера. Такими являются соли металлов или металлоорганических соединений: Sn, Pb, Ti, Zn. В основном применяется октоат олова ($\text{Sn}(\text{OOC}_7\text{H}_{15})_2$).

Реакция отверждения с катализатором К-18 также сопровождается выделением побочного продукта (в данном случае спирта) и, как следствие, усадкой герметика. Кроме этого, применение герметика с катализатором К-18 требует предварительно грунтовки поверхности металлов.

Приведенный выше анализ механизмов отверждения герметиков показал, что герметизация изоляторов должна осуществляться веществами, отверждение которых происходит без усадки и без выделения побочных продуктов.

Для проверки этой гипотезы был проведен поиск соответствующих материалов и проведены эксперименты на изоляторах герметизированных выбранными материалами.

Поиск таких материалов привел к группе жидких силиконовых резин аддитивной вулканизации, осуществляемой при комнатной температуре. Эта группа материалов состоит из полидиметилсилоксановых каучуков с концевыми винильными группами и вулканизирующим веществом в виде водород-функциональных силоксанов. Вулканизация происходит с помощью платинового катализатора при комнатной температуре по схеме аддитивной сшивки и быстро ускоряется при возрастании температуры, при этом вулканизация осуществляется без выделения побочных продуктов и, следовательно, без усадки.

Испытания жидких резин для герметизации силовых узлов проводились на изоляторах ФСК 120-6-3,3-7-Ц.

Технология силовых узлов с помощью жидких резин состоит из следующих операций:

1. Снятие цинкового покрытия с поверхности силового узла оконцевателя (на токарном станке), на которую будет наноситься герметизирующий состав.
2. Обезжиривание герметизируемых поверхностей силового узла изолятора ацетоном или спиртово-ацетоновой смесью.
3. Нанесение грунтовки на очищенную стальную поверхность оконцевателя с последующей выдержкой в сушильном шкафу при температуре 100 – 130 °С.
4. Опрессовка остывшего после термообработки оконцевателя на изоляционную деталь полимерного изолятора.
5. Смешение двух компонент жидкой резины в строго нормированной пропорции.

6. Нанесение смешенной жидкой резины на силовой узел изолятора с помощью медицинского шприца или другого специального инструмента.

Макеты изоляторов, силовые узлы которых были герметизированы по указанной выше технологии с помощью силиконовых жидких резин, успешно выдержали испытания на соответствие требованиям п. 5.1.3.3 ИЕС 61109:1992 «Испытание погружением в воду» с последующим испытанием изоляторов импульсным напряжением с крутым фронтом волны, а также испытанием напряжением промышленной частоты, равным $0,8 \cdot U_{ср}$ в течение 30 мин. Препарирование силовых узлов испытанных макетов показало отсутствие отслоений вулканизированной жидкой резины от стальной поверхности оконцевателей и полное отсутствие следов ржавчины.

Для подтверждения целесообразности применения новых материалов для герметизации силовых узлов были проведены сравнительные испытания изоляторов типа НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц, часть из которых была выполнена с применением герметика ЭКП-102 Э, а остальные - с жидкой силиконовой резиной. Изоляторы были подвергнуты кипячению в течение 42 ч в 0,1 % растворе NaCl («Испытание погружением в воду» согласно ИЕС 61109) с последующим испытанием импульсным напряжением с крутым фронтом волны 1000 – 1100 кВ/мкс. Согласно требованиям ИЕС 61109 каждый изолятор после кипячения должен выдерживать перекрытия 25 импульсами положительной и 25 импульсами отрицательной полярности без пробоя. Результаты испытаний опытных изоляторов приведены табл. 1 и рис. 3.

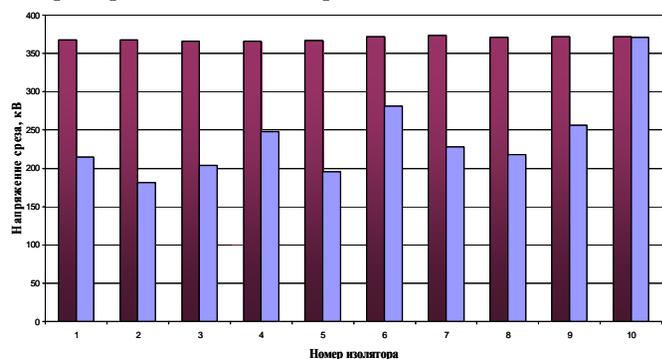


Рис. 3. - Импульсная электрическая прочность полимерных изоляторов НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц с герметизацией силовых узлов герметиком ЭКП-102 Э и жидкой силиконовой резиной:

- герметизация изолятора с помощью жидкой силиконовой резины;
- герметизация изолятора с помощью герметика ЭКП-102 Э.

Таблица 1 – Результаты испытания полимерных изоляторов НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц импульсным напряжением с крутым фронтом волны после кипячения

Тип изолятора	Герметизирующий материал	№ изолятора	Напряжение среза, кВ		Результат воздействия на изолятор испытательного напряжения		
			«+» полярность	«-» полярность			
НСК 120-3,3-7-Ц	Герметик ЭКП-102 Э	1	215	-	Пробой на 8-м импульсе положительной полярности		
		2	364	181	Пробой на 2-м импульсе отрицательной полярности		
		3	365	204	Пробой на 10-м импульсе отрицательной полярности		
		4	248	-	Пробой на 2-м импульсе положительной полярности		
		5	195	-	Пробой на 9-м импульсе положительной полярности		
		ФСК 120-6-3,3-7-Ц		6	281	-	Пробой на 5-м импульсе положительной полярности
				7	370	228	Пробой на 12-м импульсе отрицательной полярности
				8	367	218	Пробой на 7-м импульсе отрицательной полярности
				9	256	-	Пробой на 2-м импульсе положительной полярности
10	371			380	перекрытие изолятора		
НСК 120-3,3-7-Ц	Жидкая резина	1.1	368	369	перекрытие изолятора		
		2.1	368	371	то же		
		3.1	366	369	- // -		
		4.1	366	370	- // -		
		5.1	367	368	- // -		
		ФСК 120-6-3,3-7-Ц		6.1	372	376	- // -
				7.1	374	376	- // -
				8.1	371	380	- // -
				9.1	372	376	- // -
				10.1	372	378	- // -

