

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ХПИ»

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

45 2010

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. Епифанов, 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
политике 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» - №1. - 2010. -182 с.

Випуск присвячений 125-річчю Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» і приурочений до 80- річчя заснування електроенергетичного факультету. 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.

Випуск посвящен 125-летию Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» и приурочен к 80- летию основания электроэнергетического факультета. 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 № 9 від 13.11. 2010 р.

© Національний технічний університет «ХПИ», 2010

Ю.А. АНТОНЕЦЬ, канд. техн. наук., ЗАТ Завод «Південкабель», Харків
А.Г. ГУРИН, д-р.техн.наук., проф., НТУ «ХП»
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, асс., НТУ «ХП»

СУЦІЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТІ ЕМАЛЬІЗОЛЯЦІЇ ПРИ ВИПРОБУВАННІ ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ НА ПРОХІД

Выполнен анализ результатов контроля процесса изготовления эмальпровода при высоких скоростях работы современного оборудования, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг количества слабых мест в эмальизоляции. Разработан интегральный показатель дефектности изоляции эмальпроводов и методика его определения.

The analysis of datas of monitoring of the technological process is carried out of enamelled wire attached to high work speeds of contemporary equipment, on which a computer number monitoring foreseen of damages of isolating enamel layer. Development of an integrated parameter of presence of defects of isolation of enameled wire and technique of its definition.

Постановка проблеми. Відомо, що (85 – 95) % всіх відмов електричних машин із всипною обмоткою відбуваються через виткові замикання емальізоляції, а пошкодження фазної і пазової ізоляції в двигунах із всипною обмоткою виникають як наслідок виткових замикань і розвиваються із останніх. Тому вимоги до міцності і однорідності емальізоляції є дуже високими. Існує велика кількість традиційних методів випробувань емальдроту, при яких значення параметру, що визначається, співставляють з нормативною межею (наприклад пробивна напруга, механічна міцність, геометричні розміри, термопластичність і т.ін.), але ці методи є руйнівними, а отже випробування є вибірковими, а їх результати не дають інформації про однорідність емальізоляції. Тому поряд з традиційними руйнівними вибірковими випробуваннями на сучасному обладнанні передбачено неперервний комп'ютерний моніторинг наявності слабких місць в емальізоляції шляхом випробувань високою напругою на прохід. При цьому фіксують цілий ряд статистичних показників кількості E слабких місць на одиничній контрольній довжині, зокрема: максимальної E_{max} , середньої $M[E]$, середньоквадратичної $\sigma[E]$, сумарної S кількості слабких місць на всій довжині. Крім того, фіксують приналежність кожної одиничної контрольної довжини до одного з чотирьох груп дефектності. Це зумовлює актуальність аналізу **інформативності стандартних статистичних параметрів дефектності котушки емальпроводу** при випробуваннях високою напругою на прохід і розробки статистичної моделі та відповідного програмного забезпечення, які б дозволили аналізувати та узагальнювати результати моніторинга дефектності емальізоляції у вигляді інтегрального показника однорідності емальпроводу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш сучасну статистичну шкалу рівня однорідності для різних виробників масової продукції пропонує так звана концепція “Шість 6σ ” [1,2], сігм” (“в якій критерієм досягнутого рівня якості продукції є її однорідність [3]. В концепції “ 6σ ” використовують класичний математичний апарат оцінювання середньоквадратичного відхилення S параметра, що контролюється. В [4,5,6] запропоновано використання величини максимальної ймовірності виходу контрольованого параметра за нормативну межу як уніфікованого показника стабільності технологічного процесу. Проблема полягає в тому, що кількість слабких місць (далі – «дефектів») в емальізоляції, яку фіксують при випробуваннях високою напругою за неперервного руху ізолюваного проводу через електроди, є **величиною суто умовною**. Ця кількість визначається і параметрами випробувань (випробувальна напруга і критичний струм через ізоляцію регулюють в широких межах), і швидкістю руху проводу через електроди[4], і властивостями самої емаль ізоляції, яка швидко розвивається, та досягнутого рівня її однорідності.

Ціль, задачі дослідження. Розробка відносного показника дефектності для одиниці продукції (наприклад для котушки емальдроту) і методу настройки випробувань на прохід залежно від досягнутого рівня однорідності емальізоляції конкретної технологічної системи, а саме для двохшарової емальізоляції на основі поліамідних співполімерів з температурним індексом 200°C при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід, придатну для аналізу результатів випробувань на сучасних швидкісних [(100-600) м/хв] емальагрегатах.

Основний матеріал дослідження.

Основні традиційні вимірювані показники, за якими виконано аналіз стабільності технологічного процесу: діаметр провідника dp і емальдроту di (рис.1), напруга пробою U (мінімальна і середня), механічна міцність емалі N (мінімальна і середня), відносне видовження дроту при розриві \square .

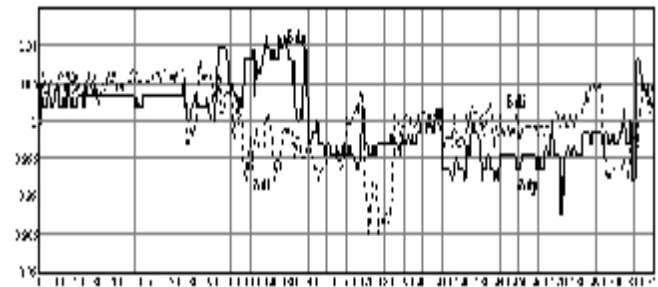


Рис. 1 – Результати вимірювань діаметру провідника dp і емальдроту di (відносні величини), напруги пробою U для 320 котушок дроту ПЭЭИДХ2-200 діаметром 0,630 мм в порядку їх виготовлення

Висновки цього аналізу наступні: за умови відповідності всіх характеристик дроту технічним вимогам, на механічну міцність емалі N (мінімальну і середню) найбільший вплив зумовлює нестабільність діаметра мідного провідника dp ; збільшення dp зумовлює нерівномірність шару емалі і, як наслідок, збільшення середньоквадратичного відхилення механічної міцності емалі $\sigma[Nmm]$; чим більше відносне видовження дроту при розриві δ , тим вища механічна міцність, але одночасно більше її розсіяння.

В цілому одержані дані свідчать, що пріоритетною задачею технологічного контролю виготовлення дроту ПЭЭИДХ2-200 є забезпечення стабільності характеристик мідного провідника.

У двошаровій ізоляції емальдроту, яка складається з шарів з різними діелектричними властивостями, окрім типових видів поляризації при випробуваннях постійною високою напругою на прохід, виникає міграційна поляризація, яка супроводжується накопиченням об'ємних зарядів в ізоляції, що суттєво впливає на розподіл електричного поля в ізоляції. Розподіл поля встановлюється відповідно діелектричних проникностей шарів ізоляції: $e_1 E_1(0) = e_2 E_2(0)$. З часом виникає накопичування зарядів на межі розділу шарів та встановлюється стаціонарний стан. Тривалість цих переходних процесів визначає час релаксації t . Для двошарової поліімідної ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0.10 мм до 0.63 мм, де питомі провідності шарів мають різні значення, та товщина шарів теж різна, час релаксації досягає кількох секунд. Тому, кількість слабких місць, які фіксуються при випробуваннях високою напругою на прохід (при швидкостях емалювання більше 100 м/хв.) не тільки відображає наявність механічних неоднорідностей в ізоляції, але й прямо пов'язана з електричними властивостями двошарової емальізоляції[9].

Результати дослідження електричної і механічної міцності емальдроту співставлені з результатами методу неруйнівних випробувань високою напругою на прохід (рис. 2). В цих випробуваннях фіксують кількість дефектів на 100 м дроту. Дефектом вважається те місце емальізоляції, в якому зафіксовано струм через ізоляцію, який перевищує критичний. В даному експерименті критичний струм дорівнював 10 мкА.

Кількість дефектів n_j на на 100 м дроту, зафіксованих в результаті випробувань на прохід, за стандартною статистичною процедурою є підставою для віднесення цих 100 м до однієї з чотирьох груп дефектності: $n_1 \in [0;3]$, $n_2 \in [4;9]$, $n_3 \in [10;18]$, $n_4 \in [19;E_{max}]$.

Залежність струму через ізоляцію від часу дії напруги зумовлює збільшення похибки при вимірюванні кількості дефектів при збільшенні швидкості V . Для залежності на рис. 3: похибка $\pm 2\%$ є випадковою похибкою використаної системи вимірювання; систематична похибка від мінус 1% до мінус 8% лінійно зростає із зростанням швидкості; якщо попередня зарядка недостатня, то систематична похибка збільшується втричі: до мінус 30% за 1000 м/х

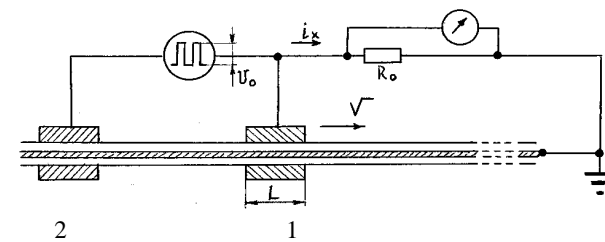


Рис. 2 – Схема розташування електродів 1 довжиною L , на який подана постійна напруга U_0 , через який рухається із швидкістю V емальдріт з заземленою жилою; паралельно до електродів L підключено зарядний електрод 2 для компенсації струму абсорбції через двошарову емальізоляцію

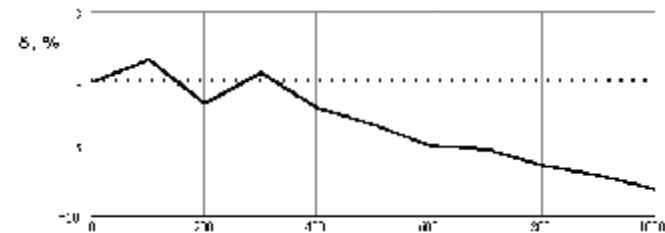


Рис. 3 – Залежність відхилення виміряної кількості дефектів від швидкості виробництва за умови попередньої зарядки емалі ізоляції, коли довжини електродів 1 і 2 однакові

За результатами дослідження електрофізичних характеристик двошарової ізоляції на основі поліімідних співполімерів для емальдроту марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК, зокрема часу релаксації, струму діелектричної абсорбції та розподілу напруженості електричного поля, запропоновано збільшення часу попередньої зарядки ізоляції шляхом збільшення діаметра зарядного роликівого електроду[9].

Комплекс неруйнівних випробувань в режимі он-лайн для контролю однорідності емальдроту потребує настройки при його виготовленні. Запропонований і перевірений в умовах виробництва експериментальний критерій вибору параметрів (випробувальної напруги і критичного струму), за яких фіксується дефект, що полягає у регулюванні параметрів безпосередньо в процесі виготовлення так, щоб були зафіксовані щонайменше перші три групи дефектності.

Якщо ця умова виконана, то можливе дослідження функції розподілу кількості дефектів по групам дефектності при випробуваннях на прохід $F(E)$. Результати експериментального дослідження цього розподілу для ПЭЭИДХ2-

200-МЭК представлені на рис. 4 у вигляді емпіричних функцій $F^*(E)_i$ для окремих катушок за номером i у процесі їх виготовлення.

Емпірична функція $F^*(E)_i$ розподілу кількості дефектів на окремій катушці i визначена за результатами випробувань напругою на прохід:

$$F^* \left(\sum E_j \right)_i = P^* \left\{ E_i \left(\sum E_j \right)_i = \frac{\sum_{k=1}^j nk_i}{\sum_{k=1}^4 nk_i} \right\}, \quad (1)$$

де $\sum E_j$ – сумарна кількість дефектів для всіх груп від першої до $j \in [1; 4]$.

Емпіричні функції розподілу функції $F^*(E)$ для різних катушок описані експоненційним законом, оскільки в відповідних лінійних координатах експериментальні точки розташовані на прямих для всіх катушок. Емпірична оцінка сумарного експоненційного множника S_i для кожної катушки № i визначена як сума оцінок в чотирьох групах S_j :

$$S_i = \sum_{k=1}^4 \frac{-\ln(1 - F(E_{j_i}))}{E_{j_i} + 1} \quad (2)$$

де $F(E_{j_i})_i$ - емпірична функція розподілу сумарної кількості дефектів для групи j контрольних довжин відповідної дефектності, $j \in [1; 4]$.

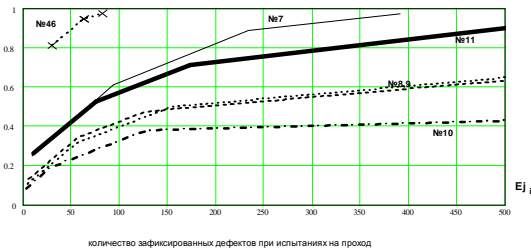


Рис. 4 – Емпіричні функції розподілу $F^*(E)$

Визначення і порівняння параметрів відповідних розподілів для окремих катушок дозволило запропонувати в якості показника дефектності катушки емальдроту емпіричний показник дефектності D_i .

Експоненційний емпіричний показник дефектності D_i визначений за результатами випробувань всього проводу на катушці як ймовірність того, що дефектів на катушці більше, ніж максимальне задане значення E_{max} :

$$D_i = \exp\left[-\left(\frac{S_i}{4}\right)E_{max}\right], \quad (3)$$

де E_{max} – максимальна кількість дефектів на катушці, яка є технологічною межею, що може бути вибрана залежно від досягнутого рівня однорідності.

Емпіричний показник дефектності D враховує кількість всіх груп дефектності на катушці (див. рис. 5), отже є показником однорідності емальзіоляції.

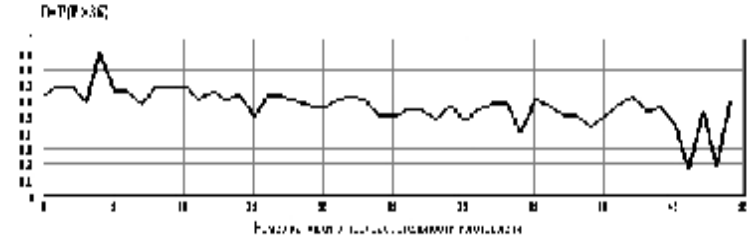


Рис. 5 – Результати контролю дефектності катушок емальдроту за емпіричним показником дефектності D при використанні контрольної границі: не більше 36 дефектів на катушці

Висновки. 1. Запропоновано інтегральний показник дефектності катушки емаль проводу, оснований на експериментально визначеному експоненційному законі розподілу кількості дефектів емаль ізоляції, який дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань високою напругою на прохід на сучасних швидкісних [(100-600) м/хв] емальагрегатах.

2. Обґрунтовано теоретично і перевірено експериментально необхідність удосконалення попередньої поляризації ізоляції емальдроту, що дозволяє в 2 – 3 рази зменшити похибку при визначенні кількості дефектів емальізоляції у неруйнівних поточних випробуваннях високою напругою на прохід.

Список літератури: 1. Harrold Dave Designing for Six Sigma Capability / Dave Harrold // Control Engineering. – 1999. - P.62-70. 2. Адлер Ю.П. «Шість сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. Методы менеджмента качества / Ю.П.Адлер, В.Л. Шнер. - 2000. - С. 15 – 23. 3. Walton M. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming / M. Walton: NY 10016, Copyright 1986. - p.262. 4. Золотарьов В.М., Науменко О.А. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід // КарпушенкоВ.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. - Харків: Регіон-Інформ, 2000.- С. 270 – 289. 5.Щебенюк Л.А. Контрольна карта – інструмент якості кабельної продукції // КарпушенкоВ.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. - Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 6. Методика построения контрольной карты вероятности выхода признака за нормативный предел // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Выпуск 127. - С. 35-38. 7. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели / В.П.Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с. 8. Пешков И.Б. Обмоточные провода: учебное пособие для вузов / И.Б.Пешков. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с. 9. Гурин А.Г., Голик О.В. Патент на корисну модель №49286.- опубл. Бюл.№8. – 26.04.2010.

Надійшла в редколегію 03.09.2010

Д.Н. БАКЛАЙ, ассистент, НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статті пропонується структура експертних систем і методологія етапів розробки експертних систем. Приведені класи задач в енергетиці, для яких можливо використовувати ці системи. Наведені висновки про упровадження експертних систем в наукову роботу.

The article proposed structure and methodology of expert systems expert systems development phases. Cited class of problems in energy which can be used for these systems. Cited conclusions on the implementation of expert systems in scientific work.

Постановка задачи. Зарубежный опыт эксплуатации высоковольтного маслонаполненного оборудования свидетельствует о широком использовании систем искусственного интеллекта для оценки состояния оборудования. Использование таких систем позволяет значительно повысить эксплуатационную надежность оборудования за счет повышения достоверности принятия решений. В настоящее время за рубежом разработаны и эксплуатируются большое количество информационно-диагностических комплексов, которые позволяют выполнять контроль и диагностику оборудования, как по результатам периодических испытаний, так и под рабочим напряжением без вывода оборудования из эксплуатации, что способствует своевременному обнаружению быстро развивающихся дефектов.

Цель статьи. Данная статья посвящена описанию назначения и структуры экспертных систем.

Анализ публикаций. Экспертные системы - это программы для компьютеров, аккумулирующие знания специалистов - экспертов в конкретных предметных областях, которые предназначены для получения приемлемых решений в процессе обработки информации [1]. Экспертные системы трансформируют опыт экспертов в какой-либо конкретной отрасли знаний в форму эвристических правил и предназначены для консультаций менее квалифицированных специалистов. Известно, что знания существуют в двух видах: коллективный опыт, личный опыт. Если предметная область представлена коллективным опытом, то эта предметная область не нуждается в экспертных системах. Если в предметной области большая часть знаний является личным опытом специалистов высокого уровня и эти знания являются слабоструктурированными, то такая область нуждается в экспертных системах. Современные экспертные системы нашли широкое применение во многих сферах, и энергетика не стала исключением. База знаний является ядром экспертной системы. Переход от данных к знаниям

является следствием развития информационных систем. Для хранения данных применяются базы данных, а для хранения знаний – базы знаний. В базе данных, как правило, хранятся большие массивы данных с относительно небольшой стоимостью, а в базах знаний хранятся небольшие по объему, но дорогие информационные массивы. База знаний – это совокупность знаний, описанных с использованием выбранной формы их представления. Наполнение базы знаний является одной из самых сложных задач, которая связана с выбором знаний их формализацией и интерпретацией.

Структура экспертных систем. Типичная статическая ЭС состоит из следующих основных компонентов (см. рис. 1.): решателя (интерпретатора); базы данных (БД); базы знаний (БЗ); компонентов приобретения знаний; объяснительного компонента; диалогового компонента.

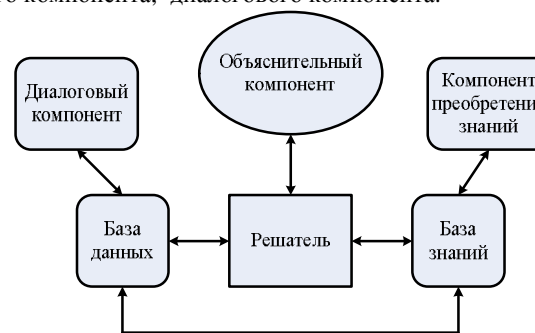


Рис. 1 - Структура статической ЭС

База данных предназначена для хранения исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи. Этот термин совпадает по названию, но не по смыслу с термином, используемым в информационно-поисковых системах (ИПС) и системах управления базами данных (СУБД) для обозначения всех данных (в первую очередь долгосрочных), хранимых в системе. База знаний (БЗ) в ЭС предназначена для хранения долгосрочных данных, описывающих рассматриваемую область (а не текущих данных), и правил, описывающих целесообразные преобразования данных этой области. Решатель, используя исходные данные из рабочей памяти и знания из БЗ, формирует такую последовательность правил, которые, будучи применены к исходным данным, приводят к решению задачи. Компонент приобретения знаний автоматизирует процесс наполнения ЭС знаниями, осуществляемый пользователем-экспертом. Объяснительный компонент объясняет, как система получила решение задачи (или почему она не получила решение) и какие знания она при этом использовала, что облегчает эксперту тестирование системы и повышает доверие пользователя к полученному результату. Диалоговый компонент ориентирован на организацию визуального общения с пользователем как в ходе решения

задач, так и в процессе приобретения знаний и объяснения результатов работы. В разработке ЭС участвуют представители следующих специальностей: эксперт в проблемной области, задачи которой будет решать ЭС; инженер по знаниям - специалист по разработке ЭС (используемые им технологию, методы называют технологией (методами) инженерии знаний); программист по разработке инструментальных средств (ИС), предназначенных для ускорения разработки ЭС. Необходимо отметить, что отсутствие среди участников разработки инженеров по знаниям (т. е. их замена программистами) либо приводит к неудаче процесс создания ЭС, либо значительно удлинит его. Эксперт определяет знания (данные и правила), характеризующие проблемную область, обеспечивает полноту и правильность введенных в ЭС знаний. Инженер по знаниям помогает эксперту выявить и структурировать знания, необходимые для работы ЭС; осуществляет выбор того ИС, которое наиболее подходит для данной проблемной области, и определяет способ представления знаний в этом ИС; выделяет и программирует (традиционными средствами) стандартные функции (типичные для данной проблемной области), которые будут использоваться в правилах, вводимых экспертом. Программист разрабатывает ИС, содержащее все основные компоненты ЭС, и осуществляет его сопряжение с той средой, в которой оно будет использовано. Экспертная система работает в двух режимах: режиме приобретения знаний и в режиме решения задачи (называемом также режимом консультации или режимом использования ЭС). В режиме приобретения знаний общение с ЭС осуществляет (через посредничество инженера по знаниям) эксперт. В этом режиме эксперт, используя компонент приобретения знаний, наполняет систему знаниями, которые позволяют ЭС в режиме решения самостоятельно (без эксперта) решать задачи из проблемной области. Эксперт описывает проблемную область в виде совокупности данных и правил. Данные определяют объекты, их характеристики и значения, существующие в области экспертизы. Правила определяют способы манипулирования с данными, характерные для рассматриваемой области. Приобретения знаний в традиционном подходе к разработке программ соответствуют этапам алгоритмизации, программирования и отладки, выполняемые программистом. Таким образом, в отличие от традиционного подхода в случае ЭС разработку программ осуществляет не программист, а эксперт (с помощью ЭС), не владеющий программированием. В режиме консультации общение с ЭС осуществляет конечный пользователь, которого интересует результат и (или) способ его получения. Необходимо отметить, что в зависимости от назначения ЭС пользователь может не быть специалистом в данной проблемной области (в этом случае он обращается к ЭС за результатом, не умея получить его сам), или быть специалистом (в этом случае пользователь может сам получить результат, но он обращается к ЭС с целью либо ускорить процесс получения результата, либо возложить на ЭС

рутинную работу). В режиме консультации данные о задаче пользователя после обработки их диалоговым компонентом поступают в базу данных. Решатель на основе входных данных из рабочей памяти, общих данных о проблемной области и правил из БЗ формирует решение задачи. ЭС при решении задачи не только исполняет предписанную последовательность операции, но и предварительно формирует ее. Если реакция системы не понятна пользователю, то он может потребовать объяснения. Структуру, приведенную на рис. 1, называют структурой статической ЭС. ЭС данного типа используются в тех приложениях, где можно не учитывать изменения окружающего мира, происходящие за время решения задачи. Более сложными и полными ЭС с точки зрения определяемых решений являются динамические ЭС. В архитектуру динамической ЭС по сравнению со статической ЭС вводятся два компонента: подсистема моделирования внешнего мира и подсистема связи с внешним окружением. Последняя осуществляет связи с внешним миром через систему датчиков и контроллеров. Кроме того, традиционные компоненты статической ЭС (база знаний и машина вывода) претерпевают существенные изменения, чтобы отразить временную логику происходящих в реальном мире событий.