В результате проведенных испытаний после кипячения была подтверждена высокая импульсная электрическая прочность изоляторов, герметизация силовых узлов которых была выполнена жидкой силиконовой резиной аддитивной вулканизации. Изоляторы выдержали по 25 перекрытий импульсным напряжением с крутым фронтом волны положи-

тельной и 25 перекрытий отрицательной полярности с амплитудой, в среднем, 365 – 375 кВ. Те же изоляторы, в которых герметизация силовых узлов была выполнена с помощью герметика ЭКП-102 Э, в большинстве, пробились: 5 шт. на импульсах положительной полярности (напряжение среза 215 – 256 кВ); 4 шт. на импульсах отрицательной полярности (напряжение среза 181 – 228 кВ). И лишь 1 изолятор выдержал по 25 перекрытий импульсами положительной и отрицательной полярности. Таким образом, результаты проведенных испытаний (табл. 1, рис. 3) показали, что импульсная электрическая прочность изоляторов с герметизацией силового узла, выполненная с помощью жидкой силиконовой резины аддитивной вулканизации более чем на 30 % выше изоляторов с герметизацией, выполненной с применением герметика ЭКП 102 Э.

Полимерные изоляторы НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц, герметизация силовых узлов которых была выполнена с помощью жидкой силиконовой резины, после кипячения и перекрытия импульсным напряжением дополнительно были испытаны напряжением промышленной частоты, равным 80 % сухоразрядного напряжения с выдержкой в течение 30 мин. Увеличение токов течи во время испытания напряжением промышленной частоты и нагрева изоляционных элементов изоляторов выявлено не было. Препарирование силовых узлов испытанных изоляторов ФСК 120-6-3,3-7-Ц показало отсутствие отслоений вулканизированной жидкой резины от стальной поверхности оконцевателей и полное отсутствие следов ржавчины.

Результаты, представленные в табл. 1 и рис. 3, подтверждают гипотезу о том, что применение кремнийорганических резин аддитивной вулканизации для изготовления полимерных изоляторов повышает их герметичность и, как следствие, электрическую прочность при комплексном воздействии климатических факторов и сильного электрического поля.

Полученные результаты проведенных исследований могут также использоваться при изготовлении наружной полимерной изоляции другого высоковольтного электротехнического оборудования: ограничителей перенапряжений, опорных и проходных изоляторов, трансформаторов тока и напряжения.

Список литературы: 1. СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004 Ізолятори лінійні підвісні стрижньові полімерні. Загальні технічні умови. Введ. 31.12.2004 до 2014. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2005. – 42 с. – УДК 621.315.624-036 (083.74). 2. Standart IEC 61109-92 Composite insulator for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria”. – 30 с. 3. *Смылова Р.А.* Справочное пособие по герметизирующим материалам на основе каучуков / *Р.А.Смылова, С.В.Котлярова.* – М.: Химия, 1976. – 72 с. УДК 62-762:678.074. 4. *Лабутин А.Л.* Антикоррозионные и герметизирующие материалы на основе синтетических каучуков / *Лабутин А.Л.* – Л.: Химия, 1982. – 214 с.

Поступила в редколлегию 03.11.2010

УДК 621.314

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Д. В. БАКЛАЙ, ассистент, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены принципы построения и функциональные возможности экспертных систем для диагностики состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования. Проанализировано достоинства и недостатки действующих экспертных систем. Предложены критерии для оценки эффективности разных экспертных систем.

У статті розглянуті принципи побудови та функціональні можливості експертних систем для діагностики стану високовольтного електроенергетичного обладнання. Проаналізовано достоїнства та недоліки діючих експертних систем. Запропоновані критерії для оцінки ефективності різних експертних систем.

In article principles of construction and functionalities of the expert systems used for diagnostics of a condition of the high-voltage electropower equipment are considered. Merits and demerits of working expert systems are analysed. Criteria for an estimation of efficiency of various expert systems are offered.

Введение. Проблема старения высоковольтного электроэнергетического оборудования является крайне актуальной, как для Украины, так и для других стран. Например, в США по состоянию на 1997 г. около 65% силовых трансформаторов отработали более 25 лет, в Японии более 30% парка трансформаторов старше 30 лет, в России около 50%. основных фондов электроэнергетики имеют наработку более 25 лет. По состоянию на конец 2005 г. средний срок эксплуатации электрооборудования Украины уже превышает половину проектного, что приводит к снижению надежности его функционирования, возрастанию аварийности [1, 2]. Обеспечение эксплуатационной надежности трансформаторов, в условиях, когда темпы старения значительно опережают темпы их замены, возможно за счет разработки новых технологий и практических методов оценки их технического состояния. Наиболее квалифицированное решение по повышению надежности трансформатора может быть получено с применением методов экспертных систем, разработки которых успешно ведутся как в Украине, так за рубежом. Экспертные системы (ЭС) - особые компьютерные программы, моделирующие действия эксперта-человека при решении задач на основе накопленных знаний, составляющих базу знаний (БЗ). Экспертная система оценки технического состояния электрооборудования определяет следующее: находится ли оборудование в нор-

мальном состоянии, не требующем какого-либо вмешательства; требуется ли дополнительное внимание со стороны персонала или учащенный контроль параметров оборудования; необходимо ли выполнение дополнительных измерений, испытаний и других профилактических мероприятий с отключением и без отключения; требуется ли проведение ремонтов, модернизации, облегчение режимов работы или вывод электрооборудования из работы.