Этапы разработки экспертных систем. Разработка ЭС имеет существенные отличия от разработки обычного программного продукта. Опыт создания ЭС показывает, что использование при их разработке методологии, принятой в традиционном программировании, либо чрезмерно затягивает процесс создания ЭС, либо вообще приводит к отрицательному результату. Чтобы разработка ЭС была возможной для данного приложения, необходимо одновременное выполнение по крайней мере следующих требований:

- 1) существуют эксперты в данной области, которые решают задачу значительно лучше, чем начинающие специалисты;
- 2) эксперты сходятся в оценке предлагаемого решения, иначе нельзя будет оценить качество разработанной ЭС;
- 3) эксперты способны выразить на простом языке и объяснить используемые ими методы, в противном случае трудно рассчитывать на то, что знания экспертов будут "извлечены" и вложены в ЭС;
- 4) решение задачи требует только рассуждений, а не действий;
- 5) задача не должна быть слишком трудной (т.е. ее решение должно занимать у эксперта несколько часов или дней, а не недель);
- 6) задача хотя и не должна быть выражена в формальном виде, но все же должна относиться к достаточно "понятной" и структурированной области, т.е. должны быть выделены основные понятия, отношения и известные (хотя бы эксперту) способы получения решения задачи;
- 7) решение задачи не должно в значительной степени использовать "здоровый смысл" (т.е. широкий спектр общих сведений о мире и о способе его функционирования, которые знает и умеет использовать любой нормальный

человек), так как подобные знания пока не удается (в достаточном количестве) вложить в системы искусственного интеллекта.

Приложение соответствует методам ЭС, если решаемая задача обладает совокупностью следующих характеристик:

1) задача может быть естественным образом решена посредством манипуляции с символами (т.е. с помощью символических рассуждений), а не манипуляций с числами, как принято в математических методах и в традиционном программировании;

2) задача должна иметь эвристическую, а не алгоритмическую природу, т.е. ее решение должно требовать применения эвристических правил. Задачи, которые могут быть гарантированно решены (с соблюдением заданных ограничений) с помощью некоторых формальных процедур, не подходят для применения ЭС;

3) задача должна быть достаточно сложна, чтобы оправдать затраты на разработку ЭС. Однако она не должна быть чрезмерно сложной (решение занимает у эксперта часы, а не недели), чтобы ЭС могла ее решать;

4) задача должна быть достаточно узкой, чтобы решаться методами ЭС, и практически значимой.

При разработке ЭС, как правило, используется концепция "быстрого прототипа". Суть этой концепции состоит в том, что разработчики не пытаются сразу построить конечный продукт. На начальном этапе они создают прототип (прототипы) ЭС. Прототипы должны удовлетворять двум противоречивым требованиям: с одной стороны, они должны решать типичные задачи конкретного приложения, а с другой - время и трудоемкость их разработки должны быть весьма незначительны, чтобы можно было максимально запараллелить процесс накопления и отладки знаний (осуществляемый экспертом) с процессом выбора (разработки) программных средств (осуществляемый инженером по знаниям и программистом). Для удовлетворения указанным требованиям, как правило, при создании прототипа используются разнообразные средства, ускоряющие процесс проектирования. Прототип должен продемонстрировать пригодность методов инженерии знаний для данного приложения. В случае успеха эксперт с помощью инженера по знаниям расширяет знания прототипа о проблемной области. При неудаче может потребоваться разработка нового прототипа или разработчики могут прийти к выводу о непригодности методов ЭС для данного приложения. По мере увеличения знаний прототип может достигнуть такого состояния, когда он успешно решает все задачи данного приложения. Преобразование прототипа ЭС в конечный продукт обычно приводит к перепрограммированию ЭС на языках низкого уровня, обеспечивающих как увеличение быстродействия ЭС, так и уменьшение требуемой памяти. Трудоемкость и время создания ЭС в значительной степени зависят от типа используемого инструментария. В ходе работ по созданию ЭС сложилась определенная технология их разработки, включающая шесть следующих

этапов (см. рис. 2): идентификацию, концептуализацию, формализацию, выполнение, тестирование, опытную эксплуатацию.

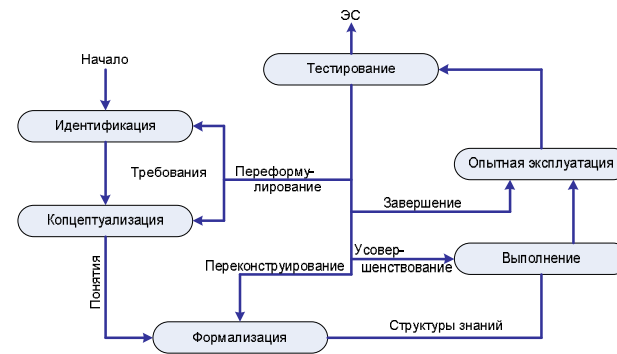


Рис. 2 - Технология разработки ЭС

На этапе идентификации определяются задачи, которые подлежат решению, выявляются цели разработки, определяются эксперты и типы пользователей. На этапе концептуализации проводится содержательный анализ проблемной области, выявляются используемые понятия и их взаимосвязи, определяются методы решения задач. На этапе формализации выбираются ИС и определяются способы представления всех видов знаний, формализуются основные понятия, определяются способы интерпретации знаний, моделируется работа системы, оценивается адекватность целям системы зафиксированных понятий, методов решений, средств представления и манипулирования знаниями. На этапе выполнения осуществляется наполнение экспертом базы знаний. В связи с тем, что основой ЭС являются знания, данный этап является наиболее важным и наиболее трудоемким этапом разработки ЭС. Процесс приобретения знаний разделяют на извлечение знаний из эксперта, организацию знаний, обеспечивающую эффективную работу системы, и представление знаний в виде, понятном ЭС. Процесс приобретения знаний осуществляется инженером по знаниям на основе анализа деятельности эксперта по решению реальных задач. Основное предназначение программных продуктов на платформе экспертных систем - помочь предприятиям сохранять и использовать знания и опыт их наиболее талантливых и квалифицированных сотрудников в интеллектуальных системах реального времени, повышающих качество продукции, надежность и безопасность производства и снижающих производственные издержки.

Анализ инструментальных средств для создания ЭС . В настоящее время в области инженерии знаний, целью которой является исследование и разработка прикладных программных систем, основанных на знаниях и

моделирующих работу экспертов в трудно формализуемых предметных областях, существует множество методологий и инструментальных средств, ориентированных, в первую очередь, на повторное использование методов решения задач, где под повторным использованием понимается использование ранее разработанных методов решения задач. На основе этих методологий разработаны такие инструментальные средства как G2, Common, KDAS, Exsys CORVID[3]. Классы задач, для которых предназначены экспертные системы охватывают широкий круг потребностей пользователь: мониторинг в реальном масштабе времени; системы управления верхнего уровня; системы обнаружения неисправностей; диагностика; составление расписаний; планирование; оптимизация; системы советчики оператора; системы проектирования.

Имеющиеся в моем распоряжении данные, полученные на личном опыте, свидетельствуют, что, как правило, овладение типовыми инструментальными средствами проектирования экспертных систем не сложнее, чем овладение новым языком программирования необходимым для создания соевой экспертной оболочки. Анализ инструментальной среды Exsys CORVID также показал, что разработчики экспертных средств позаботились о качественных мультязычных пособиях позволяющих в сжатые сроки овладеть навыками создания ЭС. Основным спорным вопросом является финансовая сторона, так как нужно сопоставить стоимость готовой экспертной системы и затраты на создание собственного узконаправленного программного обеспечения.

Выводы. Основным достоинством оболочки экспертных систем является возможность применять ее как интегрирующий компонент, позволяющий за счет открытости интерфейсов и поддержки широкого спектра вычислительных платформ легко объединить уже существующие, разрозненные средства автоматизации в единую комплексную систему диагностики, позволяющую принимать сложные решения, работать без вмешательства пользователя или давать рекомендации, предупреждать повреждения и составлять прогнозы о состоянии оборудования.

Список литературы: 1. Питер Джексон Введение в экспертные системы / Джексон Питер. - П. - 2001. - 12 с. 2. Статические и динамические экспертные системы / Э. В. Попов, И. Б. Фоминых, Е. В. Кисель и др. - П. - 1996. - 7-15с. 3. Муромцев Д. И. Оболочка экспертных систем EXSYS CORVID: методическое пособие / Д. И. Муромцев. - 2006. - 69с.



Бакла́й Дми́трий Николаевич закончил электроэнергетический факультет Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» в 2010г. по специальности «Электрические системы и сети». В настоящее время работает ассистентом кафедры «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ».

УДК 621.315

А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ, д-р. техн. наук., доц., НТУ «ХПИ»

ДИНАМИКА ЧАСТОТНО - ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ТЕЛЕФОННЫХ КАБЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Виконані вимірювання показують, що в більшій мірі спостерігається дрейф тангенса кута діелектричних втрат зразків кабелів, як без заповнення, так і із заповненням сердцевини гідрофобними матеріалами. При цьому для часткових місткостей властива позитивна кореляція, а для tgδ не спостерігається взаємозв'язок між результатами вимірювань. Це може бути пов'язано з особливостями коротких зразків телефонних кабелів пучкового скручування.

The executed measurement show that in the greater measure drift of a tangent of a corner of dielectric losses of samples of cables, both without filling, and with filling with waterproof materials is observed. Thus for partial capacities positive correlation is inherent, and for dielectric losses there is no correlation between results of measurements It can be connected to features of a short samples of telephone cables.

Существующие конструкции кабелей имеют в сердечнике значительный свободный объём. При определённых условиях в процессе изготовления кабелей, строительства и эксплуатации линий в этом объёме может накапливаться и распространяться проникающая в кабель влага и её пары. Возможны два пути проникновения влаги внутрь кабеля:

1. диффузия паров влаги через пластмассовую оболочку из окружающей среды;
2. повреждение оболочки кабеля либо муфты, а также отсутствие герметизации концов кабеля в оконечных устройствах.

Влага, попадающая в кабель в местах повреждения, распространяется в сердечник на значительные расстояния и может снизить сопротивление изоляции или вызвать короткое замыкание между жилами. Кроме этого увеличивается рабочая ёмкость цепи и, следовательно, ухудшаются параметры передачи и влияния между цепями. Для многопарных телефонных кабелей, имеющих большой свободный объём и, как правило, тонкую изоляцию жил, изменение электрических характеристик из-за проникновения влаги в сердечник может быть весьма значительным: электрическая ёмкость пар увеличивается на 20 %, коэффициент затухания на 5 % в диапазоне звуковых частот [1-3].

В настоящее время принято считать, что наиболее простым и эффективным решением проблемы продольной влагозащиты кабелей является заполнение сердечника гидрофобными пастообразными компаундами на основе высокомолекулярных соединений углеводородов. Эти вещества обладают водоотталкивающими (гидрофобными) свойствами.

Благодаря пластичности таких заполнителей введение их в сердечник осуществляется как на технологической стадии скрутки кабельного сердечника, так и в эксплуатации (так называемая технология «реанимации (восстановления) замочших кабелей»). Гидрофобный заполнитель по электрическим и диэлектрическим параметрам должен полностью соответствовать полимерным материалам, применяемым при производстве кабелей. Кроме того, заполнитель должен обладать необходимой текучестью; не изменять физико-механических свойств в зависимости от прикладываемого к кабелю давления; не вытекать из кабеля в диапазоне рабочих температур; обладать адгезией к полиэтилену и препятствовать продольному распространению влаги в кабеле; не быть токсичным и взрывоопасным; не содержать летучих фракций, образующих на медных жилах в местах сращивания в муфтах пленки, увеличивающих их контактное сопротивление. Комплекс физико-химических и электрических характеристик должен обеспечивать полную герметизацию сердечника и совместимость с элементами конструкции кабеля (таблица 1- 2).

Таблица 1- Основные технические характеристики высококачественных гидрофобных заполнителей Neptel фирмы BPLC (Франция)

Параметр	Марка гидрофобного заполнителя			
	827	867	851	842
Температура каплепадения, °С	70	90	90	80
Вязкость при 120 °С, сСт	75 - 100	100 – 150	75 – 90	175 - 225
tgδ, % при 23 °С	0,01	0,01	0,01	0,01
ε	2,3	2,3	2,3	2,3

Цель статьи - динамика частотно-временных характеристик изоляционных промежутков незаполненных и заполненных гидрофобным желе образцов телефонных кабелей по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

«Заметить» влагу и ее пары внутри сердечника кабеля можно по результатам измерений ряда электрических параметров: сопротивления изоляции, емкости. Измерение сопротивления изоляции выполняют на постоянном токе, время приложения напряжения составляет не менее 1 минуты. Величина испытательного напряжения в зависимости от конструкции, назначения кабеля и его длины может достигать 5 кВ (таблица 3). При этом методика измерений предполагает, что измеряется сопротивление каждой жилы относительно всех остальных, соединённых с металлическими экраном, оболочками и заземлёнными. Так как в качестве электрической изоляции в кабелях применяется полиэтилен – высококачественный изоляционный материал, то заметить изменение в

сопротивлении изоляции в области нормальных температур достаточно сложно, особенно на коротких образцах. Поэтому измерения необходимо проводить также и при повышенных температурах. Это усложняет процедуру измерений, т.к. требуется применение термошкафа с соответствующей системой контроля над температурой, в частности термодары.

Таблица 2 - Электрические параметры незаполненных и заполненных гидрофобным желе телефонных кабелей типа ТПП при t =20 °С

Характеристика	Частота, кГц	Норма
Электрическое сопротивление токопроводящих жил на 1 км, Ом, диаметр, мм: 0,4 0,5 0,7	Постоянный ток	139 ± 9 90 ± 6 45 ± 3
Электрическое сопротивление изоляции жил на 1 км (не менее), Мом -кабель без гидрофобного заполнения -кабель с гидрофобным заполнением		6000 5000
Рабочая ёмкость на 1км (не более), нФ: -кабель без гидрофобного заполнения -кабель с гидрофобным заполнением	0,8	45 ± 5 50 ± 5
Испытательное напряжение (в течение 2 мин), В между: жилами рабочих пар жилами и экраном	0,5	1000 500

Таблица 3 - Параметры тераомметров

Тип прибора	Диапазон измерения сопротивления, Ом	Погрешность измерений, %	Напряжение при измерениях, В
ЕК6-11	3 10 ⁷ - 10 ¹⁵	6 – 10	2,5 – 500
ЕК6-7	10 ⁷ - 10 ¹⁷	4 – 10	1 – 1000

Появление нового поколения цифровых приборов дает возможность проведения диэлектрической спектроскопии на переменном напряжении разной частоты. Уровни измерительного напряжения не превышают 10 В, что является безопасным, как для обслуживающего персонала, так и для изоляции (таблица 3). При этом длина образцов кабелей может составлять от

1 до сотен метров. При проведении измерений на работающих линиях их необходимо отключать во избежание повреждения прибора (см. таблицу 4).

Таблица 4 - Технические характеристики измерителей сопротивления, индуктивности и емкости RLC фирмы *Wayne Kerr Electronics*

Характеристики	Параметры	Значения
Измерение RLC	Сопротивление	0,1 МОм – 100 МОм
	Ёмкость	0,001 пФ – 1Ф
	Индуктивность	0,1 нГн – 100 кГн
	Добротность	0,01 – 1000
	Тангенс угла потерь	0,00001 – 1000
	Комплексное сопротивление	0,01 мОм – 1 ГОм
	Фазовый сдвиг	-179...180
	Базовая погрешность измерения	± 0,2%
Тест- сигнал	Частота тест сигнала	20 Гц – 100 кГц для 4234 20 Гц – 200 кГц для 4235 20 Гц – 500 кГц для 4236 20 Гц – 1 МГц для 4237
	Разрядность установки	5 разрядов
	Уровень тест сигнала	10 мВ – 2 В (шаг 10 мВ), 20 мА – 100мА
	Погрешность уровня	± (2% +5 мВ)

Диэлектрическая спектроскопия поперечной структуры кабелей проводится путем измерения частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь всех изоляционных промежутков на разных частотах. В кабеле, состоящем из n полюсов (токопроводящих жил, металлических экранов и оболочек), образуется N изоляционных промежутков (частичных емкостей):

$$N = n \cdot (n - 1) / 2. \quad (1)$$

Для нахождения параметров всех N промежутков можно использовать прямые либо совокупные измерения [4].

Прямые методы измерений параметров частичных емкостей реализуются с помощью приборов, имеющих три клеммы: две из них используются для подключения к интересующей емкости между двумя элементами конструкции (изоляционному промежутку); третья, экранирующая, для отвода мимо измерительной цепи прибора мешающих шунтирующих токов паразитных емкостей.

Совокупные методы измерений выполняются приборами с двумя измерительными клеммами. Экранирующая клемма в этом случае не используется. Общее число вариантов подключений составляет:

$$M = (2^n - 2) / 2. \quad (2)$$

Частичные емкости, подключенные к разным клеммам прибора, оказываются включенными параллельно. Они образуют общую, совокупную, емкость. Результаты измерений отражают совокупные (общие) емкость ($C_{изм}$) и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \square_{изм}$) ряда отдельных частичных емкостей, включенных параллельно. Параметры частичных емкостей (изоляционных промежутков) в этом случае находятся в результате решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Так, при наличии в кабеле 21 полюса число изоляционных промежутков составляет 210, а число вариантов подключения – 1048575. Для нахождения параметров 210 промежутков необходимо провести, как минимум, 210 измерений и решить СЛАУ 210-го порядка [5].

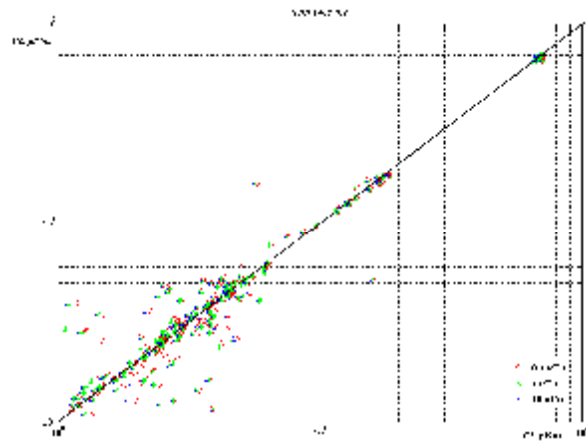
Тестовые образцы - два 10-ти парных образца телефонных кабелей ТПП-10x2-0,4 пучковой скрутки с диаметром токопроводящих жил 0,4 мм идентичной конструкции, предназначенные для реализации технологии «последней мили», с шагами скруток пар 40 - 30 мм. Длина образцов – одинакова, что необходимо для корректного сравнения измеряемых параметров. Сканирование поперечной структуры выполнено прямым методом. В таких образцах кабелей по 20 жил и одному общему экрану, т.е. 210 изоляционных промежутков (частичных емкостей). Измерения выполнены на трех частотах: 0,1; 1 и 10 кГц в разные моменты времени:

I - в неоттапливаемый сезон, глубокой осенью (исходное состояние),

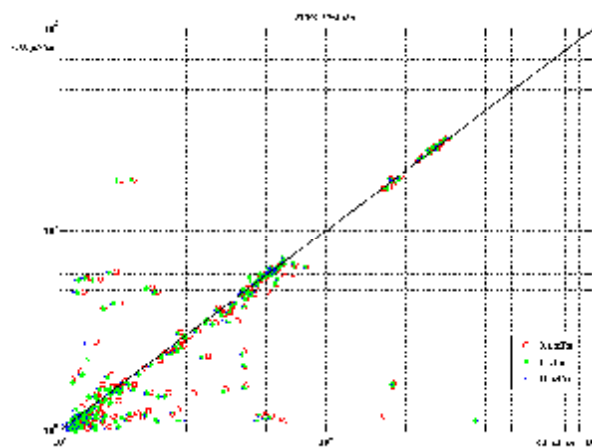
II - в отапливаемый сезон, зимой (образцы «подсохли»),

III – после пребывания в течение 4-х суток во влажной камере со 100% влажностью в отапливаемый сезон, весной (увлажненное состояние).

На рис.1 – 8 представлены результаты диэлектрической спектроскопии параметров изоляционных промежутков незаполненного и заполненного образцов кабеля ТПП-10x2-0,4.



а)



б)

Рис.1 - Корреляционные зависимости между частичными емкостями изоляционных промежутков незаполненного (а) и заполненного (б) образцов кабеля ТПП-10х2-0,4 в исходном состоянии I (по оси абсцисс) и после пребывания в отопляемом помещении (состояние II, по оси ординат) на трех частотах измерения

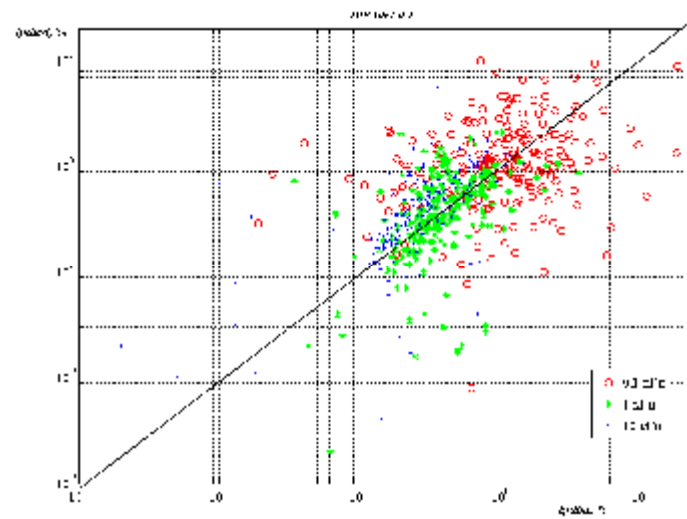


Рис.2 - Динамика изменений $\text{tg}\delta$ относительно сухого состояния II (по оси абсцисс) в процессе увлажнения во влагокамере (состояние III по оси ординат) кабеля ТПП10х2-0,4 без гидрофобного заполнения на трех частотах измерения

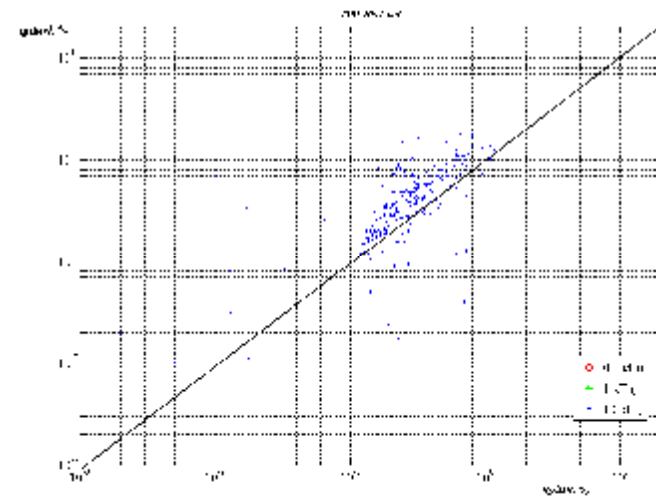


Рис. 3 - То же, что и на рис.1, только для частоты 10 кГц

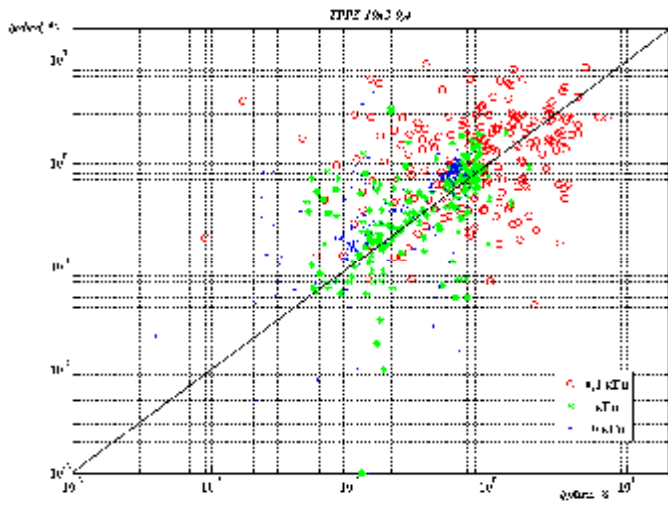


Рис.4 - Динамика изменений $\text{tg}\delta$ относительно сухого состояния II (по оси абсцисс) в процессе увлажнения во влагокамере (состояние III по оси ординат) кабеля ТПП10х2-0,4 с гидрофобным заполнением на трех частотах измерения

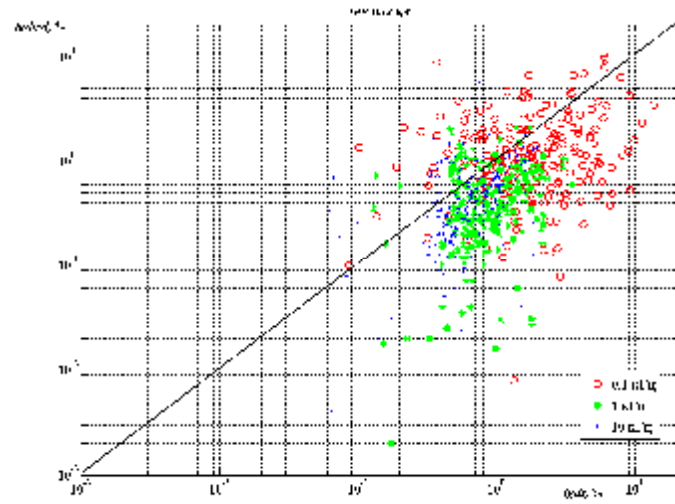


Рис. 6 - Динамика изменений $\text{tg}\delta$ относительно исходного состояния I (по оси абсцисс) в процессе увлажнения во влагокамере (состояние III по оси ординат) кабеля ТПП10х2-0,4 без гидрофобного заполнения на трех частотах измерения

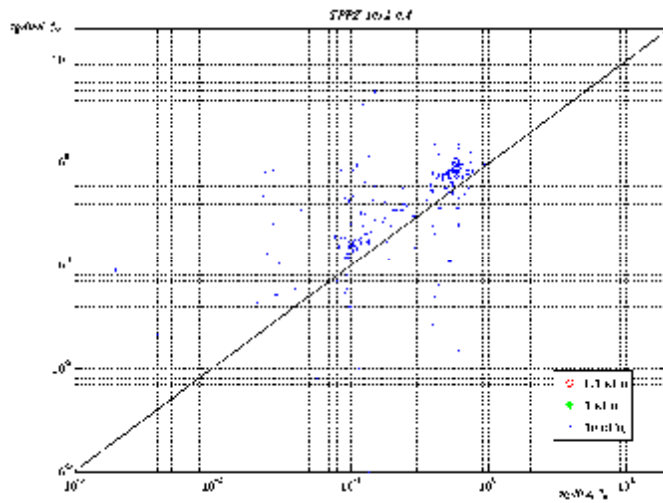


Рис. 5 - То же, что и на рис.3, только для частоты 10 кГц

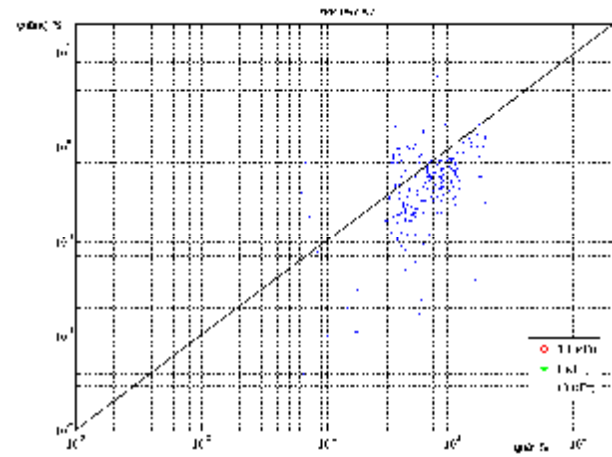


Рис.7 - То же, что и на рис.5, только для частоты 10 кГц

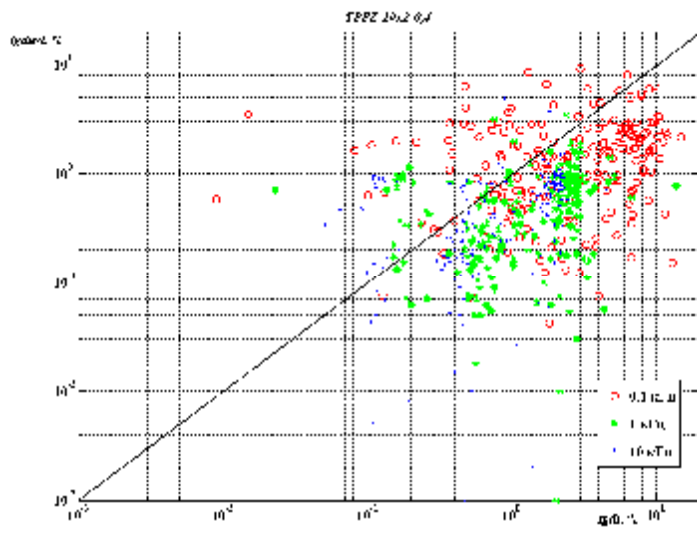


Рис. 8 -Динамика изменений $\text{tg}\delta$ относительно исходного состояния I (по оси абсцисс) в процессе увлажнения во влагокамере (состояние III по оси ординат) кабеля ТПП10x2-0,4 с гидрофобным заполнением на трех частотах измерения

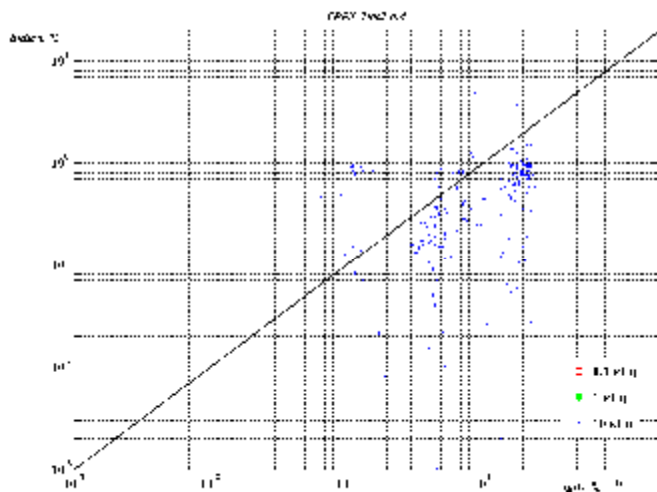


Рис. 9 - То же, что и на рис.7, только для частоты 10 кГц

Таблица 3 - Коэффициенты корреляции незаполненного (в числителе) и заполненного гидрофобом (в знаменателе) образцов кабелей ТПП-10x2-0,4 в разные моменты наблюдений

Коэффициент корреляции r_{ij} на частотах			
Время наблюдений	0,1 кГц	1 кГц	10 кГц
	между частичными емкостями:		
Состояние I – состояние II	0,9515 / 0,9113	0,9517 / 0,8680	0,9501 / 0,8666
Состояние II – состояние III	0,8711 / 0,8981	0,8710 / 0,8979	0,8695 / 0,8978
Состояние I – состояние III	0,8315 / 0,9859	0,8311 / 0,9922	0,8303 / 0,9918
Между тангенсами угла диэлектрических потерь			
Состояние I – состояние II	0,3095 / 0,1421	0,5229 / 0,3450	0,6896 / 0,3087
Состояние II – состояние III	0,2546 / 0,2511	0,3768 / 0,4579	0,4774 / 0,4294
Состояние I – состояние III	0,2585 / 0,2754	0,2064 / 0,2153	0,3385 / 0,1341

Результаты измерений показывают, что параметры частичных емкостей изоляционных промежутков как незаполненных, так и заполненных кабелей при сезонных колебаниях температуры и влажности практически не изменяются (см. рис.1 а и б). При этом наблюдается положительная корреляция между всеми результатами наблюдений на всех трех частотах (см. таблицу 4). Для $\text{tg}\delta$ изоляционных промежутков наблюдается смещение, как в сторону больших (см. рис.2 – 5), так и в сторону меньших (см. рис. 6 – 9) значений относительно линии равной тождественности преимущественно на частоте 10 кГц, как для незаполненного, так и заполненного образцов. Так, дрейф в сторону больших значений (см. рис. 2 - 5) связан с увлажнением «сухих» образцов во влагокамере; в меньшую сторону – нахождение образцов в течение 4-х суток в условиях 100 % влажности не дает такого эффекта увлажнения, как пребывание в неотапливаемом помещении в течение 2-х месяцев в условиях естественной влажности. Образцы в исходном состоянии I увлажнены в большей степени по сравнению с состоянием III.

Положительная корреляция наблюдается только на частоте 10 кГц между исходным состоянием I (нахождение в неотапливаемом помещении) и II (естественная сушка в отапливаемом помещении) для незаполненного кабеля (см. таблицу 3). Отсутствие связи между результатами измерений может быть обусловлено свойствами коротких образцов кабеля с повивной системой скрутки сердечника.

Таблица 4 - Основные технические характеристики водоблокирующих лент GFS FreeSwell фирмы Geca- Topes (Нидерланды)

Параметр	1110	1120	1140
Масса на длину площади, г/мм ²	50	56	87
Толщина, мм	0,17	0,20	0,25
Прочность на разрыв, Н/см	25	25	25
Относительное удлинение, %	11	11	11
Скорость водопоглощения, мг/мин	2,5	4	10
Длительная рабочая температура, °С	90	90	90

Таким образом, наблюдаются сезонные колебания $\text{tg}\delta$, как незаполненных, так и заполненных гидрофобным желе кабелей. Заполнение кабеля гидрофобным желе не исключает проникновение влаги внутрь сердечника. Поэтому в качестве альтернативы можно рассматривать применение «сухих» конструкций кабелей, в которых для защиты от продольного проникновения влаги внутрь сердечника используются водоблокирующие ленты (таблица 4), нити, порошки. Водоблокирующие ленты могут быть использованы в качестве скрепляющей обмотки, роль которой в телефонных кабелях выполняет, как правило, полярная полиэтилентерефталатная лента.

Список литературы: 1. Беспрозванных А.В. Гигроскопическое увлажнение телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой / А.В. Беспрозванных // Электротехника і електромеханіка. - 2005. - №4.- с.40 - 44. 2. Беспрозванных А.В. Проявление общих конструктивных, технологических и эксплуатационных закономерностей поперечной структуры кабелей пучковой скрутки при электрических измерениях / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, О.И. Ляшенко // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». - 2006. - N34. - с.17-27. 3. Беспрозванных А.В. Старение телекоммуникационных кабелей в процессе эксплуатации в условиях повышенной влажности / А.В. Беспрозванных // Вестник НТУ «ХПИ». - 2006. - №28.- С. 3 -6. 4. Набока Б.Г. Методика прямых измерений параметров частичных емкостей многожильных кабелей / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, А.С. Штангей, О.Н. Радченко // Вестник НТУ «ХПИ». - 2005. - №42. -С. 80 – 86. 5. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных // Электротехника і електромеханіка. - 2007. - № 1. - С. 62 – 66.

Надійшла в редакцію 03.09.2010

УДК 621.315

А.В. БЕСПРОЗВАННЫХ, д-р. техн.наук, доц., НТУ «ХПИ»
И.А. МОРОЗОВ, ОАО «Одескабель» (Одесса)

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ ПРИ ЭКСТРУДИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Розглянута принципова схема роботи одночерв'ячних екструдерів, які застосовуються при виробництві кабелів і дротів. Встановлені причини виникнення поверхневих дефектів оболонок кабелів при високих швидкостях накладення полімерів і засоби їх усунення.

The basic circuit of work screw of extruders, cables used in manufacture and wires is considered. The reasons of occurrence of superficial defects of environments of cables are established at high speeds екструдирования polymers and ways of elimination of defects.

Введение. Технология наложения полимерных оболочек и защитных шлангов волоконно-оптических кабелей имеет ряд отличительных особенностей. Это связано с особенностью применяемого основного конструктивного элемента кабеля - оптического волокна. Важно не допустить теплового удара и механических деформаций волокна в технологическом процессе. Для этого наложение оболочки на сердечник кабеля осуществляют с воздушным зазором на экструзионных линиях с диаметром шнека свыше 45 мм. Экструдеры имеют бесступенчатый привод, позволяющий плавно изменять частоту вращения шнека 3 с точностью $\pm 3\%$ от заданной величины. Обогрев цилиндра и головки - электрический с бесступенчатой регулировкой температуры. Интервал установки заданной температуры составляет 1 °С. Радиальная толщина оболочек - от 0,5 до 3,0 мм. Допуск по наружному диаметру составляет $\pm 0,05$ мм = 50мкм. Линейная скорость нанесения оболочек от 3 до 60 м/мин. Причем наблюдается тенденция значительного увеличения линейных скоростей экструдирования до 300 м/мин. При линейных скоростях 50 - 100 м/мин для кабелей диаметром 2 - 10 мм начинают проявляться явления «эластической турбулентности» расплава полимера. Они приводят к появлению на поверхности экструдированной оболочки выраженных дефектов, обусловленных увеличением сечения струи по сравнению с технологическим инструментом в кольцевом зазоре [1 - 2].

Цель статьи - анализ причин возникновения поверхностных дефектов при экструдировании полимерных оболочек кабелей и способы их устранения.

Экструзия термопластичных полимеров. Наложение оболочек осуществляется на червячных прессах путем выдавливания расплава полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии. Этот способ обеспечивает высокую производительность, непрерывность процесса,

дающую возможность выпускать продукцию большими длинами. Наибольшее распространение для переработки полимеров получили одночервячные (одношнековые) экструдеры. Современный экструдер – это машина, обеспечивающая одновременно нагрев полимера за счет работы сил внутреннего трения и гомогенизацию вследствие больших деформаций сдвига, а также создающая гидростатическое давление, необходимое для непрерывного продавливания материала через профилирующий инструмент. Поэтому можно определить современный экструдер, как совершенно свободный от пульсации давления насос, подающий термически однородный расплав с постоянной производительностью и при постоянном давлении

Экструдер (рис.1) состоит из червяка 3, вращающегося внутри цилиндрического корпуса 5. Внутри корпуса запрессовывается гильза с азотированной, закаленной и термообработанной поверхностью. Обогрев корпуса осуществляется нагревателями 6, сгруппированными в несколько, как правило, в четыре, тепловых зон. На конце корпуса устанавливается головка с профилирующим технологическим инструментом 9, соединяющаяся с корпусом экструдера посредством адаптера. Между шнеком и адаптером располагается решетка 14 с пакетом фильтрующих сеток. Корпус устанавливается на станине. Осевое усилие воспринимается блоком упорных подшипников 20, 21. Привод шнека осуществляется от регулируемого электродвигателя посредством редуктора 18 [2].

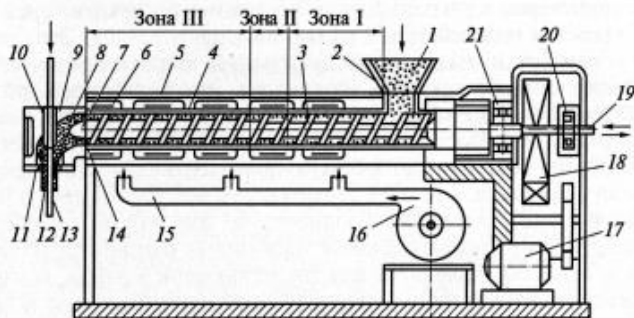


Рис. 1 - Схема одночервячного экструдера: 1- перерабатываемый полимер; 2 – загрузочная воронка экструдера; 3 – червяк; 4 – втулка; 5 – рабочий цилиндр; 6 – нагреватель; 7 – насадка червяка; 8 – расплав полимера; 9 – головка экструдера; 10 – дорн; 11 – матрица; 12 - экструдруемый слой; 13 – элемент конструкции, на который наносится слой полимера; 14 – решетка; 15 – внешнее охлаждение цилиндра; 16 – вентилятор; 17 – электродвигатель; 18 – редуктор; 19 – охлаждающая ванна; 20, 21 - подшипники

Основной рабочий узел экструдера - шнек (3). Он забирает непластифицированный материал от загрузочного отверстия, разогревая и уплотняя его, равномерно подает в виде гомогенного расплава к головке, продвигая по каналам червяка. В свою очередь материал разогревается как за счет тепла, выделяющегося вследствие вязкого трения, так и тепла, подводимого от расположенных на корпусе нагревателей. Вследствие уплотнения, из материала удаляется захваченный вместе с гранулами воздух, и удельный объем композиции уменьшается. Для компенсации уменьшения удельного объема композиции канал червяка выполняют с уменьшающимся объемом витка. Глубина канала червяка на выходе всегда меньше, чем на входе. Сжатие (компрессия) необходима также для более равномерного прогрева расплава.

По характеру процессов, протекающих на каждом участке шнека, его обычно можно разделить на три основные зоны (таблица 1):

I - загрузочная зона – участок, в котором перерабатываемый материал находится в твердом состоянии;

II - зона сжатия – участок, в котором происходит расплавление материала;

III - дозирующая зона – участок, в котором материал находится в вязкотекучем состоянии.

Таблица 1 - Температурные режимы переработки кабельных композиций на основе полиэтилена и ПВХ пластика

Материал экструдруемого полимера	Температура нагрева, °С				
	Зона цилиндра			Головка экструдера	Матрица
	I	II	III		
Полиэтилен низкой плотности: -при радиальной толщине покрытия меньше 0,8 мм - при радиальной толщине покрытия больше 0,8 мм	130 – 150	160 – 180	180 -210	200 – 230	220 -240
	160 - 180	160 - 180	170 - 190	180 - 200	190 - 200
Полиэтилен высокой плотности	200 - 220	230 - 250	240 – 260	250 – 270	260 - 280
ПВХ пластикат	135	145 - 150	150 - 165	165	175

Загрузочная зона. В загрузочную зону гранулированный материал (полимер) попадает обычно при комнатной температуре. Заполнив канал, материал пере-

мещается подобно твердому стержню. По мере продвижения вдоль канала стержень уплотняется и, вследствие существования сил трения, препятствующих его движению, подвергается объемному сжатию. Скорость перемещения пробки гранул в канале шнека зависит от соотношения между коэффициентами трения между гранулами и поверхностями шнека и корпуса. Так, чем меньше коэффициент трения между шнеком и полимером, тем быстрее материал движется по каналу. И наоборот, чем больше коэффициент трения между поверхностью корпуса и полимером, тем выше скорость передвижения полимера. Для уменьшения коэффициента трения поверхность винтового канала тщательно шлифуют и полируют. На внутренней поверхности корпуса делают неглубокие полуцилиндрические продольные пазы.