В настоящее время разработаны и внедрены, как в Украине, так и за рубежом несколько экспертных систем, которые отличаются принципами построения, методами обработки данных и различными функциональными возможностями. Создание единой национальной ЭС возможно на основе учета имеющегося опыта разработки и эксплуатации таких систем. В связи с этим целесообразно выполнить сравнительный анализ возможностей различных ЭС, которые в настоящее время используются для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Цель статьи – В статье приведены результаты анализа принципов построения и функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Рассмотрим принципы построения и функциональные возможности экспертных систем для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования на примере наиболее распространенных ЭС.

Экспертная система «Диагностика +» («Д+»), Россия. Изначально была предназначена для автоматизированного ведения паспортных данных и данных испытаний электрооборудования, а также проведения диагностических экспертиз по результатам испытаний с выдачей оценки состояния этого оборудования и рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации [3, 4]. Система, как правило, работает с базой данных (БД) в локальной сети предприятия в режиме клиент-сервер.

Подсистема мониторинга функционирует как единая иерархическая (состоящая из верхнего, среднего и нижнего уровней), распределенная система, работающая в темпе протекания технологического процесса, оснащенная средствами сбора, обработки, отображения, регистрации, анализа, хранения и передачи информации. Информационный обмен в системе построен на технологии OPC (OLE for Process Control) предназначенной для обеспечения универсального механизма обмена данными между датчиками, исполнительными механизмами, контроллерами и системами представления технологической информации, оперативного диспетчерского управления, а также системами управления базами данных. Система состоит из трех звеньев: сервер БД - сервер приложений - клиенты. Такая схема позволяет выполнять всю прикладную логику на сервере и значительно разгрузить сеть.

В качестве сервера БД обе системы используют СУБД FireBird (клон известной СУБД Interbase). Это позволяет системам беспрепятственно исполь-

зовать данные друг друга. На рис. 1 показаны основные компоненты программного и информационного обеспечения и потоки данных интегрированной системы «Д+». OPC Сервер - коммуникационное программное обеспечение, предназначенное для сбора аналоговых и дискретных данных и управления оборудованием, подключенным к последовательным асинхронным портам ввода/вывода (СОМ портам) через преобразователи полевой шины и взаимодействия с OPC клиентами. Сервер обеспечивает опрос контроллеров, и передачу пакетов данных серверу мониторинга, по отношению к которому она является клиентом. Клиент обрабатывает полученные данные из OPC сервера, сохраняет их в БД в архиве значений и посылает их всем подключенным АРМам.

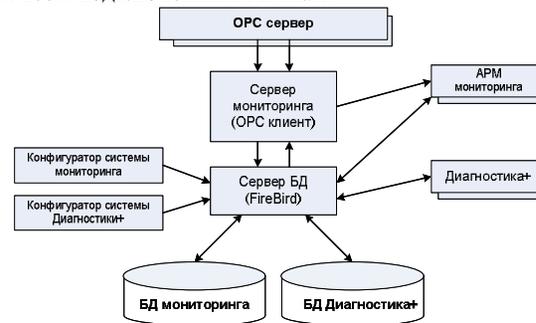


Рис. 1 – Основные компоненты программного и информационного обеспечения и потоки данных системы «Д+»

Кроме того, для каждого параметра имеется специальная процедура, которая анализирует его значение, устанавливает статус значения и генерирует события. Статус значения: нет сигнала – устанавливается, если не было получено очередное значение; норма – не выходит за предельные значения; предупреждение – выходит за граничные значения; тревога – выходит за предельные значения. События также могут быть: простыми; предупредительными; аварийными.

Если значение параметра получает статус предупреждение или тревога, то генерируется соответственно предупредительное или аварийное событие. События сохраняются в БД в журнале событий и посылаются всем подключенным к серверу клиентам. При использовании спецификации OPC появляется возможность доступа к данным и передачи этих данных приложениям-клиентам различного назначения.

На рис. 2 приведена модель информационного взаимодействия компонентов подсистемы. Программа АРМ мониторинга на компьютере диспетчера запускается автоматически при включении компьютера и большей частью находится в режиме ожидания. Если главное окно АРМ открыто, то по мере поступления пакетов, значения параметров для текущего

объекта выводятся в окне. Статус значения определяет цвет фона. Изменяются параметры и на мнемосхеме. Получение нового сообщения выводит окно журнала событий, также возможен поиск по событию и заданному времени. Время квитирования фиксируется только от одного АРМ мониторинга (установленного на компьютере диспетчера). Окно с сообщением закрывается. Если главное окно программы свернуто, то оно распаивается, и автоматически выбирается объект, для которого пришло сообщение. Внизу главного окна АРМ мониторинга имеется окно журнала событий. В ЭС «Д+» предусмотрен просмотр трендов параметров, сохраняемых в архиве, причем в одном наборе могут присутствовать графики параметров одного или разных объектов.

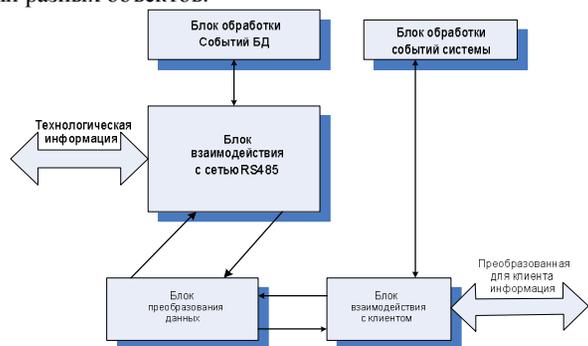


Рис. 2 – Модель информационного взаимодействия компонентов подсистемы

Конфигураторы подсистемы мониторинга и системы «Д+» являются программами настройки режимов работы систем и используются только администратором. Они позволяют изменять значения параметров работы системы, которые хранятся в БД. При перезагрузке сервера происходит автоматическая инициализация процесса, а все его параметры берутся из базы данных.

Основой подсистемы мониторинга является библиотека моделей. Обе системы («Д+» и мониторинга) могут работать автономно, но в комплексе они дополняют друг друга и переходят на более высокий уровень.