Особенно большое значение имеет температурный режим переработки полимеров в загрузочной зоне. При температуре 80 – 90 °С коэффициент трения термопластов выше, чем при комнатной температуре, в то время как дальнейшее повышение температуры сопровождается его постепенным уменьшением. Поэтому обычно выбирают температурный режим таким, чтобы температура внутренней стенки корпуса в загрузочной зоне лежала в пределах 80 – 100 °С.

Зона сжатия. В зоне плавления материал переходит из твердого состояния в расплавленное под воздействием тепла, подводимого от стенок корпуса, и тепла, выделяющегося в результате деформации материала. Твердая пробка гранул, двигаясь по винтовому каналу шнека, попадает в участок корпуса, в пределах которого температура внутренней поверхности корпуса выше температуры плавления материала. Контактующая со стенкой поверхности пробка начинает плавиться, и на внутренней стенке корпуса образуется тонкая пленка расплава. В тот момент, когда толщина этой пленки оказывается больше, чем величина радиального зазора между гребнем нарезки шнека и стенкой корпуса, толкающая стенка канала начинает соскребать слой расплава с внутренней стенки корпуса и собирать его в области, непосредственно примыкающей к передней грани толкающей стенки. По мере продвижения пробки гранул ширина области, заполненной расплавом, постепенно увеличивается, а ширина твердой пробки уменьшается. Процесс плавления заканчивается в тот момент, когда пробка совершенно исчезает. Очевидным следствием такого механизма плавления является зависимость зоны сжатия от основных параметров технологического режима: производительности и заданного распределения температур.

Зона дозирования. После окончания плавления винтовой канал шнека оказывается заполненным расплавом полимера [5]. Начиная с этого момента, движение расплава в канале шнека становится подобно движению вязкой жидкости в канале винтового насоса. Фактическое движение расплава в зоне дозирования осуществляется по винтовой траектории (рис.2) [4]. Это движение принято представлять как сумму двух независимых движений.

Первое – поступательное течение, - представляет собой движение расплава вдоль оси винтового канала. Объемный расход этого движения определяет, в конечном счете, объемную производительность экструдера, и, следовательно, ограничивает скорость передвижения пробки гранул в пределах зон питания и плавления.

Второе – циркуляционное течение,- представляет собой круговое движение расплава в направлении, перпендикулярном оси винтового канала. Двигаясь поперек канала, поток встречает стенку канала и поворачивает в обратную сторону. Существование циркуляционного течения обеспечивает гомогенизацию расплава, выравнивает распределение температур и позволяет использовать, при необходимости, экструдер как смеситель.

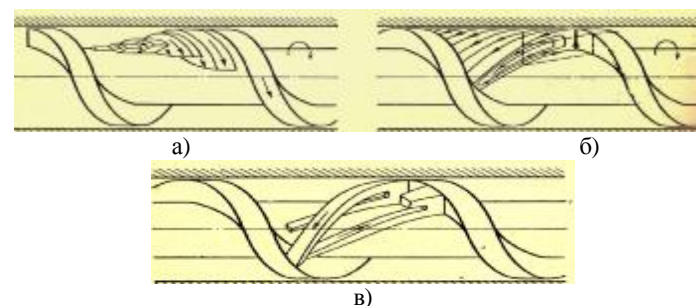


Рис. 2 Схема движения расплава в дозирующей зоне червяка: а – поступательное течение; б – циркуляционное; в – итоговое винтовое движение

Часть материала, подходящего к стенке, не поворачивает обратно, а проходит через кольцевой зазор, существующий между гребнем и стенкой винтового канала и поверхностью корпуса. Это – поток утечки. Производительность дозирующей зоны равна разности между объемным расходом вынужденного потока и расходом утечки.

В начале зоны дозирования температура расплава практически равна температуре плавления. Продвигаясь в зоне дозирования, полимер продолжает разогреваться до температуры экструзии. При этом разогрев происходит как за счет подвода извне, так и за счет тепла, выделяющегося вследствие интенсивной деформации сдвига. Одновременно идет процесс гомогенизации расплава. Происходит окончательное расплавление мелких нерасплавившихся в зоне сжатия включений и выравнивания температурного поля.

Объемный расход материала в любой зоне шнека постоянен. Поскольку для нормальной работы экструдера необходимо, чтобы расплав, поступающий к рабочему инструменту (головке), имел заданную однородную по сечению температуру, время пребывания расплава в зоне

дозирования должно быть достаточным для его прогрева и гомогенизации. Подготовленная масса полимера поступает непосредственно к кольцевому зазору, образованному технологическим инструментом – дорном (10) и матрицей (11).

Поверхностные дефекты оболочки и способы их устранения.

Типичной особенностью истечения расплавов при высокой скорости экструдирования из зазоров, образованных технологическим инструментом, является увеличение сечения струи по сравнению с технологическим инструментом. Такое явление получило название эластическое восстановление струи (рис. 3). Увеличение скорости сдвига сопровождается не только ростом величины

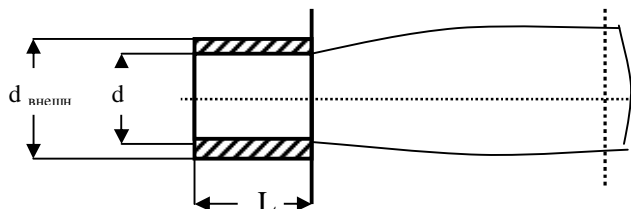


Рис. 3 - Схема развития высокоэластического восстановления после истечения расплава из кольцевого зазора

эластического восстановления. Начиная с определенного значения скорости сдвига, которое называется критическим, струя экструдированного полимера теряет правильную цилиндрическую форму. На ее поверхности появляются вмятины и утолщения. Изменение поверхности полимера, вытекающего из кольцевого зазора технологического инструмента, связывают с началом неустойчивого течения. Для описания этого эффекта в литературе используют различные термины: применительно к слабо выраженным дефектом - «матовость», «акуля кожа», «апельсиновая кожура»; применительно к периодическим дефектам – «поверхность бамбука», «винт»; для очень сильных искажений струи – «разрушение» или «дробление поверхности» расплава. В целом, это явление «эластической турбулентности» или «неустойчивое течение». Оно может проявляться с различной интенсивностью. **Первая** степень интенсивности характеризуется появлением матовой поверхности, вызванной возникновением микрошероховатостей. **Вторая** – мелкие периодические искажения типа винтовой линии или «елочки», образующиеся на поверхности струи. **Третья** – крупномасштаб-

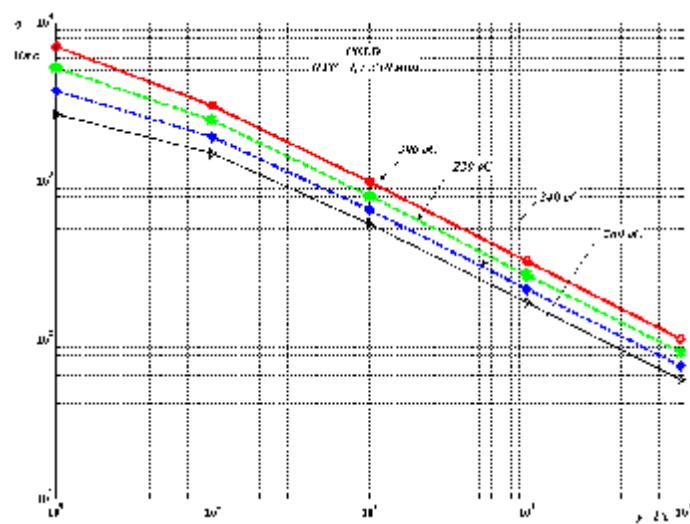


Рис.4 - Влияние скорости сдвига на эффективную вязкость расплава ПЭНП. ПТР 1,7 г / 10мин

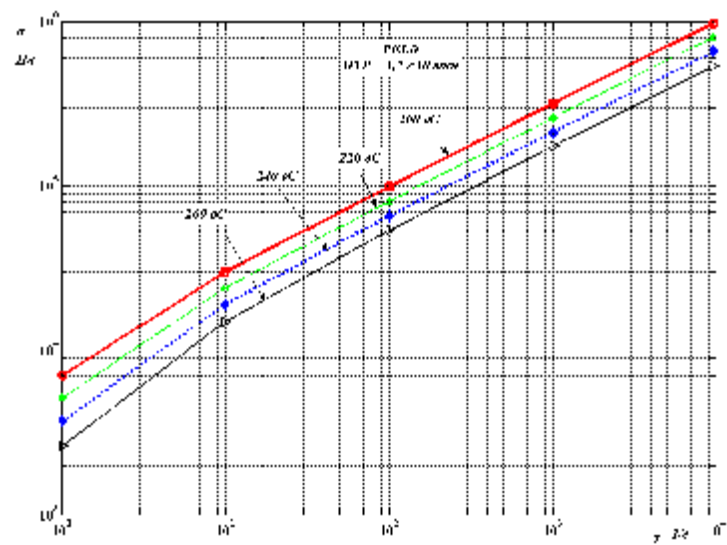


Рис.5 - Влияние скорости сдвига на напряжение сдвига расплава ПЭНП. ПТР 1,7 г / 10 мин

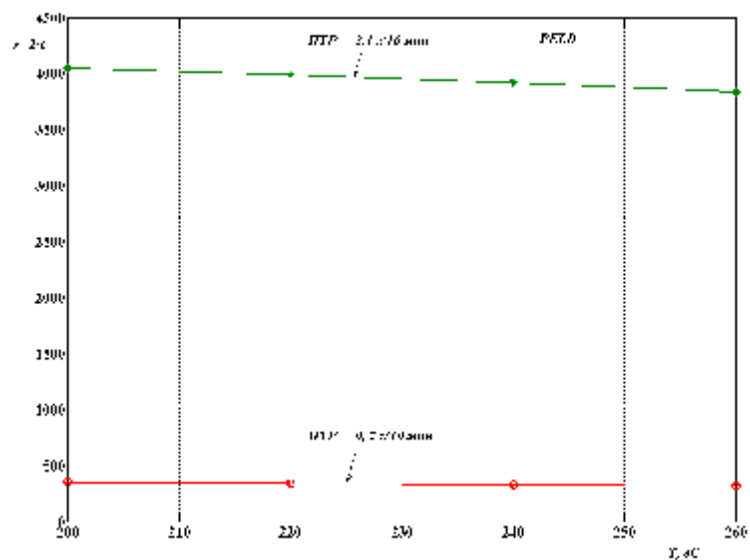


Рис. 6- Влияние температуры в кольцевом зазоре на скорость сдвига на внутренней поверхности зазора

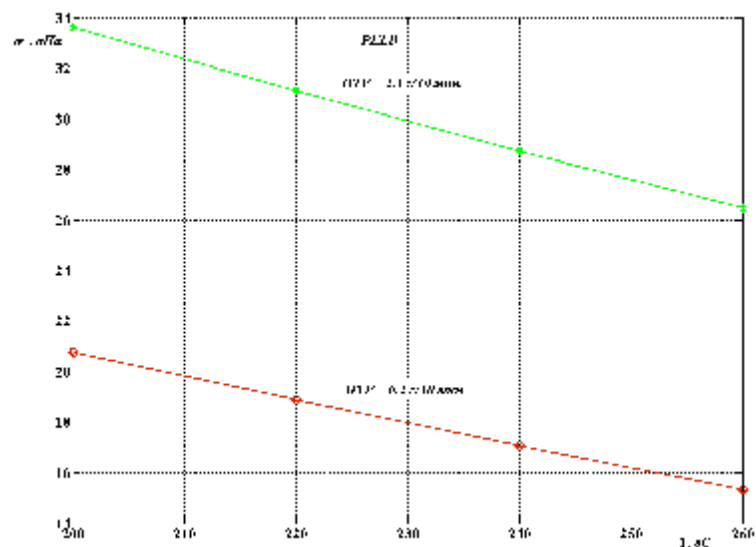


Рис.7 - То же, что и на рис.6, только для напряжения сдвига

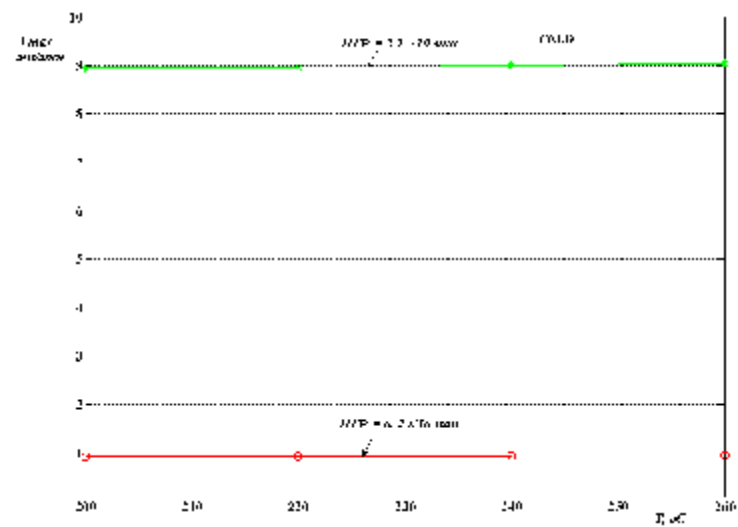


Рис.8 - Влияние температуры в кольцевом зазоре на максимальную скорость течения расплава

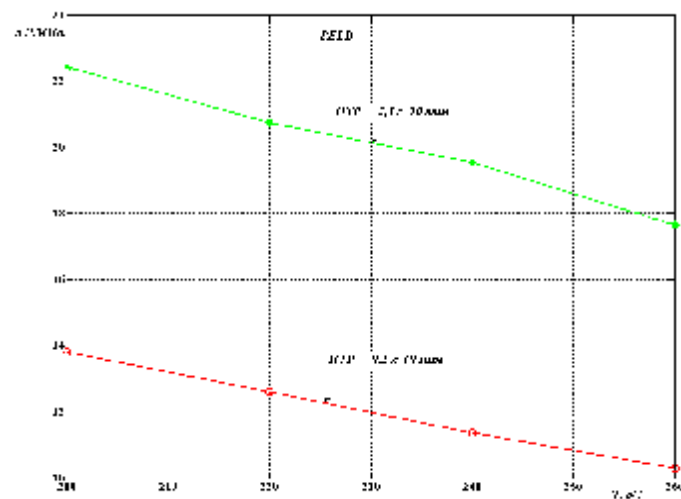


Рис. 9 - Влияние температуры в кольцевом зазоре на рабочее давление. ные периодические искажения; истечение струи при этом сопровождается ее вращением

Четвертая и последняя степень интенсивности – крупномасштабные нерегулярные дефекты; поверхность струи становится рваной, в некоторых случаях разрывы струи сопровождаются резкими хлопками.

В настоящее время принято считать, что неустойчивое течение возникает вследствие развития в потоке больших эластических деформаций. При этом различают два основных механизма возникновения неустойчивого течения: 1. пульсации на входе; 2. ориентация пристенных слоев расплава, вызывающая частичную кристаллизацию (стеклование) и приводящая к возникновению периодического проскальзывания.

Появление поверхностных дефектов является серьезным препятствием для повышения производительности технологического оборудования при экструдировании термопластов. Отодвинуть момент достижения критической скорости сдвига можно путем:

1. Установки конического диффузора на входе в канал. Это позволяет уменьшить абсолютные размеры дефектов и повысить предельное значение напряжения сдвига, при котором качество поверхности остается еще удовлетворительным.

2. Повышения температуры расплава.

На рис. 4 – 9 представлены результаты расчета течения полиэтилена низкой плотности с учетом его реологических неньютоновских свойств в кольцевых зазорах (рис.3): 1. $L = 107$ мм, $d_{\text{внутр}} = 8$ мм и $d_{\text{внешн}} = 8,7$ мм (рис. 4 - 5); 2. $L = 8,8$ мм, $d_{\text{внутр}} = 7$ мм, $d_{\text{внешн}} = 7,05$ мм (рис. 6 - 9). Для ПЭ с показателем текучести расплава (ПТР) 2,1 и 0,2 г / 10 мин увеличение температуры на

30 % в кольцевом зазоре приводит к уменьшению скорости сдвига на внутренней поверхности зазора на 6 – 12 %. Напряжение сдвига уменьшается в большей степени: на 27 – 36 % соответственно. При этом рабочее давление в зазоре также меняется существенно: на 35 – 27 %. Максимальная скорость в обоих случаях меняется незначительно: на 1,4 – 3 %.

Таким образом, повышение температуры в кольцевом зазоре позволяет регулировать момент достижения критической скорости сдвига. Причем, в большей степени для расплавов с меньшими значениями ПТР. При этом уменьшается вероятность образования поверхностных дефектов оболочки.

Список литературы: 1. Привезенцева В. А. Основы кабельной техники: учебное пособие для вузов / под ред. В. А. Привезенцева. - Изд. 2-е перераб. и доп.- М.: «Энергия», 1975. 2. Пешков И.Б. Основы кабельной техники / И.Б.Пешков. - М.: Издательский центр «Академия», 2006.- 426 с. 3. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета).- М.: «Химия», 1972. 4. Иоргачев. Д.В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы. Конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация / Д.В. Иоргачев. – Одесса: «Астропринт».- 2000.-535 с. 5. Беспрозванных А.В. Эффективная вязкость полимерных материалов оптического модуля / А.В.Беспрозванных, И.А. Морозов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. -№ 7. - С. 53-58.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.314

В.Е.БОНДАРЕНКО, д-р. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»
Н.В.АУЛОВА, препод. - стажер, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ В БАКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 330 кВ

Проведено аналіз стану силових високовольтних трансформаторів, розглянуті причини відмов і технологічних порушень високовольтних трансформаторів, проведено аналіз традиційної системи діагностики стану трансформаторного устаткування. Запропоновані основні напрями удосконалення діагностики стану силових високовольтних трансформаторів.

The analysis of a condition of the power high-voltage transformers, the considered causes of failures and technological infringements of high-voltage transformers the carried out analysis of traditional system of diagnostics of a condition of the transformer equipment is carried out. The offered basic directions of improvement of diagnostics of a condition of power high-voltage transformers.

Введение. Высоковольтные силовые трансформаторы являются наиболее ответственными и дорогостоящими элементами в системе распределения электрической энергии. Надежность электрических сетей во многом определяется надежностью работы высоковольтных силовых трансформаторов. Постепенное старение высоковольтного электроэнергетического оборудования происходит во всех промышленно развитых странах. Повышение уровней напряжения и снижение запасов прочности в оборудовании последних поколений остро поставили вопрос оценки его состояния и степени риска за пределами нормированного срока службы [1].

В Украине количество трансформаторов превысивших свой ресурс достигает 40 %, причем для генераторных трансформаторов мощностью более 250 мВА этот показатель еще выше и достигает 70 % [2]. В настоящее время в энергосистеме России около 45 % трансформаторов находятся в эксплуатации более 20 лет, 35 % более – 25 лет [3]. Аналогичная картина старения парка силовых трансформаторов наблюдается и в зарубежных энергосистемах. Так, например, по данным института электроэнергетики США EPRI, в 1997 г. около 65 % силовых трансформаторов в сетях США отработало более 25 лет. В Японии порядка 30 % парка трансформаторов старше 30 лет.

Таким образом, надежность силовых высоковольтных трансформаторов, а как следствие и надежность энергосистемы в целом, будут определяться надежностью трансформаторов с большим сроком службы, который значительно превосходит расчетный.

Продление срока службы высоковольтных силовых трансформаторов до 30 – 40 лет возможно при условии грамотного обслуживания, наблюдения за состоянием и своевременного устранения развивающихся дефектов. Срок службы 40 – 50 лет следует признать критическим, дальнейшая эксплуатация высоковольтных силовых трансформаторов является неоправданным риском [3]. Ежегодная повреждаемость высоковольтных трансформаторов находится в пределах от 0,8 до 8%, а в последние годы количество повреждений трансформаторов возрастает, особенно с длительным сроком службы [4]. Аварии по вине трансформаторов в электрических сетях вызывают 80 – 90 % недоотпуска электроэнергии, а на электростанциях от 10 до 20 % .

Старение парка высоковольтных силовых трансформаторов является острой проблемой для электроэнергетической отрасли большинства промышленно развитых стран. В связи с этим в ближайшее время наиболее актуальными для электроэнергетики в целом будут стоять вопросы надежности, а именно: диагностика и прогнозирование состояния оборудования.

Причины отказов и технологических нарушений высоковольтных силовых трансформаторов. Роль трансформаторных масел в обеспечении эксплуатационной надежности высоковольтных трансформаторов. Основные причины связаны с ухудшением состояния оборудования в процессе длительной эксплуатации. Около 22 % технологических нарушений вызвано старением материалов, 19,4 % – дефектами конструкции и изготовления, 16,8 % – недостатками эксплуатации, 10,3 % – посторонними воздействиями, 5,8 % – нерасчетными режимами в сети, 4,2 % – дефектами ремонта, 3,5 % – климатическими и внешними воздействиями.

Обобщенный анализ этих данных показывает что, наибольшее число технологических нарушений (порядка 36 %) приходится на высоковольтные вводы, на втором месте по повреждаемости находятся обмотки трансформаторов (27 %), и далее достаточно высокий уровень технологических нарушений имеют устройства регулировки под напряжением (РПН), порядка (24 %).

Анализ повреждаемости трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 – 500 кВ, за период 1998 – 2002 гг. показал, что около 30 % общего числа технологических нарушений сопровождаются внутренними короткими замыканиями в трансформаторах, из которых 24 % происходили с возгораниями и пожарами трансформаторов [4]. К таким повреждениям относятся: пробой внутренней изоляции высоковольтных вводов; недостаточная стойкость при коротких замыканиях; износ изоляции обмоток; пробой изоляции обмоток; пробой изоляции отводов, нарушения контактного соединения отвода обмотки, обрыв части проводников гибкой связи, замыкание на ярмовую балку магнитопровода и корпуса бака; повреждение РПН.