Подсистема мониторинга оперативно реагирует на недопустимые изменения значений контролируемых параметров, но получая дополнительные сведения от системы «Диагностика+» сервер мониторинга может более точно вычислять граничные и предельно-допустимые значения, а также, при необходимости, оперативно проводить углубленный анализ состояния объекта и квалифицированно выдавать рекомендации по действиям оперативного персонала.

В настоящее время «Диагностика+» обеспечивает проведение диагностики технического состояния следующего оборудования: силовых

масляных трансформаторов, автотрансформаторов и масляных шунтирующих реакторов, масляных, вакуумных, воздушных и элегазовых выключателей, высоковольтных вводов, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, вентильных разрядников и ограничителей перенапряжения, асинхронных двигателей.

«Диагностика+» обеспечивает:

1. ведение паспортных данных и данных испытаний;
2. ведение данных о ремонтах;
3. фиксацию в БД внешних воздействий на оборудование;
4. проведение диагностических экспертиз с выдачей по их результатам протоколов;
5. планирование и контроль за проведением регламентных работ.

В протоколах в заключении о состоянии электротехнического оборудования указывается: «Пригодно», «Пригодно с учащенным контролем отдельных параметров», «Планировать вывод в ремонт», «Непригодно». При отступлении значений измеренных параметров от норм выдаются рекомендации по доведению оборудования до норм или о необходимости его замены.

Все диагностические правила соответствуют стандартам и нормативам, принятым в отрасли. Данные замеров и испытаний заносятся пользователем в компьютерные таблицы или в специальные компьютерные формы. По этим данным испытаний проводятся экспертизы, а по их результатам генерируются протоколы испытаний.

Каждому виду испытаний соответствует своя экспертиза и еще по одной для каждого вида комплексных испытаний. Комплексное испытание охватывает ряд отдельных испытаний, и поэтому во время оценки состояния оборудования учитываются результаты всех проведенных измерений.

Экспертная система диагностики маслонаполненного оборудования «ЭДИС Альбатрос», Россия. Разработана Уральским техническим университетом [5, 6]. Система поддерживает принятие решений и обеспечивает выполнение задач различных категорий пользователей, работающих с информацией о состоянии оборудования на всех уровнях. Система может работать как на одном рабочем месте, так и в варианте распределенной базы данных. Блоки экспертно-диагностической системы установлены в районах энергосетей (РЭС), на сетевых предприятиях (ПЭС), в химлаборатории (ХЛ) и в управлении энергосистемы (ЭС). Поток движения информации и ее обработку можно представить в виде трехуровневой схемы (рис. 3). На нижнем, I уровне персонал, проводящий испытания и измерения оборудования, заносит полученные результаты в базу данных (БД), в которой также отражается информация о внешних воздействиях на оборудование (перенапряжениях, перегрузках и т.д.) и эксплуатационных мероприятиях (доливки масла, замена узлов оборудования и т.д.). Задача системы – проверить входную информацию

на достоверность, сделать необходимые расчеты (например, по температуре), выдать по требованию паспорт оборудования, карточки его испытаний и измерений ("историю болезни"), списки установленного оборудования.

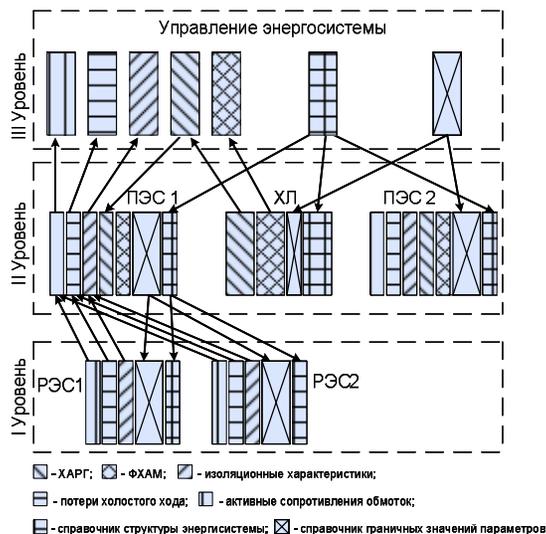


Рис. 3 – Схема движения потоков информации в экспертной системе диагностики маслонаполненного оборудования "Альбатрос"

В химической лаборатории проводятся хроматографический анализ, растворенных в масле газов (ХАРГ) и полный физико-химический анализ масла (ФХАМ). Результаты этих измерений инженер-химик заносит в БД диагностической системы. На основании этих данных система осуществляет верификацию и интерпретацию, выдает вид дефекта, степень его развития. Инженер-химик, оценив выводы, сделанные системой, фиксирует свое заключение в БД. Результаты ХАРГ и ФХАМ вместе с заключением инженера-химика транслируются в центральную БД энергосистемы и БД соответствующих сетевых предприятий. Информация с персональных компьютеров (ПК) РЭС по линиям связи поступает в ПК сетевого предприятия (на II уровень).

На втором уровне с системой работают инженер по диагностике и начальник службы изоляции (или аналогичной по функциям службы). Проводится необходимая обработка данных измерений: сравнение с результатами испытаний на заводе или при монтаже оборудования с данными предыдущих измерений параметров и соотношений между ними; отслеживается динамика изменений параметров и соотношений между

ними. Полученные параметры, описывающие состояние объекта, поступают в базу знаний, где сравниваются с нормативными значениями. Если значение какого-либо параметра вышло за пределы допустимого диапазона (тестирование не пройдено), то осуществляется более глубокая диагностика. В результате выдается вид дефекта, степень его развития, рекомендации персоналу по дальнейшим действиям и, если нужно, необходимый набор дополнительных измерений с указанием сроков проведения. Инженер по диагностике может просмотреть результаты расчета параметров и объяснение постановки диагноза. Анализ информации ведется как в текстовом, так и в графическом виде.