Процент технологических нарушений, обусловленных ухудшением свойств трансформаторных масел составляет порядка 20 % от всех технологических нарушений [5]: выделение газов в масло – 9,02 %; старение масла – 7,47 %; загрязнение масла – 2,18 %; окисление масла – 0,62 %.

Однако эта цифра отражает только те нарушения, которые непосредственно обусловлены старением масел. В тоже время влияние продуктов старения масел на состояние основной изоляции при анализе причин повреждений высоковольтных силовых трансформаторов, как правило, не учитывается. Известно [6], что продукты окисления масел гидроперекиси и водорастворимые кислоты снижают степень полимеризации целлюлозы, что приводит к снижению механической прочности бумажной изоляции. Особенное влияние на электрическую прочность изоляции и срок ее службы оказывает содержание в ней влаги. При содержании влаги 3,3 % от массы твердой изоляции, от бумаги начинают отделяться волокна, которые попадают в масло и резко снижают его электрическую прочность [5]. Кроме снижения электрической прочности изоляции при увлажнении, существует опасность выделение влаги в масло при переходных тепловых процессах с образованием пузырьков. Появление пузырьков газа в масле снижает его электрическую прочность на 20 – 50 %. Это может стать причиной снижения электрической прочности конструкции в целом из-за возникновения частичных разрядов в пузырьках газа при перегрузках. Образование пузырьков газа сильно зависит как от содержания влаги, так и от температуры. Начало выделение пузырьков при хорошо высушенной изоляции (0,2 – 0,5 % влаги) соответствует температурам 175 – 200 °С. При заметном увлажнении бумаги температура образования пузырьков снижается: при влагосодержании 2,3 – 2,4 % температура возникновения пузырьков составила 143 – 156 °С, а при влагосодержании 3,1 % эта температура составила всего 100 – 126 °С.

С точки зрения диагностики трансформаторное масло является той информативной средой, по состоянию которой выявляются 70 % дефектов трансформаторов [2]. По результатам хроматографического анализ растворенных в масле газов определяют наличие в трансформаторе процессов ионизационного старения (частичные разряды малой и большой мощностей, искровые и дуговые разряды, дуги, искрения), а также процессы термической деструкции изоляции, вызванные перегревами. Содержание в масле фурановых производных позволяет оценить степень полимеризации целлюлозы. Учитывая недоступность активной части трансформатора в процессе эксплуатации, состояние трансформаторного масла и растворенных в нем продуктов старения – является индикатором состояния, как основной изоляции, так и других узлов трансформатора.

Анализ традиционной системы диагностики состояния трансформаторного оборудования. Основные направления совершенствования диагностики состояния трансформаторов.

Традиционный подход к оценке технического состояния трансформаторов в процессе эксплуатации представлен в [7]. При таком подходе трансформатор представляется в виде отдельных компонентов: обмотки, магнитопровод, изоляционная жидкость, вводы, переключающее устройство, бак и связанные с ним устройства [8]. Важно отметить, что трансформаторное масло рассматривается как отдельный компонент, а изоляционная система – в виде упрощенной двухкомпонентной модели «твердая изоляция – масло», без учета структуры изоляции. Определяется некий обязательный объем испытаний и проверок каждого компонента. Техническое состояние трансформатора оценивается сравнением значений показателей, полученных в результате проведенных испытаний, с исходными значениями либо нормированными допустимыми их значениями. Выход значения любого из параметров за установленные границы (предельные значения) рассматривается как признак наличия повреждений (дефектов), которые могут привести к отказу оборудования. Большая часть испытаний выполняется на отключенном и расшинованном трансформаторе, что требует больших затрат. В последние годы объем испытаний дополнился новыми, с помощью которых можно осуществлять измерения на работающем трансформаторе (акустическое и электрическое измерение ЧР, вибрационное, акустическое и тепловизионное обследование [9] и др.). Но по существу, сохраняется подход, основанный на мониторинге установленных характеристик.

Основные недостатки традиционной системы контроля состояния трансформаторного масла [2, 8] заключаются в следующем:

1. Отсутствие прямой зависимости между контролируемыми параметрами и функциональной работоспособностью трансформатора (запасами прочности).

2. Возможность неправильного диагноза и неоправданных действий (ненужная сушка по причине малого сопротивления изоляции, отбраковка магнитопровода по данным потерь холостого хода при малом напряжении, неправильная интерпретация сигналов ЧР и пр.).

3. Избыточный объем испытаний (во многих случаях эффективными оказываются только 5–10 % проведенных тестов).

4. Неучет возможных дефектов, которые не выявляются установленным объемом испытания (например, загрязнение витковой изоляции, местное увлажнение и старение изоляции, ухудшенное контактное сопротивление и пр.).

5. Практическая невозможность предсказания будущего состояния, в том числе остаточного ресурса изоляции.

В последнее время для оценки состояния силовых трансформаторов все шире используется комплексное диагностическое обследование, которое заключается в определении характера и уровня развития дефектов всех

систем и узлов трансформаторов [10, 11]. Программа комплексного диагностического обследования включает в себя следующие этапы:

– анализ аварийности и характерных дефектов данного типа трансформаторов;

– осмотр трансформатора и сбор технической информации (о режимах работы, нагрузке, уровнях токов короткого замыкания и рабочего напряжения, особенностях эксплуатации, потребителях, климатических условиях, загрязненности атмосферы и т.д.);

– анализ технической документации и результатов эксплуатационных измерений;

– проведение электрических измерений на отключенном трансформаторе ($\tan\delta$ и R изоляции обмоток и вводов, сопротивление обмоток постоянному току, потеря холостого хода и сопротивления короткого замыкания и т.д.);

– проведение измерений на работающем трансформаторе в режимах нагрузки и холостого хода (измерение частичных и других электрических разрядов, локация разрядов акустическими приборами, тепловизионное обследование всех узлов трансформатора, вибрационное обследование бака, а также маслонасосов);

– отбор проб масла из бака, маслонаполненных вводов, контакторов устройства регулирования под напряжением и проведение физико-химического анализа в лаборатории;

– подготовка и выпуск технического отчета, в котором приводятся, результаты обследования и их анализ, заключение о состоянии трансформатора и рекомендации по дальнейшей эксплуатации, а при необходимости объеме и методики проведения ремонтных работ.

Существеннейшим недостатком комплексного диагностического обследования [2] является высокая стоимость проведения такого обследования и как следствие невозможность выполнить его на всех трансформаторах. Альтернативой комплексному диагностическому обследованию [2], может служить технология диагностики посредством ранжирования оборудования по техническому состоянию и определение части оборудования, действительно нуждающейся в комплексном обследовании. Технология ранжирования может быть основана как на опыте эксплуатации однотипного оборудования, так и на определении наиболее вероятных дефектов трансформаторов и степени их опасности для данной конструкции в данных условиях эксплуатации.

Важнейшим направлением оптимизации эксплуатации высоковольтных трансформаторов является концепция перехода на ремонт и обслуживание трансформаторов по их состоянию. Данный переход подразумевает не только высокую достоверность при оценке состояния оборудования, но и возможность прогноза его поведения, что на сегодняшний день отсутствует.

В настоящее время широко используются экспертные системы и системы мониторинга состояния силовых трансформаторов [1]. Несмотря на

широкий спектр контролируемых параметров (в том числе и под рабочим напряжением) данные системы обладают существенным недостатком – методы принятия решений основываются на традиционной системе диагностики. Наблюдается противоречие между использованием современных информационных систем и измерительных средств и методами обработки получаемой информации.

Сравнительный анализ методов оценки состояния трансформаторных масел. Оценка состояния трансформаторного масла в Украине производится по комплексу показателей качества и нормативам, регламентируемым в [12]. Показатели качества трансформаторного масла и их граничные значения, используемые при эксплуатационном контроле трансформаторного масла, для трансформаторов номинальным напряжением 330 кВ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Гранично-допустимые значения трансформаторных масел для трансформаторов напряжением 330 кВ, используемые в Украине

Показатель	Гранично-допустимые значения
Пробивное напряжение, кВ	60/55
Содержание механических примесей	0,005 (50)
Содержание антиокислительной присадки ионол, % массы	0,1
Кислотное число, мг. КОН на 1 грамм масла	0,1
Содержание водорастворимых кислот, мг КОН	0,014
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Снижение не более чем на 5°С по сравнению с предыдущими испытаниями, но не более чем на 15°С с начала эксплуатации
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90°С, %	7/10
Содержание влаги, не более, % от массы г/г:	отсутствует
Содержание газа, % объема	2

Система контроля, существующая в Украине, позволяет выделить две характерные области состояния масла:

1) область нормальных значений показателей качества – масло годно к эксплуатации, значения показателей качества не выходят за границы допустимых;

2) область браковочных значений, когда один или несколько показателей качества масла вышли за граничные значения.

Оценка состояния масел в России [7], осуществляется по значениям показателей, приведенных в табл. 2. Кроме области нормальных и браковочных значений показателей, выделена и зона риска.

Используемые за рубежом различными энергокомпаниями более сложные многоуровневые системы контроля [5]. В таблице 3 приведены критерии оценки состояния трансформаторного масла, принятые в компании S.D. Myers (США), которая проводит обследования трансформаторов с 1965 г. Ежегодно данной компанией производится более 200 тыс. анализов проб масла. Система контроля имеет три характерные области: область приемлемых значений показателей качества масла, область ухудшенных значений показателей качества и область неприемлемых показателей качества.

Таблица 2 – Гранично-допустимые значения трансформаторных масел для трансформаторов напряжением 330 кВ, используемые в России

Показатель	значение показателя качества масла	
	ограничивающее область нормального состояния	предельно допустимое
Пробивное напряжение, кВ	50	45
Кислотное число, мг КОН/г масла	0,10	0,25
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	снижение более чем на 5°С в сравнении с предыдущим анализом	125
Содержание влаги, % от массы г/г	–	0,0030 (30)
Содержание механических примесей	0,0020 (11)	0,0030 (12)
Тангенс угла диэлектрических потерь при 70/90 °С, %	5/8	7/10
Содержание водорастворимых кислот и щелочей, мг КОН/г масла	0,014	–
Содержание антиокислительной присадки ионол, % массы	0,1	–
Содержание растворимого шлама, % массы,	–	0,005
Газосодержание в соответствии с инструкциями предприятия-изготовителя, % объема	2	4
Содержание фурановых производных, % массы	0,0015 (0,001)	

Таблица 3 – Гранично-допустимые значения показателей трансформаторных масел применяемые в США компанией S.D. Myers

Показатель	Приемлемо	Под вопросом	Не приемлемо
Кислотное число, КОИ / г	< 0,05	0,06–0,10	> 0,10
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/ м	> 32 10 ⁻²	28,0–31,9 10 ⁻²	> 27,9 10 ⁻²
Электрическая прочность, кВ	> 30	25–29	< 25
Цвет	< 3,5	–	> 3,5
Удельный вес, г / см ³	0,841–0,91	< 0,84	> 0,91
Прозрачность	Прозрачно	–	–
tgδ, % при 25 °С	< 0,1	0,1–0,3	> 0,3
tgδ, % при 100 °С	< 2,99	3,0–3,99	> 4,0
Влажность по Карлу Фишеру при номинальном напряжении:			
< 69 кВ	< 30	30–34,9	> 35
69–288 кВ	< 20	20–24,9	> 25
345 кВ и выше	< 15	15–19,9	> 20
Содержание газов	Сравнение с прежними данными		
Металлические частицы	Сравнение с прежними данными		
Содержание фуранов (выборочно), %	< 100	101–249	> 250

Несмотря на видимые различия в номенклатуре показателей и их граничных значениях, приведенные системы оценки состояния трансформаторных масел имеют одно общее свойство. Граничные значения показателей качества масла никак не связаны с продолжительностью эксплуатации и одинаковы на всем временном промежутке, поэтому невозможно определить состояние масла в интервале допустимых значений. На ранней стадии эксплуатации значения показателей будут ниже граничных значений, поэтому в данной области какую-либо оценку провести не возможно. С другой стороны, дрейф значений показателей будет происходить с разной скоростью, и зависеть от условий эксплуатации. Но граничные значения показателей не только постоянны на всем интервале эксплуатации, но и никак не связаны с режимами работы трансформаторов. Таким образом,

существующая система диагностики не позволяет выявить трансформаторы с аномальным старением масла на ранней стадии, т.е. еще до того, как эти показатели достигли своих граничных значений, что является существенным недостатком.

Выводы и постановка дальнейших задач исследования.

Выполненный анализ особенностей эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов позволил выявить целый ряд проблем, негативно влияющих на надежность функционирования электрических сетей Украины.

1. Старение силовых высоковольтных трансформаторов и крайне низкие темпы их замены, приводят к тому, что в эксплуатации находятся трансформаторы, отработавшие свой нормативный ресурс. В связи с этим наибольшую актуальность и значимость приобретают вопросы совершенствования диагностики состояния таких трансформаторов и продления их срока службы.

2. Порядка 30 % общего числа технологических нарушений силовых высоковольтных трансформаторов сопровождаются внутренними короткими замыканиями, из которых 24 % происходили с возгораниями и пожарами трансформаторов. При этом удельная повреждаемость трансформаторов с внутренними короткими замыканиями монотонно возрастает в процессе эксплуатации.

3. Трансформаторное масло является той информативной средой, по состоянию которой выявляются 70 % дефектов силовых высоковольтных трансформаторов.

4. Традиционная система диагностики установилась в период развития парка трансформаторов, но не всегда способна достоверно оценить состояния работающего старого оборудования.

5. Выявлено объективное противоречие между использованием современных информационных систем и измерительных средств и методами обработки результатов испытаний, что вынуждает разрабатывать более совершенные методы принятия решений.

6. Существующая система диагностики состояния трансформаторных масел не позволяет выявить трансформаторы с аномальным старением масла на ранней стадии, т.е. еще до того, как эти показатели достигли своих граничных значений.

7. Отсутствие возможности прогнозирования значений характеристик изоляции, не позволяет осуществить переход на ремонт и обслуживание трансформаторов по их состоянию.

Основными направлениями совершенствования диагностики состояния высоковольтных трансформаторов при длительном старении масел являются:

– разработка метода для оценки старения трансформаторных масел, который позволит распознавать трансформаторы с аномальным старением масел на ранней стадии;

– разработка математических моделей для прогнозирования значений показателей качества масел.

Список литературы: 1. *Мордкович А.Г.* О построении подсистем мониторинга, управления и диагностики оборудования подстанций сверхвысокого напряжения и их интеграция в АСУ ТП ПС / *А.Г. Мордкович, П.А. Горожанкин* // Электрические станции. – 2007. – №6. – С. 44–54; 2. *Соколов В.В.* Меры по повышению эффективности диагностики состояния трансформаторного оборудования / *В.В. Соколов* // Перспективные технологии электроэнергетики: IX симпозиум "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030 [Электронный ресурс]– М.: CD-изд-во "ТРАВЭК". - 2007; 3. *Алексеев Б.А.* Основное электрооборудование электрических станций и сетей / *Б.А. Алексеев, Л.Г. Мамиконянц, Д.С. Савваитов* // Электрические станции. – 2005. – №2. – С. 48–57; 4. *Львов М.Ю.* О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей / *М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, Ю.А. Деметьев и др.* // Электрические станции. – 2005. – №11. – С. 69 – 75; 5. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / *Б.А. Алексеев.* – М.: НЦ ЭНАС, 2002 г. – 216 с.; 6. Норми випробування електрообладнання: ГКД 34.20.302 – Офіц. вид. – К.: ОЕП ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2002. – 216 с. – (Галузевий керівний документ); 7. Объем и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300-97. Изд. 6-е. – М.: ЭНАС, 1998. – 296 с.; 8. *Бондаренко В.Е.* Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. [Монография] / *В.Е. Бондаренко, П.Ф. Шапов, О.В. Шутенко* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с.; 9. *Хренников А.Ю.* Тепловизионная диагностика как инструмент предупреждения аварийности высоковольтного электрооборудования подстанций / *А.Ю. Хренников, М.Г. Сидоренко, Е.П. Стратон* // Электро. – 2008. – №4. – С. 27–31; 10. *Ляпин А.Г.* Комплексный подход к диагностике и оценке технического состояния энергетического оборудования / *А.Г. Ляпин, Б.Г. Певчев, А.А. Пимошин* // Электрические станции. – 2005. – №8. – С. 64–67; 11. *Долин А.П.* Диагностика развивающихся дефектов силовых трансформаторов / *А.П. Долин, А.Ю. Ленков* // Электрические станции. – 2005. – №8. – С. 49–53; 12. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 – Офіц. вид. – К.: ОЕП ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с. – (Національний стандарт України).



Бондаренко Владимир Емельянович закончил электроэнергетический факультет ХПИ в 1974 году по специальности «Электроизоляция и кабельная техника». Учился в аспирантуре в Дрезденском техническом университете, ГДР. Кандидатскую диссертацию защитил в Дрездене, в 1979 году по специальности «Техника высоких напряжений». Докторская диссертация была защищена в 2004 году в НТУ «ХПИ» на тему «Многофункциональные методы и устройства для одновременного контроля электрических и геометрических параметров, материалов и изделий энергетического оборудования. Теория и практика».



Аулова Наталья Владимировна закончила электроэнергетический факультет НТУ «ХПИ» в 2008 году по специальности «Электрические системы и сети». В настоящее время преподаватель-стажер кафедры «Передача электрической энергии» в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт».

Поступила в редколлегию 03.09.2010

621.311.014

Ю.Н. ВЕПРИК, канд.техн.наук, проф., НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕСИММЕТРИЕЙ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Рішення цілого ряду актуальних завдань проектування і експлуатації вимагає достатньо докладних досліджень режимів роботи електричних систем з несиметрією. Для реалізації таких досліджень необхідні розробки відповідних моделей на основі рівнянь у фазних координатах і представлення елементів трифазними багатополуносниками.

The decision of a number of actual tasks of planning and exploitation requires the enough detailed researches of the modes of operations of the electric systems with unsymmetry. For realization of such researches developments of the proper models on the basis of equalizations in phase co-ordinates and presentation of elements by three-phase multiterminal network are needed.

Постановка проблемы. С развитием и объединением энергосистем увеличивается число элементов, одновременно включенных в работу, и, следовательно, увеличивается вероятность возникновения отказов как отдельных элементов, так и наложения отказов во времени. Старение оборудования также приводит к увеличению вероятности отказов элементов электрических систем. Отказы и последующие коммутации в подавляющем большинстве случаев приводят к возникновению несимметрии – повреждения наиболее вероятны одной из фаз, из всех видов КЗ наиболее часты однофазные, устройства защиты и автоматики (ОПН, ОАПВ) действуют пофазно. Целым рядом коммутаций, как правило, несимметричных, сопровождаются переходные процессы, причем в течение переходного процесса их может быть несколько и в разных фазах. Наряду с кратковременными аварийными несимметричными режимами вполне реальным становится существование и длительных эксплуатационных несимметричных режимов с одним или несколькими источниками несимметрии. Возникновение несимметрии и существование как кратковременных, так и длительных несимметричных режимов в электрических системах уже не является исключительным, маловероятным событием.

Для эффективного управления работой таких систем и успешноного выхода из аварийных ситуаций необходимы детальные исследования как стационарных, так и переходных режимов систем с простой и сложной несимметрией, что, в свою очередь, возможно лишь при наличии соответствующих математических моделей и программных средств.

Анализ публикаций. Сложившийся традиционный подход к разработке математических моделей электрических систем с несимметрией в

стационарных и переходных режимах, теоретические основы которого складывались во время, когда возможности средств математического моделирования были ограничены, основан на следующих положениях:

1) Разработка математических моделей реальных электрических систем достаточно трудоемка, и для облегчения решения в этой большой задаче выделен ряд более мелких и более простых, частных подзадач, решаемых изолированно на основе специализированных математических моделей и соответствующих программных средств [1,2]. Все свойства, составляющие, несущественные с точки зрения решаемой задачи, принято не рассматривать, поэтому задачи, в которых необходимо учитывать несколько влияющих факторов, такими моделями не решаемы.

2) Математическое моделирование основано на использовании предварительных линейных преобразований для перехода от реальной трехфазной схемы к однофазным эквивалентам, симметричным, модальным, $d-q-0$ и др. составляющим. Переход к однофазным эквивалентам упрощает задачу, снижает трудоемкость моделирования, но также ограничивает круг задач, решаемых такими моделями, так как переход выполним только при определенных условиях.

3) Использование линейных преобразований, их выбор для получения положительного эффекта для каждой специфической задачи приводят к необходимости поиска нетривиальных подходов в каждом конкретном случае, что, в свою очередь, приводит к плохой формализуемости, сложности алгоритмизации при моделировании.

4) Разработка узко специализированных моделей, для конкретных схем, конкретных задач [3, 4], каждой из которых решается отдельная, частная задача - анализ установившихся нормальных или аварийных, симметричных и несимметричных режимов, расчеты токов коротких замыканий, неполнофазных режимов, электромагнитных переходных процессов, перенапряжений, электромеханических переходных процессов, самозапуска. Применение этих и многих других специализированных математических моделей эффективно, но только в пределах, определяемых принятыми допущениями.

Результат такого подхода – множество узко специализированных моделей, не охватывающих все задачи, сложность организации их взаимодействия. "Узкая специализация" таких моделей приводит к необходимости иметь большую библиотеку алгоритмов и программ, каждая из которых отражает лишь одну из многих сторон моделируемой системы. То, что уже в настоящее время имеется ряд вопросов, на которые практика проектирования и эксплуатации еще не имеет ответа, можно рассматривать как следствие такого подхода.

Постановка задачи. С ростом количества одновременно включенных в работу основных элементов, износом оборудования, увеличением количества и разнообразия управляющих и защитных воздействий на систему наличие

сетей одновременно нескольких элементов с той или иной степенью несимметрии становится фактом. Необходимо дальнейшее развитие средств моделирования стационарных режимов и переходных процессов электрических систем с несимметрией в направлении расширения их возможностей и повышения точности получаемых результатов.