В задачи системы входит составление графиков проведения плановых испытаний и измерений для оборудования в нормальном рабочем состоянии и экстренных измерений для оборудования, находящегося на контроле. Инженер по диагностике при необходимости корректирует график, выданный системой.

ЭС «Альбатрос» имеет средства, поясняющие принятые решения – база фактических случаев из опыта эксплуатации, что позволяет использовать систему в качестве репетитора для повышения квалификации персонала. Начальник службы получает от системы сверху планов-графиков измерений с фактически выполненными испытаниями и измерениями, мониторинг проведения других эксплуатационных мероприятий, список оборудования, находящегося на контроле. На основании этих документов испытателям выдается задание на выполнение работ и проводится согласование профилактических и других эксплуатационных мероприятий с заинтересованными службами (диспетчерской, автотранспортной, производственно-технической). При внештатных ситуациях начальник службы на основании результатов обработки и анализа информации о рассматриваемом объекте, проведенном диагностической системой, готовит решение о дальнейшей его эксплуатации, согласовывая свои действия с руководством. В сложных ситуациях инженер по диагностике или начальник службы сетевого предприятия обращается к специалистам управления.

Информация об оборудовании (данные измерений и паспортные характеристики) из БД сетевых предприятий дублируется в БД управления энергосистемы (на III уровень). Специалист по диагностике и начальник службы изоляции (или аналогичной по функциям) энергосистемы принимают решения о дальнейшей эксплуатации оборудования, находящегося в ведении управления, и в сложных ситуациях – на сетевых предприятиях. Для поддержки принятия решений диагностическая система предоставляет те же возможности, что и на уровне сетевого предприятия.

На III уровне проводится общий по энергосистеме анализ брака и отказов оборудования, осуществляется сравнительный анализ служб изоляции предприятий. По результатам анализа руководство энергосистемы

может корректировать кадровую политику, уточнять целевое распределение материальных ресурсов и проведение организационных мероприятий.

Для опытных специалистов по диагностике (экспертов) система предоставляет возможность на основе статистики измерений за ряд лет рассчитать граничные (нормативные) значения параметров. На основании этих расчетов эксперт может изменить в диагностической системе значения зоны риска и предельно допустимые значения по всем контролируемым параметрам, формируя тем самым политику диагностики.

Так как с системой работают несколько категорий пользователей, то должна быть четко продумана технология работы с информацией. Непротиворечивость и целостность данных обеспечивается единой кодировкой справочников по структуре энергосистемы, формирующих адрес оборудования, а также сервисных справочников, выражающих политику эксплуатации и диагностики. Справочная информация редко обновляется, формируемая на уровне управления энергосистемы, дублируется на второй и третий уровни, в основном, без права редактирования. Для трансляции информации между уровнями можно делать выборки по виду измерения, типу оборудования, месту установки и времени проведения измерения. При слиянии поступившей информации с центральной БД системы (после транспортирования между уровнями в обоих направлениях) происходит проверка информации на непротиворечивость с учетом приоритета достоверности, оценивается полнота внесенной информации в конкурирующих записях, исключается тавтология записей.

База знаний системы содержит блоки диагностики по ХАРГ, ФХАМ, диэлектрическим характеристикам твердой изоляции, потерям опыта холостого хода, сопротивлению обмоток на постоянном токе.

Результаты распознавания состояния объекта на основе различных видов измерений (в том числе и разными методами диагностики) поступают в модуль общей интерпретации базы знаний, который выдает заключение о состоянии диагностируемого оборудования.

Для ранней диагностики и в трудно распознаваемых случаях производится диагностика по результатам ХАРГ методами графической интерпретации: выдаются графики, отражающие количественное содержание газов и соотношения между газами в масле, которые сравниваются с графическими образами типичных дефектов, выбирается наиболее похожий. Такой метод диагностики более 20 лет применяется в Японии. В экспертной системе метод модифицирован: в диаграммы добавлены два газа: СО и СО₂, диаграммы типичных дефектов изменены с учетом отечественного опыта диагностики. Дополнительно используется метод распознавания состояния объекта с помощью треугольника Дюваля (Канада), в котором распознается шесть дефектов по трем газам: С₂Н₄, СН₄, С₂Н₂.

В основу базы знаний легли отечественные и зарубежные публикации по диагностике оборудования, многолетний опыт работы специали-

стов-экспертов ряда энергосистем (в первую очередь ОАО Свердловэнерго), научно-исследовательские работы, и нормативные документы.

Для более точной и дифференцированной диагностики проведены работы по определению граничных значений концентраций газов по трансформаторам с разделением по классу напряжения и типу защиты масла, по вводам с разделением по классу напряжения и марке масла, по трансформаторам тока и напряжения с разделением по классу напряжения и типу конструкции.

В 1998 г. специалисты ОАО Свердловэнерго протестировали с помощью системы выводов из эксплуатации 21 силового трансформатора и последующее вскрытие. Достоверность выдаваемых диагнозов по результатам тестирования составила 96 %.

«ИС диагностики состояния ЭО», Украина. Разработана на базе Web технологий и предназначена для паспортизации оборудования и оценки его технического состояния [7]. С 1999 г. специалистами ЭТЛ-СЕРВИС ведется работа над созданием баз данных по электрооборудованию - Web приложения выполненного по технологии «клиент-сервер», которую можно представить так:

1. Клиент формирует и посылает запрос к базе данных (БД) сервера, вернее – к программе, обрабатывающей запросы.

2. Эта программа производит манипуляции с БД, хранящейся на сервере, в соответствии с запросом, формирует результат и передает её клиенту.

3. Клиент получает результат, отображает его на дисплее и ждет дальнейших действий пользователя. Данный цикл повторяется, пока пользователь не закончит работу с сервером.

Одним из преимуществ этой технологии для внедрения её предприятиями является то, что программа (сервер) установлена на одном достаточно мощном компьютере (например Celeron 2000 MHz 256 Mb) выполняет все запросы пользователей, то есть нет необходимости установки каких-то специальных программ на рабочих местах, достаточно MS Internet Explorer. Доступ к данным возможен с каждого компьютера служб диагностики магистральных электросетей (МЭС) при условии подключения их к вычислительной сети предприятия (подключение может осуществляться и через модем). Права, возможности просмотра и изменения данных определяются паролем, который устанавливается центральной службой диагностики. Каждый пользователь заходит под своим паролем и имеет доступ только к тем записям, которые определяются правилами безопасности. Например, возможность вносить данные только по оборудованию своей сети (МЭС), определенный срок для уточнения внесенных данных – до 2-х дней, т.е. полный доступ (включая паспортные данные) возможен только под паролем администратора, что уменьшает возможность ошибки при внесении и исправлении данных. Для

удобства контроля над внесёнными пользователями данными существует возможность просмотра новых записей в базе данных по всем видам испытаний, одновременно проверяя дату и причину следующего контроля.

С помощью «ИС диагностики состояния ЭО» проводится диагностика технического состояния следующего оборудования: силовых масляных трансформаторов, автотрансформаторов и масляных шунтирующих реакторов 35-750 кВ, высоковольтных вводов 150-330 кВ, трансформаторов тока 330-750 кВ, трансформаторов напряжения 150-330 кВ. Как правило, решение о состоянии оборудования принимается на основе норм и требований регламентированных в руководящих документах. Но есть и некоторые особенности. Так при **диагностике силовых трансформаторов** для каждого типа трансформатора в программе реализованы свои схемы измерения контролируемых величин. Пользователь заполняет формы уже с определенными схемами измерений, что вносит однотипность и улучшает пригодность результатов для дальнейшего анализа. Принято считать, что комплексная диагностика всегда начинается с данных хроматографического анализа т.к. это испытание проводится наиболее регулярно и наиболее «чутко» позволяет следить за процессами, происходящими в маслонаполненном оборудовании. Хотелось отметить реализацию графического метода диагностики, где вид развивающегося дефекта ориентировочно определяется путём сравнения 2-х графиков - первый построен по относительным концентрациям известного дефекта и второй по концентрациям диагностируемого оборудования. При диагностике трансформаторов тока (ТТ) применяются два основных вида контроля состояния изоляции ТТ, эффективность которых подтверждена теоретически и многолетним опытом применения. Это измерение $tg\delta_1$ основной изоляции ТТ под рабочим напряжением и измерение $tg\delta_1$ от передвижной ЭТЛ-300 при 50, 105 и 210 кВ (контроль зависимости $tg\delta_1$ изоляции от напряжения). Существующий нормированный в эксплуатации объём испытаний практически (в частности измерение $tg\delta_1$ изоляции при 10 кВ на отключенном ТТ) не позволяет обнаруживать ни дефекты, приводящие к повреждениям, ни явления аномального старения, в большей степени из-за помех от шин и ЛЭП, находящихся под напряжением 330 кВ. Поэтому проводится измерение $tg\delta_1$ основной изоляции от передвижной ЭТЛ-300. Кроме абсолютной величины $tg\delta_1$, для диагностики используется приращение $\Delta tg\delta_1$ изоляции ТТ при изменении напряжения от 105 до 210 кВ ($\Delta tg\delta_1$ 105-210). При этом дефектными считаются как ТТ, у которых $tg\delta_1$ увеличивается ($\Delta tg\delta_1 > 0,1\%$), так и ТТ с уменьшающимся $tg\delta_1$ при повышении напряжения. Следует заметить, что второй случай может быть более опасным, т.к. в отличие от первого (который говорит об общем ухудшении состояния изоляции) свидетельствует о пробое части изоляционных промежутков (между несколькими обкладками).

Вносимые в систему данные измерений сравниваются с результатами испытаний на заводе или при монтаже, после капитального ремонта оборудования и с данными предыдущих измерений, отслеживается динамика изменений параметров («линия жизни» возможность просмотра результатов испытаний как по всем видам испытаний, так и по выбранному виду) и соотношений между ними (делаются необходимые расчеты по приведению к одной температуре и пр.). В зависимости от результатов проведенного анализа назначается дата следующего испытания или согласно утверждённой периодичности или срок контроля сокращается и оборудование попадает в категорию «учащенного контроля». Использование для диагностики оборудования нескольких видов измерений повышает достоверность диагнозов, т.е. используется многоаспектная диагностика – один диагностируемый объект рассматривается с различных точек зрения, с применением нескольких методов распознавания дефекта используя единую базу данных. Система помогает в оценке степени естественного старения оборудования и отслеживании развивающихся в нём дефектов, помогает определить сроки и виды необходимых измерений и эксплуатационных мероприятий.

Активная разработка экспертных систем проводится и в странах дальнего зарубежья. Так, экспертная система диагностики состояния силовых трансформаторов «ANNERS» явилась результатом пяти лет совместной работы университета в Вирджинии и компании Doble Engineering [8]. Диагноз ставится на основе определения концентраций девяти ключевых газов и их отношений (водорода H_2 , метана CH_4 , этана C_2H_6 , этилена C_2H_4 , ацетилена C_2H_2 , окиси углерода CO , углекислого газа CO_2 , кислорода O_2 и азота N_2). Принятие решения производится с учетом данных о размерах трансформатора, его изготовителе, объеме масла, истории эксплуатации (режимы работы и результаты профилактики). Большая база знаний, необходимая для этого, может управляться вручную. Система выдает пять вариантов диагноза, не считая нормального состояния трансформатора, перегрев масла и целлюлозы, перегрев масла, разряды низкой энергии, разряды высокой энергии или дуга, деградация целлюлозы. Возможно и выявление комбинации нескольких дефектов. Сравнение с постановкой диагноза по методу Роджера показывает, что система «ANNERS» выявила практически все предложенные дефекты, а по Роджерсу достоверно выявилось только 14 % [8, 9]. Экспертная система для интерпретации результатов ХАРГ масла использовалась в энергокомпании American Electric Power, США, еще до 1994 г. Еще раньше институтом IREQ (Канада) была разработана упомянутая выше экспертная система для энергокомпании Hydro Quebec. Этой системой может пользоваться персонал сравнительно невысокой квалификации, осуществляя постановку уверенного диагноза на основе результатов ХАРГ масла.