Широко применяемые в исследованиях стационарных режимов модели разработаны в предположении о том, что несимметрия либо отсутствует вообще (в расчетах нормальных режимов на одну фазу), либо присутствует в виде только одного несимметричного элемента (в расчетах несимметричных коротких замыканий методом симметричных составляющих), и для моделирования режимов систем со сложной (многоместной) несимметрией не применимы.

Переходные процессы содержат как электромагнитную, так и электромеханическую составляющие, включают, как правило, несколько этапов (возникновение КЗ, его отключение, переключение источника питания, срабатывания устройств защиты, автоматики, ОПН). На каждом этапе изменяются как электромагнитные, так и электромеханические параметры, причем эти изменения происходят во взаимосвязи и взаимовлиянии. При переходе к частным, типовым подзадачам за счет пренебрежения этим взаимовлиянием, во-первых, вносится погрешность и не воспроизводится реальная картина переходного процесса, а, во-вторых, что более существенно отметить, решение частных подзадач по отдельности, изолированно в ряде случаев усложняется (из-за разрыва связей с другими составляющими и необходимости иметь данные о них из других подзадач) или оказывается вообще невозможным. Необходимы разработки математических моделей переходных процессов с учетом электромагнитных и электромеханических составляющих, позволяющих учесть несимметрию как исходного режима, так несимметричные коммутации, связанные с управляющими и возмущающими воздействиями на нее в ходе переходных процессов.

Еще один круг задач, требующих разработки и совершенствования методов и средств математического моделирования систем с несимметрией, связан с тем, что несимметрия приводит к неблагоприятному влиянию как на элементы самой системы, так и на окружающую среду. Начальным и неперенным этапом в решении задач электромагнитного влияния и электромагнитной совместимости также должно быть моделирование несимметричных режимов.

Продолжать разработку моделей, позволяющих воспроизводить стационарные и переходные режимы работы систем со сложной несимметрией в рамках сложившегося подхода, направленного на разработку большого количества специализированных моделей (экстенсивный подход), вряд ли целесообразно, так как и их использование будет сопряжено с теми же сложностями, и дальнейшее движение в этом направлении – только

усугубляет ситуацию. Исследования стационарных и переходных режимов электрических систем с многоместной несимметрией и с требуемой точностью принципиально возможны на основе перехода к небольшому количеству обобщенных математических моделей (интенсивный подход), использующих уравнения в фазных координатах. Перейти к более полным и точным моделям на основе уравнений в фазных координатах, учитывающим переменные коэффициенты, нелинейные эффекты, изменения частоты, электромагнитное и электростатическое влияние фаз и др. факторы, позволяют и возможности современных ЭВМ. Модели в фазных координатах отличаются более широкими возможностями, большей адекватностью, но и большей трудоемкостью разработки, поэтому и подход к их разработке должен быть другим.

Подход к разработке математических моделей на основе уравнений в фазных координатах, основанный на минимальном количестве допущений, учете возможно большего (в рамках возможностей имеющихся вычислительных средств) количества факторов, позволяет расширить круг решаемых задач и, как следствие, ограничить набор требующихся моделей небольшим количеством обобщенных, базовых, решающих то же множество задач и с более высокой точностью.

Основные положения 'интенсивного' подхода к математическому моделированию электрических систем с несимметрией.

1. Переход к моделированию в фазных координатах (пофазному моделированию). С появлением и развитием новых средств математического моделирования и ЭВМ переход от уравнений в фазных координатах к каким-либо другим становится излишним.

2. Переход на уровень трехфазных многополюсников, на более полное использование возможностей современных средств вычислительной техники и методов математического моделирования. Традиционно разрабатываемые модели электрических систем используют самый нижний уровень декомпозиции системы, основанный на построении и использовании схем замещения, элементами которых являются двухполюсные резистивные R , индуктивные L и емкостные C элементы. Область применения моделей, ориентированных на этот уровень декомпозиции (микроуровень), ограничена системами небольшого объема, с малым числом элементов. При разработке математических моделей реальных электрических систем, целесообразно перейти на более высокий уровень декомпозиции (макроуровень), на котором в качестве элементов рассматриваются не двухполюсники, а трехфазные многополюсники, соответствующие реальным элементам системы.

3. Представление элементов уравнениями в фазных координатах. В работах, посвященных разработке и использованию математических моделей в фазных координатах для исследования режимов работы электрических систем, используются различные формы представления элементов в фазной системе координат – трехфазные схемы замещения элементов, решетчатые

схемы и др. с целью перенести методы и модели, разработанные и применяемые для однофазных схем и частных задач, на трехфазные. Представляется более целесообразным использовать для элементов сети (трехфазных многополюсников) не схемы (схемы замещения, решетчатые), а уравнения трехфазных элементов сети в форме, непосредственно отражающей электрические и магнитные связи между контурами и обмотками отдельных фаз.

4. Ориентация на комплексные, обобщенные модели. При переходе на пофазное моделирование и представление элементов трехфазными многополюсниками с индуктивными и емкостными связями фаз нет необходимости в преобразованиях к другим системам координат и принятии целого ряда допущений, при которых эти преобразования выполнимы.

5. Формализация и унификация. Линейные преобразования с целью перехода от фазных координат к каким-либо другим, требуют в каждой конкретной модели особого, нетривиального подхода, что затрудняет обобщение, формализацию и алгоритмизацию. При разработке математических моделей в фазных координатах не требуются какие-либо предварительные преобразования, поэтому становится возможным решение вопросов формализации и унификации как данных, так и вычислительных процедур.

6. Разработка новых методов формирования и решения систем алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений, применимых при представлении элементов на уровне трехфазных многополюсников.

7. Ограничение числа моделей небольшим количеством обобщенных, базовых. Переход на уровень трехфазных многополюсников, представление элементов уравнениями в фазных координатах, отражающими все особенности их конструктивного исполнения, позволяет реализовать обобщенные модели, каждая из которых применима для решения не одной, а комплекса взаимосвязанных задач.

Представляется, что в рамках такого подхода может быть реализовано наиболее эффективное решение отмеченных выше теоретических, методических, алгоритмических задач моделирования электрических систем с несимметрией при ограничении количества математических моделей, например, тремя, базовыми для моделирования, соответственно, стационарных режимов (модель М1), электромагнитных (модель М2) и электромеханических (модель М3) переходных процессов.

Модель М1 для анализа стационарных режимов [5] основана на представлении в единой унифицированной блочно-матричной форме уравнений любых стационарных режимов:

-аварийных несимметричных со сложной несимметрией (линейные уравнения в фазных координатах)

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^F & Y_{12}^F & \mathbf{L} & Y_{1n}^F \\ Y_{21}^F & Y_{22}^F & \mathbf{L} & Y_{2n}^F \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ Y_{n1}^F & Y_{n2}^F & \mathbf{L} & Y_{nn}^F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^F \\ U_2^F \\ U_n^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^F \\ J_2^F \\ J_n^F \end{bmatrix}; \quad (1)$$

- эксплуатационных несимметричных режимов (нелинейные уравнения в фазных координатах)

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \mathbf{K} & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \mathbf{K} & Y_{2n} \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \mathbf{K} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_n \end{bmatrix}; \quad (2)$$

- аварийных режимов с простой несимметрией (линейные уравнения для однофазного эквивалента трехфазной сети)

$$\begin{bmatrix} g_{11} & -b_{11} & g_{12} & -b_{12} & \mathbf{L} & g_{1n} & -b_{1n} \\ b_{11} & g_{11} & b_{12} & g_{12} & \mathbf{K} & b_{1n} & g_{1n} \\ g_{21} & -b_{21} & g_{22} & -b_{22} & \mathbf{L} & g_{2n} & -b_{2n} \\ b_{21} & g_{21} & b_{22} & g_{22} & \mathbf{K} & b_{2n} & g_{2n} \\ \mathbf{L} & & \mathbf{L} & & \mathbf{L} & & \mathbf{L} \\ \mathbf{K} & & \mathbf{K} & & \mathbf{K} & & \mathbf{K} \\ g_{n1} & -b_{n1} & g_{n2} & -b_{n2} & \mathbf{L} & g_{nn} & -b_{nn} \\ b_{n1} & g_{n1} & b_{n2} & g_{n2} & \mathbf{K} & b_{nn} & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{r1} \\ U_{a2} \\ U_{r2} \\ U_{am} \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{a1} \\ J_{r1} \\ J_{a2} \\ J_{r2} \\ J_{am} \\ J_m \end{bmatrix}; \quad (3)$$

- нормальных симметричных режимов (нелинейные уравнения для расчета потокораспределения)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -b_{11} & a_{12} & -b_{12} & \mathbf{L} & a_{1n} & -b_{1n} \\ c_{11} & d_{11} & c_{12} & d_{12} & \mathbf{K} & c_{1n} & d_{1n} \\ a_{21} & -b_{21} & a_{22} & -b_{22} & \mathbf{L} & a_{2n} & -b_{2n} \\ c_{21} & d_{21} & c_{22} & d_{22} & \mathbf{K} & c_{2n} & d_{2n} \\ \mathbf{L} & & \mathbf{L} & & \mathbf{L} & & \mathbf{L} \\ \mathbf{K} & & \mathbf{K} & & \mathbf{K} & & \mathbf{K} \\ a_{n1} & -b_{n1} & a_{n2} & -b_{n2} & \mathbf{L} & a_{nn} & -b_{nn} \\ c_{n1} & d_{n1} & c_{n2} & d_{n2} & \mathbf{K} & c_{nn} & d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta U_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta U_2 \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{L} \\ \Delta\delta_n \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{L} \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Элементами систем уравнений (1,2) являются матрицы собственных $[Y]_{11}^F$ и взаимных $[Y]_{ij}^F$ проводимостей трехфазных узлов размером 3×3 , векторы напряжений фаз в узлах трехфазной сети $[U]_i^F$ и задающие токи фаз $[J]_i^F$ в узлах сети. В линейных уравнениях (1) напряжения фаз находятся однократным решением системы уравнений, в нелинейных уравнениях (2) (при заданных мощностях, потребляемых и генерируемых в узлах сети) напряжения фаз уточняются в ходе итерационного процесса до тех пор, пока сумма мощностей трех фаз А, В, С в каждом узле сети не станет равна заданной величине.

В линейных уравнениях (3) баланса активных и реактивных токов для узлов сети, матрица коэффициентов Y содержит активные g и реактивные b проводимости элементов сети, имеет, как и в задачах (1,2) макромоделирования в фазных координатах, блочную структуру и отличается только тем, что содержит блоки второго порядка 2×2 .

В линеаризованной системе уравнений относительно небалансов активной ΔP и реактивной ΔQ мощностей в узлах сети, записанной в форме (4), матрицы коэффициентов также состоят из блоков размером 2×2

$$a_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j}; \quad b_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j}; \quad c_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j}; \quad d_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j},$$

а столбцы неизвестных и заданных величин содержат попарно величины, относящиеся к одному узлу.

Предложенные модификации узловых уравнений электрической сети в форме баланса токов и мощностей обеспечивают возможность представления любых уравнений электрической сети в установившихся режимах – аварийных (1, 3), нормальных (4), в фазных координатах (1, 2) – в единой, унифицированной блочно-матричной форме, характерными особенностями которой являются следующие:

- матрицы коэффициентов любой из рассмотренных систем уравнений имеют одинаковую структуру, состоят из блоков и различаются только размерами этих блоков (2×2 , 3×3 или 6×6);

- элементы векторов заданных величин и неизвестных также сгруппированы в блоки по 2 или по 3, содержащие величины, относящиеся к одному узлу сети;

- количество блоков в матрице и векторах заданных и искоемых величин равно числу независимых узлов n моделируемой сети.

Основными вычислительными процедурами при решении уравнений (1-4) являются: топологический анализ схемы сети, определение порядка исключения неизвестных, формирование системы уравнений и решение полученной системы. Приведение выделенных четырех моделей к унифицированному виду позволяет, во-первых, унифицировать эти вычислительные процедуры, а, во-вторых, включить их в единую обобщенную, базовую модель электрических систем в стационарных режимах и обеспечивает возможность моделирования любых стационарных режимов – нормальных и аварийных, симметричных и несимметричных, с продольной и поперечной, с простой и сложной несимметрией – на единой информационной, алгоритмической, методической основе.

Одна обобщенная модель охватывает возможности многих вместе взятых узко специализированных моделей – расчета коротких замыканий (в одной точке и в разных и разных видов), неполнофазных режимов, несимметричных нагрузок, нетранспонированных ВЛ, наведенных напряжений, средств симметрирования и других. Она обеспечивает воспроизведение несимметричных режимов при наличии любой несимметрии

– простой и сложной, продольной и поперечной, в любом количестве и в любых сочетаниях и может служить в качестве базовой для моделирования стационарных режимов электрических систем с несимметрией.

Переход к уравнениям в фазных координатах на уровне трехфазных многополюсников с унификацией на их основе вычислительных процедур и структуры моделей дает положительный эффект и при моделировании электромагнитных переходных процессов (модель М2). Наиболее эффективно такой переход реализуется, как показано в [6], на основе неявных методов численного интегрирования.

Неявные методы не требуют приведения к форме Коши и могут быть применены как к системе уравнений, сформированной для объекта в целом, так и на этапе получения дискретных уравнений отдельных элементов. Выбор в пользу неявных методов следует и из сопоставления явных и неявных методов по таким характеристикам, как точность и устойчивость вычислительного процесса. Кроме того, дополнительное повышение эффективности моделирования можно обеспечить за счет того, что последовательность этапов расчета на шаге численного интегрирования, единственно возможную для явных методов, при применении неявных методов можно изменить:

- 1) выполнить сначала аппроксимацию компонентных уравнений разностными уравнениями – получить дискретные уравнения трехфазных многополюсников на шаге интегрирования;
- 2) выполнить формирование системы алгебраических уравнений на шаге расчета с учетом топологических уравнений;
- 3) получить решение полученной системы уравнений на шаге.

При такой последовательности этапов моделирования обеспечиваются более широкие возможности унификации и алгоритмизации вычислительных процедур.

Для формирования математической модели электрической сети на основе неявных методов численного интегрирования и узловых уравнений в фазных координатах нужно, в соответствии с принятой последовательностью этапов моделирования, дифференциальные уравнения всех трехфазных многополюсников на шаге численного интегрирования представить в дискретной форме, разрешенной относительно токов.

Уравнения переходных процессов для участка ВЛ в дифференциальной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} [L] \frac{d}{dt} [i] + [R] [i] &= [u] - [u] \\ [C] \frac{d}{dt} [u] + [G] [u] &= [i] \end{aligned} \quad (5)$$

Разрешив их относительно производных и проинтегрировав по неявным формулам принятого метода численного интегрирования, будем иметь:

$$\begin{aligned} [i]_j^{k+1} &= h ([L]_{jj} + h [R]_{jj})^{-1} [\Delta u]_j^{k+1} + ([L]_{jj} + h [R]_{jj})^{-1} [L]_j [i]_j^k, \\ [i]_0^{k+1} &= \frac{1}{h} ([C]_{i0} + h [G]_{i0}) [u]_0^{k+1} - \frac{1}{h} [C]_{i0} [u]_0^k \end{aligned} \quad (6)$$

где h – шаг интегрирования, $k, k+1$ – номер шага интегрирования, или, в более краткой форме

$$\begin{aligned} [i]_j^{k+1} &= [Y]_j [\Delta u]_j^{k+1} + [J]_j^k, \\ [i]_0^{k+1} &= [Y]_0 [u]_0^{k+1} + [J]_0^k \end{aligned} \quad (7)$$

где $[Y]_j, [Y]_0$ – матрицы, определяемые соответственно продольными и поперечными параметрами участка трехфазной линии, $[J]_j^k, [J]_0^k$ – векторы, зависящие от токов индуктивных и напряжений емкостных ветвей, определяемые на предыдущих шагах интегрирования. Уравнения (7), представляющие собой аппроксимацию дифференциальных уравнений (5) участка трехфазной линии разностными уравнениями, будем называть дискретной математической моделью трехфазной линии. Они разрешены относительно токов фаз на $(k+1)$ -м шаге интегрирования, что позволяет включать их в систему узловых уравнений на шаге расчета. При интегрировании с постоянным шагом матрицы $[Y]_j, [Y]_0$ остаются неизменными, и изменяются лишь векторы $[J]_j^k, [J]_0^k$.

Конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений других элементов выполняется аналогично и уравнения остальных элементов системы (трансформаторы, статическая и двигательная нагрузка, реакторы и др.) также могут быть представлены в форме (7).

Второй этап – формирование системы узловых уравнений на шаге расчета переходного процесса. Система дискретных алгебраических уравнений на шаге расчета переходного процесса неявными методами численного интегрирования формируется на основе дискретных уравнений отдельных элементов сети и информации о том, как они соединены в схеме электрической сети.

Составив уравнения баланса токов для всех независимых трехфазных узлов сети и подставив в них дискретные уравнения элементов в форме (5, 7), получим систему уравнений

$$\begin{aligned} [y_{11}][u_1]^{k+1} + [y_{12}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{1n}][u_n]^{k+1} &= [j_1] \\ [y_{21}][u_1]^{k+1} + [y_{22}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{2n}][u_n]^{k+1} &= [j_2] \\ \dots & \dots \\ [y_{i1}][u_1]^{k+1} + [y_{i2}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{in}][u_n]^{k+1} &= [j_i] \\ \dots & \dots \\ [y_{n1}][u_1]^{k+1} + [y_{n2}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{nn}][u_n]^{k+1} &= [j_n] \end{aligned} \quad (8)$$

Элементы блоков матрицы $[y_{ij}]$ определяются параметрами R, L, G, C элементов системы и при постоянном шаге интегрирования остаются неизменными. Элементы вектора-столбца $[J]$ в правой части полученной системы уравнений зависят от токов индуктивных и напряжений емкостных элементов на предыдущих интервалах времени и изменяются от шага к шагу.

Система уравнений (8) позволяет определить мгновенные значения параметров режима на текущем (k+1)-м интервале времени переходного процесса по известным параметрам режима на предыдущем k-м шаге.

Использование неявных методов и представление трехфазных элементов на шаге интегрирования дискретными моделями (7) позволяет свести решение системы дифференциальных уравнений к многократному формированию и решению системы алгебраических уравнений. Причем, если интегрирование выполняется с постоянным шагом, то отпадает необходимость формировать матрицу [Y] на каждом шаге, так как ее элементы при этом сохраняются неизменными. Расчет при $h=const$ сводится к корректировке элементов столбца [J] с учетом вычисленных на шаге параметров режима и определению новых значений из решения системы (8).

Использование узловых уравнений и дискретных математических моделей элементов при анализе переходных процессов обеспечивает снижение порядка системы дифференциальных уравнений и упрощение алгоритма их формирования по трехфазной расчетной схеме при наличии в ней как индуктивных, так и емкостных элементов. С переходом к моделированию на макроуровне существенно повышается эффективность как модели, так и процесса ее формирования. Алгоритмы формирования и решения разностных уравнений на шаге интегрирования оказываются такими же, как и при анализе стационарных режимов по узловым уравнениям и реализуются теми же унифицированными вычислительными процедурами.

Отмеченные достоинства определяют целесообразность применения неявных методов и узлового метода формирования моделей трехфазных электрических систем на макроуровне для исследования переходных процессов в электрических системах.

Кроме того, в состав элементов математической модели включены воздушные и кабельные линии, трансформаторы с изолированной, глухо заземленной, заземленной через сопротивление нейтрально. Модель обеспечивает основу для решения широкого круга задач – исследования электромагнитных переходных процессов в воздушных и кабельных сетях, с изолированной, резонансно-, резистивно- или глухо заземленными нейтралью, с несимметричными элементами и коммутациями. Поэтому разработанную модель можно рассматривать как базовую для решения задач, связанных с моделированием электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией.

Для моделирования электромеханических переходных процессов [7] при несимметричных коммутациях необходимо, во-первых, состав моделируемых элементов дополнить моделями вращающихся электрических машин в фазных координатах, и, во-вторых, обеспечить включение их в состав модели системы.

Для получения дискретной модели, например, синхронной машины (СМ) в фазных координатах нужно исходные уравнения в фазных координатах

$$\begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \left(\omega \begin{bmatrix} dL(\gamma) \\ d\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix};$$

уравнения разрешить относительно производных

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = -[L(g)]^{-1} \left(\omega \begin{bmatrix} dL(g) \\ dg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + [L(g)]^{-1} \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix},$$

и перейти к разностной аппроксимации

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k)} - h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \begin{bmatrix} dL(\gamma) \\ d\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k)} + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix};$$

Если перенести элементы, содержащие токи обмоток статора i_s и ротора i_r на (k+1) - м шаге, в левую сторону и ввести обозначение

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] = [E] + h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \begin{bmatrix} dL(\gamma) \\ d\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_r \end{bmatrix} \right),$$

то уравнения примут вид:

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k+1)} = h [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k)}; \quad (9)$$

Умножив обе части уравнения (9) на обратную матрицу $[A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1}$, получим окончательно

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} j_s \\ j_r \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (10)$$

где $[Y(\gamma)^{(k+1)}] = h [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1}; \begin{bmatrix} j_s \\ j_r \end{bmatrix}^{(k)} = [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}^{(k)};$

В уравнениях СМ (10), как и в дискретных уравнениях статических элементов электрической сети в М2, токи в обмотках на текущем шаге численного интегрирования уравнений переходных процессов выражены через напряжения на обмотках на текущем шаге и токи в обмотках на предыдущем шаге интегрирования. В отличие от статических элементов дискретные параметры СМ являются переменными и должны вычисляться на каждом шаге вычислительного процесса в функции углового положения роторов СМ. В такой унифицированной форме уравнения СМ могут быть

включены в систему уравнений, решаемых на шаге численного интегрирования.

Дискретные уравнения электромагнитных переходных процессов АД получаются аналогично и имеют вид

$$\begin{aligned} [i_S]^{k+1} &= [Y_S][u_S]^{k+1} + [Y_S][u_S]^k + [A_S][i_S]^k + [A_{SR}][i_R]^k \\ [i_R]^{k+1} &= [Y_{RS}][u_S]^{k+1} + [Y_{RS}][u_S]^k + [A_{RS}][i_S]^k + [A_R][i_R]^k. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные уравнения также представлены в форме, унифицированной для включения в систему уравнений переходных процессов электрической сети. Компонентные уравнения всех элементов первой группы выражают токи фаз соответствующего элемента на (k+1)-м шаге через напряжения на этом же шаге (неизвестные) и напряжения и токи фаз на k-м шаге (известные из расчета на предыдущем шаге интегрирования). Составив уравнения баланса токов для всех независимых трехфазных узлов сети, получим подсистему уравнений, отражающих электромагнитные составляющие переходных процессов в электрической сети:

$$\begin{aligned} [y_{11}][u_1]^{k+1} + [y_{12}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{1n}][u_n]^{k+1} &= [j_1] \\ [y_{21}][u_1]^{k+1} + [y_{22}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{2n}][u_n]^{k+1} &= [j_2] \\ \dots & \dots \\ [y_{n1}][u_1]^{k+1} + [y_{n2}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{nn}][u_n]^{k+1} &= [j_n] \end{aligned} \quad (12)$$

Система уравнений (12) позволяет определить мгновенные значения параметров режима сети на текущем (k+1)-м интервале времени переходного процесса по известным параметрам режима на предыдущем k-м шаге.

Матрица коэффициентов в (12) формируется из дискретных проводимостей элементов (линий, трансформаторов, статической и двигательной нагрузки) и содержит собственные и взаимные дискретные проводимости узлов сети. Элементы блоков матрицы $[y_{ij}]$ определяются

параметрами R, L, G, C элементов системы. Для статических элементов и при постоянном шаге интегрирования они остаются неизменными, для вращающихся электрических машин изменяются от шага к шагу, так как являются функциями углов поворота вращающихся роторов электрических машин.

Элементы вектора-столбца $[j]$ в правой части системы (12) зависят от токов индуктивных и напряжений емкостных элементов сети, а также от токов статорных и роторных обмоток электродвигателей на предыдущем (k-м) интервале времени и изменяются от шага к шагу.

Для моделирования электромеханической составляющей переходных процессов система (12) должна быть дополнена уравнениями переходных процессов в обмотках двигателей и уравнения движения роторов:

$$\begin{aligned} [i_S]^{k+1} &= [Y_S][u_S]^{k+1} + [Y_S][u_S]^k + [A_S][i_S]^k + [A_{SR}][i_R]^k, \\ [i_R]^{k+1} &= [Y_{RS}][u_S]^{k+1} + [Y_{RS}][u_S]^k + [A_{RS}][i_S]^k + [A_R][i_R]^k, \\ M_{\vartheta} &= \frac{1}{2}[i_S]^{k+1T} [L_{SR}] [i_R]^{k+1} + \frac{1}{2}[i_R]^{k+1T} [L_{RS}] [i_S]^{k+1}, \\ W^{(K+1)} &= W^{(K)} + \frac{h}{T_j}(M_{\vartheta} - M_M), \quad g^{(K+1)} = g^{(K)} + h \cdot W^{(K+1)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подсистема переходных процессов в электродвигателях (13), позволяет для каждого из электродвигателей на шаге интегрирования определять: токи в статорных и роторных обмотках двигателей, электромагнитные вращающиеся моменты, создаваемые взаимодействием статорных и роторных токов, скорости вращения и угловое положение роторов на (k+1)-м шаге по известным параметрам на предыдущем и текущем шаге расчета переходного процесса.

Расчет электромеханического переходного процесса при использовании неявных методов и представлении трехфазных элементов на шаге интегрирования дискретными моделями (5,10,11) позволяет свести решение системы дифференциальных уравнений к многократному формированию и решению системы алгебраических уравнений (12, 13). Причем при наличии в схеме вращающихся электрических машин элементы матриц коэффициентов в (12) вычисляются на каждом шаге, так как индуктивные параметры двигателей являются функциями углового положения роторов, элементы столбца $[j]$ корректируются с учетом вычисленных на шаге параметров режима. Использование узловых уравнений и дискретных математических моделей элементов обеспечивает снижение порядка системы дифференциальных уравнений и упрощение алгоритма их формирования по трехфазной расчетной схеме при наличии в ней как индуктивных, так и емкостных элементов. Кроме того, алгоритм формирования и решения разностных уравнений на шаге интегрирования оказывается таким же, как и при анализе стационарных режимов по узловым уравнениям.

Разработанные базовые модели реализованы в виде программных продуктов ANFAZ1, ANFAZ2, ANFAZ3 предназначенных для анализа стационарных и переходных процессов в электрических сетях произвольной конфигурации с узлами статической и двигательной нагрузки при симметричных и несимметричных повреждениях и коммутациях на основе уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования.

Выводы. 1. Решение целого ряда задач управления функционированием энергосистем возможно только на основе комплексной оценки эффективности принимаемых решений. Для реализации такой оценки в настоящее время разработано и применяется большое количество специализированных моделей, каждая из которых позволяет определить только какую-либо одну из количественных характеристик оцениваемых

нормальных или аварийных режимов (уровни напряжений, потери, токи КЗ, запасы устойчивости, перенапряжения и др.). 2. Наличие большого количества специализированных моделей усложняет процесс получения нужной оценки и принятия решений, так как такие модели имеют ограниченную точность из-за принятых допущений, разработаны на разной методической, математической, алгоритмической основе, различаются составом и формой подготовки исходных данных, представлением результатов. 3. Другим, альтернативным, и более целесообразным при достигнутом уровне развития методов и средств математического моделирования и ЭВМ, представляется подход к разработке математических моделей, основанный на минимальном количестве допущений, учете возможно большего (в рамках возможностей имеющихся вычислительных средств) количества факторов, который позволяет расширить круг решаемых задач и, как следствие, ограничить набор требующихся моделей небольшим количеством обобщенных, базовых, решающих то же множество задач и с более высокой точностью. 4. Реализация такого подхода возможна на пути представления элементов электрических сетей и системы в целом не однофазными эквивалентами (в симметричных составляющих, d-q-0 координатах, модальных составляющих и др.), а реальной трехфазной моделью на основе уравнений в фазных координатах.

Список литературы. 1. Расчеты переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в компенсированных сетях / Ф. А. Романюк, В. И. Новаиц, Н. Н. Бобко и др. // Энергетика. — 2002. — №4. 2. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений / М. Ш. Мисриханов и др. // Электрические станции. — 2003. — № 1. — С. 47–55. 3. Александров Г. Н. Переходные процессы в сетях с резонансным токоограничивающим устройством / Г. Н. Александров, С. В. Смоловик // Электричество. — 2002. — № 1. — С. 15–20. 4. Ефимов Б. В. Наведенные напряжения на воздушных линиях при неоднородных трассах сближения / Б. В. Ефимов, Г. П. Фастий, М. В. Якубович. — Электрические станции. — 2002. — № 8. — С. 3–9. 5. Венрик Ю. Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю. Н. Венрик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2010. — №2. — С. 37–42. 6. Венрик Ю. Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке. / Ю. Н. Венрик // Электротехника и электромеханика. — 2010. — № 3. — С. 59–61. 7. Венрик Ю. Н. Базовая модель электромеханических переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю. Н. Венрик, В. Ю. Венрик // Энергетика и электрификация. — 2010. — № 6. — С. 14–21.

Венрик Юрий Николаевич закончил Новосибирский электротехнический институт по специальности «Электрические системы и сети» в 1963 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 1977 по вопросам устойчивости режимов электрических систем. Научные направления: развитие теории и методов математического моделирования режимов электрических систем с несимметрией.

Поступила в редколлегию 03.09.10

УДК 621.311

Д. И. ВОРОНЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕГИОНАЛЬНЫМИ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

В роботі представлена інформаційна система підтримки ухвалення рішень на основі трьох видів моделей прогнозування енергоспоживання на наступні доби. Методологія використання, архітектура і способи взаємодії елементів системи направлені на підвищення ефективності управління регіональними енергосистемами на основі оцінки щоденної ситуації про попит на електроенергію.

In work the informative system of support of acceptance of decisions on the basis of three types of models of prognostication of energy consumption on next days is represented. Methodology of the use, architecture and methods of co-operation of elements of the system, are directed on the increase of efficiency of management by regional grids on the basis of estimation of daily situation about demand on electric power.

Введение. Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) представляют собой сложные, многосвязные, пространственно разнесенные иерархические объекты, функционирующие в условиях переменности структуры, параметров и режимов работы при многочисленных внешних и внутренних возмущениях как систематического, так и случайного характера [1]. Это определяет сложность задач управления ими. Еще в 70-е гг. началось активное внедрение автоматических систем диспетчерского управления (АСДУ) в энергосистемы [2]. Именно в эти годы началось формирование иерархических телеинформационных сетей, обеспечивающих передачу телеметрической информации от энергообъектов на диспетчерские пункты энергосистем. В последнее десятилетие в Украине происходит интеграция систем управления, как объектная, так и функциональная на единой технической и информационной основе. Можно говорить о росте числа взаимосвязей между АСДУ разных уровней, автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) объектов, систем защиты, управления и контроля, средств управления в нормальных и аварийных режимах и т. д. Например, действующая с 90-х годов в г. Харькове АСКУЭ Харьковоблэнерго с более 2000 узлами учета на фидерах городских подстанций позволила собрать уникальный архив данных, который был затем интегрирован с данными АСУ ТП Харьковской ТЭЦ-5 о связанном потреблении энергоресурсов в рамках проекта по созданию системы мониторинга качества теплоснабжения жилых массивов г. Харькова [3]. Данная комбинация обеспечила уникальную основу для проведения исследований по созданию эффективных информационных систем для прогнозирования энергопотребления, автоматизации диспетчерского

управления и поддержки принятия решений диспетчерами. Системы управления региональными и коммунальными энергосистемами исторически строились на принципах локальности и математической простоты принятия решений, и процесс принятия решения в них делегирован человеку. Однако на текущий момент, с одной стороны, рыночные отношения и усложнение процессов в обществе и энергетике, приводят к усложнению динамики воздействующих внешних факторов, с другой стороны, развитие вычислительной техники и информационных технологий предоставляет большие возможности как в отношении обмена информацией между узлами управления, так и методов ее переработки.

Иерархическая система диспетчерского управления ОЭС Украины имеет две основные ступени: центральное диспетчерское управление (ЦДУ) ОЭС Украины, и центральные диспетчерские службы (ЦДС) региональных электроэнергетических систем. Ниже этих ступеней иерархии находятся пункты оперативного управления городскими энергосистемами, электростанциями, предприятиями электрических сетей и районами электрических сетей.

Исключительная сложность задачи управления режимами ЭЭС также обуславливает ее разделение на ряд более простых систем, относящихся к четырем уровням временной иерархии управления: долгосрочное планирование режимов; краткосрочное планирование режимов; оперативное диспетчерское управление текущими режимами; автоматическое управление нормальными и аварийными режимами.

Постановка задачи. Совокупность реальных процессов, которые могут возникнуть при управлении функционированием ЭЭС и, особенно в связи с аварийными ситуациями, существенно шире и богаче, нежели выразительные средства, свойственные численному моделированию. Поэтому большего успеха в решении задач оперативного управления режимами ЭЭС, по-видимому, можно достичь, комбинируя широко используемые математические методы с возможностями новых информационных технологий, поддерживаемых средствами искусственного интеллекта таким образом, чтобы достоинствами одних компенсировать недостатки других в рамках комплекса задач АСДУ ЭЭС на разных ее территориальных уровнях.

В данной работе предложена архитектура и распределение ролей для информационной системы поддержки принятия решений регионального уровня, работающего на единой информационной основе. Система предназначена для информационной поддержки краткосрочного управления региональной энергосистемой, так как именно этот уровень, во-первых, требует взаимосвязи нескольких участников энергорынка и местного самоуправления на региональном уровне, во-вторых, в отличие от долгосрочного планирования, не обладает большим временным горизонтом для принятия решения (тем более что долгосрочное планирование является прерогативой более высоких уровней управления) и, в-третьих, в отличие от

оперативного, не является реакцией на непредвиденные или относительно несложные ежеминутные изменения и позволяет экономить значительные средства на местном уровне за счет более качественного анализа, прогнозирования и интеллектуальной поддержки принятия ежесуточных решений и плановых корректировок. Понимая масштабность поставленной задачи, на первом этапе она рассмотрена со следующими ограничениями: рассматриваются только городская энергосистема и задача прогнозирования, как основа для принятия оперативных решений на региональном уровне.

Информационная система поддержки принятия решения в региональном координационном центре. На современном этапе развития АСДУ особенно важны вопросы совершенствования управления в ЭЭС на региональном уровне. Это связано с расчленением технологически связанных систем после либерализации энергетики и разграничения форм собственности. Текущая ситуация требует необходимости совершенствования диспетчерского управления региональными ЭЭС путем создания региональных координационных центров (РКЦ) по регулированию ТЭК и разработки принципиально новых подходов, в том числе, основанных на методах искусственного интеллекта и принципах адаптивного управления.

Перечисленные задачи, решаемые в АСДУ ЭЭС, требуют разработки новых и совершенствования уже существующих методов текущего (долгосрочного, краткосрочного) планирования режимов и оперативного управления ими. Это касается как методического аспекта, так и увеличения темпа выдачи получаемых в АСДУ решений. Произвести всесторонний анализ полученных решений, проверить их достоверность и выдать соответствующие рекомендации обслуживающему энергосистему персоналу невозможно без применения специально разработанных для этих целей интеллектуальных, информационно-вычислительных средств.

Предыдущие исследования по созданию прогностических моделей специально адаптированных для применения в системах поддержки принятия решений регионального уровня показали высокую точность прогностических моделей как регрессионного типа на базе нейросетей типа многослойный перцептрон (МСП) [4], так и классификационного типа на базе нейросетей каскадной корреляции (НКК) Фалмана [5]. Это позволяет перейти на следующий уровень автоматизации и разработать методические и архитектурные принципы применения указанных моделей в работе комплекса управления энергосистемой, как для отображения на экране компьютера для поддержки принятия решений РКЦ (краткосрочное планирование и оперативное управление), так и для автоматического регулирования нагрузки источников электроснабжения (автоматическое управление). Принимая во внимания сегодняшние практические задачи и потребности региональных ТЭК, информационная система поддержки принятия решений (ИСППР) по ежесуточному планированию отпуска электричества и тепла (управлению

энергосистемой) на региональном уровне представляется наиболее целесообразной в том виде в котором она представлена на рис. 1.

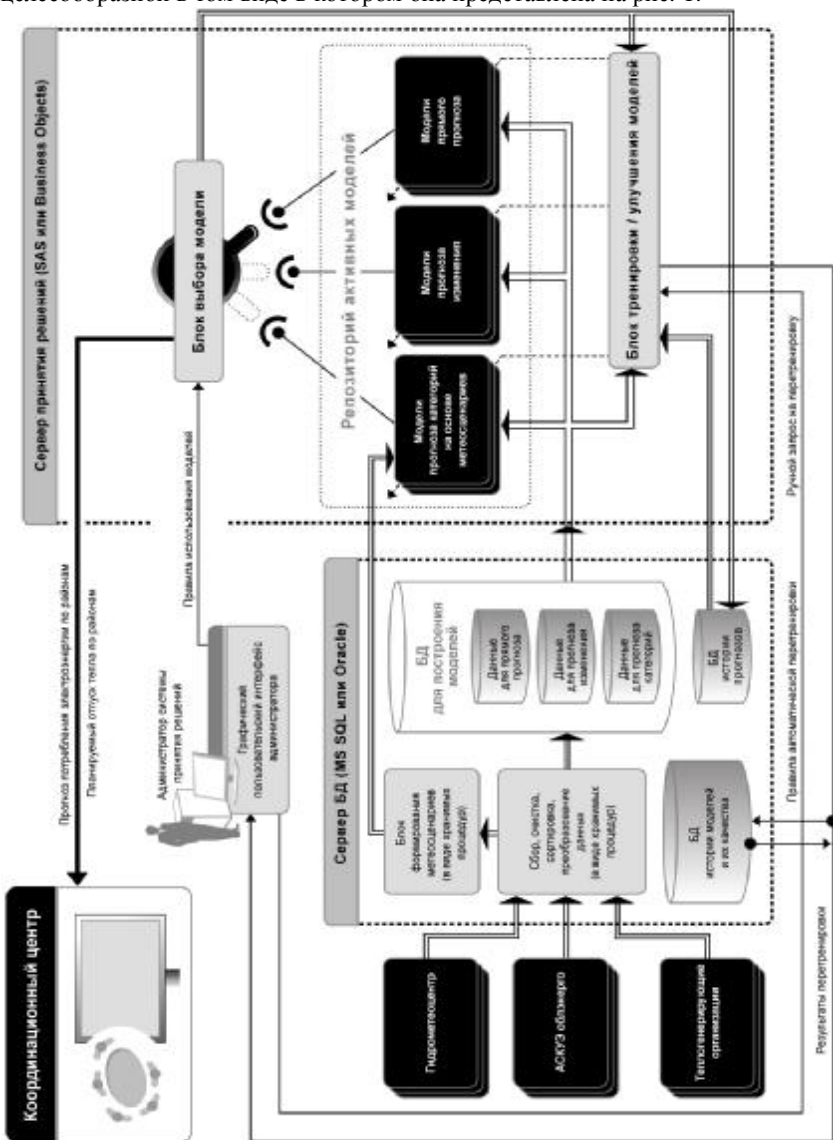


Рис. 1 - Информационная система поддержки принятия решения в региональном координационном центре

Для повышения устойчивости, надежности, горизонтальной и вертикальной расширяемости ИСППР предлагается использовать два сервера: сервер баз данных, использующий СУБД MSSQL или Oracle; и сервер принятия решений, который может быть в относительно короткий срок настроен при условии использования в качестве основы для организации информационных и управляющих потоков серверного программного обеспечения компании SAS или стандартной системы создания бизнес-процессов компании Business Objects (дочерняя компания SAP). В случае выбора решения от SAS более простым будет организовать репозиторий моделей, ежедневную работу с моделями и их периодическую адаптацию и улучшение. В случае выбора решения от Business Objects более просто и эффективно можно будет организовать информационные потоки, систему отчетности и пользовательский интерфейс для пользователей ИСППР. Для максимального удешевления ИСППР всю ее программную часть можно создать на одном сервере, где на платформе Linux установить СУБД Oracle и, используя средства программирования Oracle, организовать репозиторий моделей, бизнес-потоки и отчетность. Для перетренировки моделей можно использовать программное обеспечение, созданное в рамках данной работы.

Потоки данных в ИСППР будут организованы следующим образом. Данные из трех основных источников: Гидрометецентра, АСКУЭ Облэнерго и систем сбора телеметрической информации теплогенерирующих предприятий будут поступать в блок очистки, сортировки и преобразования, который будет организован как набор хранимых процедур на сервере БД. Подготовленные данные будут подаваться в блок формирования метеосценариев для преобразования метеоданных в базовые метеосценарии по методике описанной в [6]. Также подготовленные данные будут передаваться в БД для построения моделей, которая организована как три отдельных хранилища, по одному для каждого типа моделей: прямой прогноз, прогноз изменения и прогноз категорий. Предварительная подготовка и обработка данных для каждого типа моделей должна осуществляться согласно методологии описанной в [6]. Получение новых данных (по умолчанию система работает ежесуточно, однако может быть настроена на работу с любой периодичностью) автоматически инициирует их подготовку и распределение, после чего подготовленные данные поступают на вход активных прогнозных моделей. Активные модели хранятся в репозитории активных моделей, расположенном на сервере принятия решений. Для каждого теплофикационного района города создается и хранится по три модели каждого типа.

Согласно правилам использования моделей, задаваемых администратором ИСППР, блок выбора моделей определяет какие типы моделей для каждого из районов города необходимо активировать для

получения соответствующего прогноза. Затем блок автоматически начинает выполнять операцию по прогнозированию спроса на электрическую энергию на новые сутки (или другой заданный в правилах период времени) для каждого из районов. При каждом получении новых данных также автоматически инициируется работа блока тренировки и улучшения моделей. Данный блок проверяет, подтвердились ли за прошедшие сутки прогнозы, сделанные активными моделями накануне, для чего извлекает данные из БД истории прогнозов. Для каждой активной модели, если спрос на электроэнергию был спрогнозирован правильно, т.е. в пределах установленной погрешности, делается вывод, что нейронная сеть данной модели не нуждается в дополнительной тренировке, и блок завершает свою работу. Если точность прогноза недостаточна, и необходима перетренировка модели, то блок начинает цикл тренировки по известным примерам потребления, а также новым эпизодам, поступившим в БД для построения моделей после последней тренировки данной модели.

Затем, согласно правилам, установленным администратором ИСППР, блок загружает новые модели в репозиторий активных моделей на место предыдущих. Простейшим правилом может быть просто условие улучшения качества модели. При этом предыдущие модели, вместе со статистическими результатами их работы, сохраняются в БД истории моделей и их качества для дальнейшего анализа эффективности работы системы, ошибок администратора или неточностей в построении правил работы с моделями.

Блок тренировки нейронной сети реализует следующие этапы работы.

1. Блок подает на входы модели набор тренировочных сигналов, для которых известен правильный выход модели.
2. Модель генерирует на своем выходе сигнал прогноза, который поступает в блок для анализа.
3. Блок сравнивает сигнал прогноза с правильным выходом модели из набора тренировочных сигналов. Если они не совпадают, блок корректирует параметры нейросетевой модели согласно алгоритму тренировки. Для моделей прямого прогноза и прогноза изменения это алгоритм Левенберга-Марквардта, для моделей прогноза категорий это алгоритм Фалмана.
4. Блок тренировки выбирает новый набор тренировочных сигналов и повторяет пункты 1–3, пока погрешность прогноза по всем тренировочным сигналам не станет меньше заданного уровня или пока работа модели не удовлетворит набор правил, заданных администратором ИСППР.