Анализ функциональных возможностей различных экспертных систем. В таблице 1 представлен сравнительный анализ одиннадцати систем, разработанных до коммерческой стадии, имеющих опыт внедрения, приведенный в [10].

Таблица 1 - ЭС диагностики маслonaполненного оборудования

Название диагностической системы	Информационные объекты					Выполняемые задачи							Стадия разработки и опыт работы		
	Трансформаторы, реакторы	Высоковольтные вводы	Измерительные транс-ры	Выключатели	ОПН, разрядники, кабели	Диагностика	Планирование ТОиР	Интерпретация ХАРГ/Расчет хроматограмм	Анализ повреждаемости	Справочная система	Экономическая оценка, ранжирование	Динамическая система	Коммерческие образцы	Опытные образцы	Начало внедрения
«Диана», Чирков С.А.	+	+	+	+	+	+	+					+		1990	8-10
«ДиаХром-2000/Полихром», МЭИ	+	+				+	+	/+					+	1991	100
«ЭДИС Альбатрос», УГТУ	+	+	+	+		+	+	+/-	+	+		+		1991	200
«Диагностика+», ИГУ	+	+	+	+	+	+	+	+/-			+	+		1992	30
«MultiTest», Владимирэнерго	+	+	+	+	+	+	+					+		1993	30
«Трансформатор/Элхром», ВЭИ	+					+		/+					+	1987	3-6
«Хроматэк лит-тик/Энергетик», ЗАО Хроматэк	+	+				+		/+				+		1995	400
«Диагностика СТ», Донецкая ЭС, Украина	+					+							+	1995	5-10
«ИС диагностики состояния ЭО» ЭТЛ-Сервис, Украина	+	+	+			+	+	+				+		2000	7-9
«АС для оценки тех. состояния ЭО», ДонОГРЭС	+	+	+	+	+	+	+						+	2001	1
«Диагностика СТ», ОАО Транснефтьналадка	+	+				+							+	2002	1-3

Как видно из табл. 1 наибольшим арсеналом выполняемых функций обладают 4 системы: «Диагностика +», «ЭДИС Альбатрос», «ИС диагностики состояния ЭО» и «Диана». Однако, не смотря на достаточно широкий спектр выполняемых функций, следует выделить следующие недостатки анализируемых ЭС:

1. Отсутствие возможности для оценки достоверности результатов испытаний (кроме «ЭДИС Альбатрос»);
2. Отсутствие информации об учете режимов эксплуатации оборудования и их влияния на интенсивность процессов старения изоляции;
3. Отсутствие возможности резервирования базы данных и базы знаний в случае сбоя системы.

В табл. 2 сравниваются аналитические возможности этих 4 ЭС. Как видно из табл. 2 «ЭДИС Альбатрос» выделяется тем, что при решении многих задач используются не только знания открытых информационных источников, но и знания экспертов, и авторские методики.

Таблица 2 - Аналитические возможности ЭС диагностики оборудования

Название диагностической системы	Тип БЗ		Выполняемые задачи													
	Заполненная БЗ	Оболочка БЗ	Диагностика							Планирование ТОиР	Интерпретация данных	Анализ повреждаемости	Экономич. оценка, ранжирование			
			ХАРГ	ФХАМ	Характеристики изоляции	Опыт XX, ВАХ	Измерение Ром. обмоток	Измерение Z кз	Другие виды контроля							
«Диагностика +» ИГУ	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	
«ЭДИС Альбатрос» УГТУ	+	-	+, #, *	+, #	+, #	+, #	+, #	+, #	+, #	+	+	+	+, *	+, *	+, #, *	+, *
«Диана» автор Чирков С.А.	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
«ИС диагностики состояния ЭО» ЭТЛ-Сервис	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-

- Формальный подход к анализу параметров
 + - Углубленный подход к анализу параметров, при котором:
 + - используются открытые источники;
 # - используются знания экспертов;
 * -используются авторские методики

Выполненный анализ позволил определить следующие критерии для оценки эффективности ЭС:

- 1) Тип решаемых задач;
- 2) Тип информационных объектов, на которых они специализированы;
- 3) Степени проработки предметной области и обработки информации;
- 4) Время реакции на изменения, происходящие в окружающей среде;
- 5) Достоверность принятых решений;
- 6) Инструментальные средства и стадии разработки;
- 7) Возможность резервирования информации, хранящейся в БД;
- 8) Наличие справочной и обучающей информации.

Выводы.

1. Экспертная система должна строиться в соответствии с структурой и иерархией управления энергокомпанией и иметь четко выделенные уровни. Каждый уровень должен обладать своими функциональными и информационными возможностями, уровнем обобщения, анализа и защищенности информации в соответствии с существующей иерархией организации эксплуатации электрооборудования;

2. Большинство ЭС, как правило, работают с базами данных (БД) в локальной сети предприятия в режиме клиент-сервер.

3. Модель базы знаний должна быть построена в виде иерархической структуры модулей, имитирующих в процессе вывода решения операции логику мышления человека. Модули должны быть специализированы на следующих функциях: построении и трансформации пространств диагностических признаков, распознавании технического состояния и выработке рекомендаций по техническому обслуживанию и ремонту оборудования;

4. На основе сравнительного анализа действующих экспертных систем, разработанных до коммерческой стадии и имеющих опыт внедрения, выделены достоинства и недостатки, а также предложены критерии для оценки эффективности ЭС;

5. Среди рассмотренных 11 экспертных систем, наибольшими преимуществами обладает «ЭДИС Альбатрос».

Список литературы: 1. Алексеев Б.Л. Контроль состояния крупных силовых трансформаторов / Б.Л. Алексеев. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с. 2. Назарычев А.Н. Основные принципы системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования по техническому состоянию // Надежность либерализованных систем энергетики / Под ред. Н.И. Воропая, А.Д. Тевяшева. – Новосибирск : Наука, 2004. – С.173–189. 3. Г.В. Попов Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов / Попов Г.В., Ватлецов А.В., Аль-Хамри С.С. // Электротехника. – 2003. – № 8. – С. – 5–11. 4. Е.Б.Игнатъев

Оценка состояния электрооборудования на основе программного комплекса "Диагностика+" в режиме on-line / Игнатъев Е.Б., Комков Е.Ю., Попов Г.В. // VIII Симпозиум "Электротехника 2010" : Сборник тезисов докладов, доклад 4.13, М.: ВЭИ. – 2005. 5. И.В. Давиденко Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / Давиденко И.В., Голубев В.П., Комаров В.И., Осотов В.Н. // Электрические станции. – 1997. – №6. – С. – 25–27. 6. И.В. Давиденко Система компьютерной диагностики маслонаполненного оборудования в рамках энергосистемы / Давиденко И.В., Голубев В.П., Комаров В.И., Осотов В.Н., Туркевич С.В. // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 52–56. 7. ООО «ЭТЛ-СЕРВИС»: разработка информационных систем – 2000-2006 гг. – Режим доступа: <http://www.etl-service.com.ua/info>. 8. Zhenyuan Wang Diagnostics of transformers with the help of neural networks and expert systems / Zhenyuan Wang, Yilu Liu, Griffin P.J. // IEE Industry Applications Magazine. – 2000. – Vol. 6. – № 2. – P. 50-55. 9. Islam S.M. Application of indistinct logic at statement of the diagnosis to the transformer with defects / Islam S.M., Wu T., Ledwich G // IEEE Trans, on Dielectrics and Electr. Insulation. – 2000. – Vol. 7. – №2. – P. 177–186. 10. Давиденко И.В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования : автореф. дис. доктора техн. наук.– Екатеринбург : 2009. – 45 с.

Поступила в редколлегию 24.12. 2010

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Тверитникова О. Є.</i> Початковий етап становлення електро-технічного факультету харківського технологічного інституту (1921-1930 рр.) (до 90-річчя створення електротехнічного факультету ХТІ).....	3
<i>Батюк И.А., Владимиров Ю.В.</i> Исследование влияния ЭЭРМ на эффективное экономическое регулирование перетоков реактивных мощностей в электрических сетях	8
<i>Бородин Д.В.</i> Автоматизированный контроль качества электроэнергии на промышленных предприятиях	12
<i>Бойко А.М., Безprozванних А.В.,</i> Обгрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем	21
<i>Владимиров Ю.В., Шумилина Ю.В.</i> Исследование влияния высших гармоник на различные типы силовых трансформаторов напряжением 6-10 кВ.....	36
<i>Гончарова Е.Е.</i> Оценка качества работы системы централизованного теплоснабжения	41
<i>Гурин А.Г., Мостовой С.П., Пидашов В.В., Ярмак О.Н.</i> Моделирование процесса формирования направленного излучения электрогидравлических излучателей с глубоких нефтяных скважин.....	51
<i>Зайнова А.А.</i> Мониторинг электрических параметров изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов под рабочим напряжением	61
<i>Задохин А.А., Шумилов Ю.Н., Шумилов М.Ю., Таран В.Н.</i> Нелинейные ограничители перенапряжений 220...400 кВ модульного исполнения	69
<i>Кизилов В.У., Лазуренко А.П., Рудевич Н.В.</i> Повышение точности оперативных измерений параметров переменного тока	73
<i>Ким Ен Дар, Таран В.Н.</i> Обоснование оптимального браковочного уровня $\text{tg} \delta$ для тарельчатых фарфоровых изоляторов	77
<i>Костюков И.А.</i> Перспективы применения суперконденсаторов.....	83
<i>Мирошник А.А.</i> Методические подходы к исследованию несимметрии в сетях 0,38 кВ	90
<i>Москвитин Е.С.</i> Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по изменению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков.....	95
<i>Немировский И.А., Юрин Н.Ю.</i> Методы утилизации твердых бытовых отходов и оценка потенциала их использования.....	107
<i>Сапрыка А.В.</i> Исследование технических и эксплуатационных характеристик энергосберегающих ламп «REVOLUM».....	114
<i>Сиротин Ю.А.</i> Пульсации и осцилляции мощности при сбалансированной нагрузке.....	120

<i>Шевченко С.Ю., Окунь А.А.</i> Моделирование электрического поля стеклянного изолятора в ВЛ 110 кВ.....	136
<i>Шумилов Ю.Н., Шумилов М.Ю.</i> Способы предотвращения хрупкого разрушения стеклопластиковых стержней в полимерных изоляторах в сильном электрическом поле	144
<i>Щебенюк Л.А., Антонець С.Ю.</i> До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією	152
<i>Щебенюк Л.А., Кириленко В.М., Голик О.В.</i> До аналізу втрат в напівпровідних екранах високовольтних кабелів із зшитю поліетиленовою ізоляцією.....	158
<i>Шумилов Ю.Н., Шумилов М.Ю.</i> Индикатор пробоя высоковольтных полимерных изоляторов	164
<i>Шумилов Ю.Н., Шумилов М.Ю.</i> Повышение влагоразрядных свойств и электрической прочности высоковольтных полимерных изоляторов ...	172
<i>Шутенко О.В., Баклай Д.В.</i> Анализ функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования.....	179

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Тематичний випуск
«Енергетика: надійність та енергоефективність»

Збірник наукових праць
№ 3 2011

Науковий редактор
А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.

Технічний редактор
Н.В. Себякіна, І.С. Варшамова

Відповідальний за випуск
канд. техн. наук І.Б. Обухова

Обл. вид. № 21-11

Підп. до друку 17.02. 2011 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.10. Наклад 300 прим. 1-й з-д
1-60. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