На этапе прогнозирования выполняются те же пункты 1–2, что и на этапе тренировки моделей. Одновременно прогнозные данные накапливаются в БД прогнозов.

Основным автоматизированным рабочим местом системы является место администратора ИСППР. С его помощью он решает следующие задачи:

- задает и управляет правилами использования моделей;
- задает и управляет правилами тренировки и улучшения моделей;

- оценивает результаты работы активных моделей и их истории;
- постоянно адаптирует текущие модели и правила работы с ними;
- по запросу предоставляет нестандартные или комбинированные виды прогнозов, для чего может в ручном режиме тренировать и запускать модели.

Следующим по важности является рабочее место специалиста РКЦ. Он анализирует полученные прогнозы, корректирует планы распределения электрических и тепловых мощностей по районам и представляет полученные прогнозы для анализа ежедневным собранием РКЦ, принимающим окончательные решения.

Такие ежедневные собрания РКЦ с участием топ-менеджеров ключевых организаций регионального ТЭК можно проводить виртуально в видеорежиме. При правильной организации и удобном графическом представлении результатов прогноза (с использованием карты и сравнительных графиков) собрания могут занимать 10–20 минут. При этом степень координации между региональными генерирующими, распределяющими и снабжающими предприятиями энергетики региона, а также и регулируемыми организациями ТЭК значительно повысится. Значительно увеличится скорость и синхронность совместной реакции на возможные критические ситуации в энергоснабжении региона. Все это позволит значительно повысить эффективность работы регионального ТЭК.

Сокращение времени принятия решения, а также возможность автоматизировать принятие решений в некоторых случаях особенно просто и практически прозрачно достигаются при прогнозировании категории изменения энергопотребления. Благодаря тому, что прогноз выдается как тип изменения спроса, лицам, принимающим участие в ежедневном собрании РКЦ, нет необходимости оперировать точными цифрами и границами потребления по каждому району. Используя тип изменения спроса, РКЦ (или даже на более низком уровне – диспетчер энергогенерирующего предприятия) способен быстро установить необходимую последовательность действий, которую нужно выполнить, во избежание потерь эффективности или надежности энергоснабжения региона.

Так если в результате прогнозирования будет установлена одна из категорий положительных приростов спроса на электроэнергию, нужно или увеличить генерацию, если это возможно и экономически обоснованно, или связаться с потребителями-регуляторами и предупредить их о необходимости уменьшения объемов собственного энергопотребления на определенное время. В зависимости от уровня прироста и других экономических и социальных факторов, известных РКЦ, выбирается тип и количество регуляторов-потребителей, которым необходимо будет снизить потребление. Данное решение может быть задано в виде набора правил, т.е. конечное решение будет автоматически предлагаться для утверждения и за него необходимо будет проголосовать или изменить его с учетом ситуации.

В простейшем случае прогнозируемые типы изменений спроса могут отображаться в виде текстовых сообщений, например: «Прогнозируется значительное увеличение электропотребления в бытовом секторе – можно компенсировать крупными регуляторами-потребителями. Доступны следующие варианты компенсации: а) ... б) ... и т.д.». Второй вариант отображения представляет собой вывод набора прямых указаний к действиям, например: «Предупредить потребителя-регулятора А о необходимости снизить электропотребление завтра на такую-то величину».

Прямо противоположная ситуация будет происходить, если в результате прогнозирования будет выбрана одна из категорий сигнализирующих об уменьшении спроса в коммунально-бытовом секторе. В этом случае согласно предложенных ИСППР вариантов необходимо будет связаться с промышленными потребителями-регуляторами и предупредить их о необходимости увеличения объемов собственного энергопотребления на определенное время.

Согласно текущей ситуации при конкретном внедрении ИСППР могут создаваться дополнительные рабочие места для диспетчеров или энергоменеджеров генерирующих компаний, Облэнерго и работников соответствующих структур местных органов власти, в которых перечень, вид и формат отображаемой информации будут ограничены соответствующими районами и полномочиями конкретных организаций.

Выводы. Использование предложенной ИСППР на базе прогностических моделей энергопотребления сможет обеспечить эффективную работу регионального координационного центра при ежедневном анализе и управлении ситуацией в региональном ТЭК. Помимо этого ИСППР может быть использована диспетчерским персоналом служб контроля и управления энергопотреблением в энергоснабжающих компаниях для повышения экономической эффективности их работы.

Список литературы: 1. Вороний Н. И. Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях / Н. И. Вороний, Н. Н. Новицкий и др. - Новосибирск: Наука, 1995. - 335с. 2. Баринов В. А. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / В. А. Баринов, А. З. Гамм и др. - М.:МЭИ, 2000. - 648 с. 3. Вороновский Г. К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / Вороновский Г. К. - Х.: Изд-во «Харьков», 2002 - 240 с. 4. Вороненко Д. И. Опыт синтеза и применения прогностических моделей на базе прямонаправленных нейросетей / Д. И. Вороненко, Г. К. Вороновский // Вестник науки и техники. - Харьков: ООО «ХДНТ», 2004. - № 2-3 (17-18), С. 56-62. 5. Вороненко Д. И. Использование каскадных нейросетей Фалмана для прогнозирования связанного потребления электричества и тепла / Д. И. Вороненко // Вісник НТУ «ХПИ». — 2004. - №43 —Т.1. - С. 93-97. 6. Вороненко Д. И. Классификация метеорологических сценариев для использования в предикторах энергопотребления жилых массивов города / Д. И. Вороненко // Проблемы региональной энергетики АН Респ. Молдова, Институт Энергетики. – 2008. - №3(8). - С. 65-72.

Вороненко Дмитрий Иванович закончил кафедру «Электрические станции» НТУ «ХПИ» в 2007 году.

О.А. ГАЙДАЙ, магистр, НТУ «ХПИ»

Л.И. ЛЫСЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЗАТРАТ В КОМБИНИРОВАННОМ ЦИКЛЕ ТЭЦ

Проаналізовані різні методи ціноутворення, з урахуванням рознесення витрат між електричною і тепловою енергіями при їх сумісному виробництві в комбінованому циклі ТЕЦ. Наведено приклад розрахунку тарифів на теплову енергію, що виробляється ТЕЦ, розглянутими методами і проведено порівняльний аналіз одержаних результатів

Different pricing mechanisms taking into account costs attribution between electrical and thermal energy generation in a CHPP combined cycle are considered. A thermal power rate for a CHPP is calculated with the techniques, obtained results analyzed.

При формировании тарифов на электрическую и тепловую энергию при их совместном производстве важное значение имеет обоснованное разнесение затрат между ними. Формирование тарифов на тепловую энергию крупных ТЭЦ зависит от величины доли топлива на выработку электроэнергии.

Текущее положение ТЭЦ Украины на рынке тепла можно охарактеризовать как достаточно сложное. В результате общего экономического спада потребление тепла промышленностью резко сократилось. В итоге основными его потребителями от ТЭЦ остались предприятия бюджетной сферы и жилищный фонд, т.е. основные неплательщики. Положение усугубляет и разделение газа на так называемый коммунальный и промышленный, что привело к использованию ТЭЦ в неэкономичном режиме котельных (с удельными расходами до 250 кг.у.т. на 1 Гкал). Все это негативно сказалось на общих экономических показателях ТЭЦ и резко снизило их конкурентоспособность.

Однако основной причиной снижения конкурентоспособности тепла, вырабатываемого на ТЭЦ, явились завышенные тарифы на тепловую энергию вследствие несовершенства действующей методики распределения топлива на ТЭЦ между тепловой и электрической энергиями, в основу которой положен физический метод.

Физический метод предусматривает разделение затрат на электрическую и тепловую энергию пропорционально израсходованному топливу. При этом вся экономия топлива от комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ относится на электрическую энергию, а значительная часть остальных текущих затрат (кроме затрат на топливо) распределяется на отпущенную тепловую и электрическую энергию пропорционально расходу топлива [1-3]. Тем самым устанавливаются высокие цены на тепловую энергию, что делает неконкурентоспособными

системы централизованного теплоснабжения [4].

Кроме физического метода, рассматриваются и другие методы ценообразования, учитывающие распределение комплексных затрат в комбинированном цикле ТЭЦ, среди которых можно отметить следующие:

- эксергетический,
- нормативный,
- экономический.

Эксергетический метод базируется на энергетической ценности тепловой энергии разного потенциала, при этом преимущества комбинированного теплофикационного цикла приходятся на отпуск тепловой энергии и в качестве полезной продукции признается лишь та часть энергии, которую можно преобразовать в механическую работу (эксергию) [3,5].

Нормативный метод распределения расхода топлива на ТЭЦ между электрической и тепловой энергией основан на применении принятых нормативных удельных расходов топлива. Здесь предусматривается распределение топлива между электрической и тепловой энергией, вырабатываемой на ТЭЦ, пропорционально расходу топлива при выработке того же количества электрической и тепловой энергии в раздельной схеме, а распределение постоянных затрат производится пропорционально стоимости топлива, относимой на производство тепла и электроэнергии [2].

Экономический, или рыночный метод, заключается в определении экономически обоснованных тарифов на каждый вид продукции, т.е. тепло и электроэнергию. При этом тариф на тепло для котельных может устанавливаться с учетом дотаций, а тариф на тепло для ТЭЦ не должен превышать тариф для котельных. Все остальные затраты по ТЭЦ отнесены на электроэнергию [6].

Для проведения сравнительного анализа был выполнен расчет затрат топлива на тепловую энергию, вырабатываемую ТЭЦ с установленной электрической мощностью 540 МВт и тепловой мощностью 1798 Гкал/час, указанными методами.

В физический метод распределения затрат расходы топлива на производство тепловой и электрической энергии при использовании физического метода определяются по формулам, соответственно:

$$B^{ТЭЦ} = \frac{Q_T^{ТЭЦ}}{Q_P \cdot h_T}, \quad (1)$$

$$B_y^{ТЭЦ} = B_y^{ТТЭЦ} + B_y^{ЭТЭЦ}, \quad (2)$$

где $B_y^{ТЭЦ}$, $B_y^{ТТЭЦ}$ и $B_y^{ЭТЭЦ}$ — условные расходы топлива: соответственно, общий по ТЭЦ, на производство тепловой и электрической энергии, т.у.т.; $B^{ТТЭЦ}$ - годовой расход натурального топлива на выработку тепла на ТЭЦ,

$\text{м}^3/\text{Гкал}$; $Q_T^{\text{ТЭЦ}}$ — количество отпущенного тепла потребителю, Гкал; Q_p^{H} — низшая теплота сгорания рабочего топлива, ккал/ м^3 ; $\eta_T^{\text{ТЭЦ}}$ — КПД ТЭЦ по производству теплоты, доли.

По эксергетическому методу удельный расход условного топлива на единицу эксергии равен [7]:

$$b_e = \frac{B_y^{\text{ТЭЦ}}}{E_э + E_T}, \quad (3)$$

где $E_э$ и E_T — эксергии электрической и тепловой энергий соответственно, ГДж.

$E_э$ вычисляется простым пересчетом единиц измерения по формуле:

$$E_э = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \mathcal{E}_Г, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_Г$ - годовая выработка электроэнергии, кВт·ч/год.

E_T рассчитывается по формуле:

$$E_T = \sum (\tau_{ei} \cdot Q_i), \quad (5)$$

где i — порядковый номер отбора пара определенных параметров; Q_i — количество тепла, отбираемого из i -го отбора, ГДж/год; τ_{ei} — эксергетическая функция i -го отбора, определяемая выражением:

$$\tau_{ei} = 1 - \frac{T_{\text{oc}}}{T_{\text{cp},i}}, \quad (6)$$

где T_{oc} — температура окружающей среды, К; $T_{\text{cp},i}$ — средняя температура преобразующегося пара, К.

По значению E_T по известной зависимости $B_y = E \cdot b_e$ определяется годовой расход топлива на выработку тепла $B_y^{\text{ТЭЦ}}$:

$$B_y^{\text{ТЭЦ}} = E_T \cdot b_e, \quad (7)$$

Согласно **нормативному методу** топливо на ТЭЦ распределяется между электрической и тепловой энергией согласно принятых нормативных удельных расходов топлива. Для Харьковской ТЭЦ-5 годовые расходы условного топлива на производство электрической и тепловой энергии составляют соответственно 278,60 тыс.т.у.т. и 148,80 тыс.т.у.т.

В **экономическом методе** рассматриваются экономические критерии эффективности ТЭЦ. Критерием целесообразности комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ТЭЦ является положительная величина экономического эффекта, при расчете которого используется величина расхода топлива, определяемая по следующей формуле.:

$$B_T^{\text{ТЭЦ}} = B_y^{\text{ТЭЦ}} - b_{\text{зам}} \cdot \mathcal{E}_{\text{отп}}, \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отп}}$ - полезный отпуск электроэнергии на ТЭЦ, кВт·ч; $b_{\text{зам}}$ — удельный расход топлива на замыкающей КЭС, г.у.т./кВт·ч.

Формула (8) основана на том, что если бы не создавалась ТЭЦ, то для выработки электроэнергии вводилась бы КЭС с удельным расходом топлива $b_{\text{зам}}$.

Ряд авторов [8,9] предлагает новый «экономический» подход к тарифообразованию, а именно: рассчитывать тарифы на электрическую и тепловую энергию, произведенную на ТЭЦ, без деления топлива в технологическом цикле теплоэлектроцентрали, поскольку не существует одного, бесспорного и безупречного способа разделить расход топлива на ТЭЦ между электрической и тепловой энергией. Для этого необходимо выбрать механизм ценообразования, позволяющий обойтись без этого деления при определении отдельной себестоимости электрической и тепловой энергии.

Оценивая отдельно прибыльность электрической и тепловой энергии, выработанной в комбинированном цикле, производство одного вида энергии оказывается прибыльным, а другого — убыточным, но невозможно отказаться от производства одного из видов энергии, сохранив эффективное производство другого.

Наиболее наглядной иллюстрацией ситуации в разделении топлива на ТЭЦ является известный треугольник Гинтера (рис. 1.).

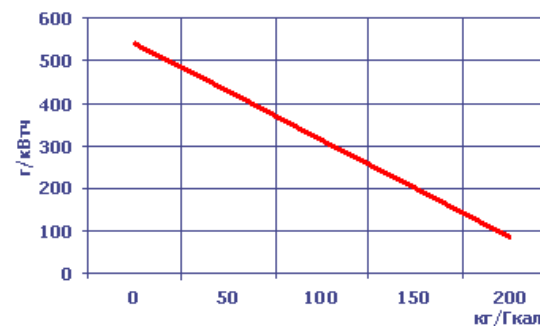


Рис. 1.

Треугольник Гинтера отражает в системе координат «удельный расход топлива на электроэнергию- удельный расход топлива на тепло» множество точек, которые соответствуют всем возможным способам деления расхода топлива между продуктами ТЭЦ, включая крайние возможности отнесения всего расхода только на электрическую и только на тепловую энергию. Методы деления топлива отличаются между собой тем, что указывают на разные точки этого треугольника, но при этом каждый отдельный метод

соответствует только одной точке графика.

В ходе исследований [8,9] были сформулированы статистические требования к идеальному методу разделения топлива между производством электроэнергии и тепла. Они выражаются в минимизации дисперсии, минимизации средней стандартной ошибки в регрессионном анализе и приближении к 1 модуля коэффициента корреляции между удельными расходами топлива на электрическую и удельными расходами топлива на тепловую энергию.

Для расчёта годового расхода топлива на производство тепловой энергии по четырём методам использовались данные Харьковской ТЭЦ-5 за 2006 год, представленные в табл. 1.

Таблица 1- Исходные данные по ТЭЦ-5

Величина	Обозначение	Единица измерения	Значение
Годовой расход условного топлива общий по ТЭЦ	$B_y^{ТЭЦ}$	тыс.т.у.т.	372,43
Количество отпущенного тепла потребителю за год	$Q_T^{ТЭЦ}$	Гкал	716
Низшая теплота сгорания рабочего топлива	Q_p^H	ккал/м ³	8386,65
КПД ТЭЦ по производству теплоты	$\eta_T^{ТЭЦ}$	доли	0,87
Годовая выработка электроэнергии	$\mathcal{E}_Г$	млн.кВт·ч/год	1030
Количество тепла, отбираемого из <i>i</i> -го отбора	Q_i	тыс.ГДж/год	3008,4
Средняя температура преобразующегося пара	$T_{ср.i}$	К	498
Температура окружающей среды	$T_{о.с.}$	К	288
Полезный отпуск электроэнергии на ТЭЦ	$\mathcal{E}_{отп}$	млн.кВт·ч	954
Удельный расход топлива на производство электроэнергии на замыкающей КЭС	$b_{зам}$	г.у.т./кВт·ч	278,6

Результаты определения расхода топлива на производство тепловой энергии на ТЭЦ по рассмотренным четырём методам представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Результаты расчёта расхода топлива на тепло

Метод разделения расхода топлива на ТЭЦ	Значение $B_y^{ТЭЦ}$, т.у.т.
1. Физический	117,57 тыс.
2. Эксергетический	94,89 тыс.
3. Нормативный	148,80 тыс.
4. Экономический	106,65 тыс.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что физический метод распределения комплексных затрат на производство электрической и тепловой энергии по комбинированному циклу, лежащий в основе расчета тарифов на тепловую энергию, не является бесспорным при определении себестоимости производства тепла. Однако и другие методы не дают оптимального разделения затрат топлива между электрической и тепловой энергией на ТЭЦ. Ни один из представленных методов не отражает реальной картины комбинированного цикла на ТЭЦ, удешевляя или удорожая производство одного из видов производимой энергии.

По результатам расчёта построен треугольник Гинтера для зависимости расхода условного топлива на электроэнергию от расхода условного топлива на теплоэнергию (рис. 2.). Согласно этому графику, эксергетический метод удешевляет тепло на треть по сравнению с нормативным, который максимально приближает расход на тепло к расходу на электроэнергию. Физический метод завышает расход на теплоэнергию. Экономический метод даёт среднее, по сравнению с эксергетическим и физическим методами, значение расхода топлива на тепло.

Треугольник Гинтера

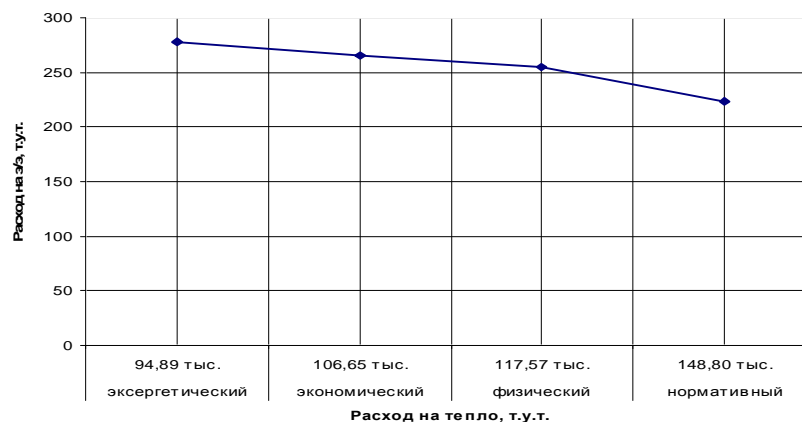


Рис. 2 .

Выводы. Все методы, кроме экономического, оценивают техническую сторону работы ТЭЦ и в качестве основы формирования тарифа используют разделение топлива между видами энергии. Первый и самый главный недостаток разделения расхода топлива между электрической и тепловой энергией – это грубое искажение оценки экономической эффективности работы ТЭЦ. Следовательно, необходима такая оценка по совокупному продукту: если комбинированное производство дает преимущество в себестоимости совокупного продукта по сравнению с отдельным производством, то ТЭЦ выгодна, если же нет – то следует от нее отказываться. В таком подходе самый приближенный к рыночной экономике метод – экономический.

Список литературы: 1. *Покровский Л.Л.* Распределение топлива при производстве энергии на ТЭЦ / *Покровский Л.Л., Тарадай А.М., Русланов Г.В.* // *Новости теплоснабжения.* - 2000. - №2. 2. *Денисов В.И.* Задачи совершенствования тарифов при переходе к рыночным отношениям / *В.И. Денисов* // *Электрические станции.* -1994. -№6. 3. *Яркин Е.В.* Особенности регулирования тарифов на энергию в условиях акционерной формы собственности / *Е.В. Яркин* // *Электрические станции.* -1994. - №6. 4. *Шаргут Я.Я.* Распределение затрат на производство тепла и электроэнергии на ТЭЦ / *Шаргут Я.Я.* - *Теплоэнергетика.* - 1994. - №12. - С. 62-66. 5. *Даукеев Г.Ж.* Эксергетический метод распределения расходов топлива на электрическую и тепловую энергию / *Г.Ж. Даукеев, В.Д. Огай* // *Проблемы реформирования рынка электрической энергии в Казахстане: сб. тр. по материалам совместного научно-практического семинара.* - Ч. 1. - Алматы АИЭС, 1998. - С. 49 – 55. 6. *Сафонов Л. П.* Экономический метод / *Л. П.Сафонов, Ю. В. Смолкин, П. П. Суворов* // *Электрические станции.* - 1991. - №4. 7. *Бродянский В.М.* Эксергетический метод и его приложения / *В.М. Бродянский, В.Фраттиер, К. Михалек;* под ред. *В.М.Бродянского.* - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 288 с. 8. *Хараим А.А.* // *Новости теплоснабжения.* - 2003. - №11. 9. *Стерман Л.С.* Сопоставление экономичности теплофикационных установок, рассчитанной различными методами / *Л.С.Стерман, С.Г.Тишин, А.А. Хараим* // *Вестник МЭИ.* - 1996. - № 2. - с.77-80.



Лысенко Людмила Ивановна - выпускница физико-технического факультета НТУ ХПИ (1982 г.). Круг научных интересов: применение методов эволюционного моделирования для решения задач электромеханики и энергетики, применение нетрадиционной энергетики для целей тепло- и электроснабжения, анализ рыночных моделей в электроэнергетике.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.316.786

Д.А.ГАПОН, старш. преподаватель, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ МЕТОДОМ СКАНИРОВАНИЯ ПО АЦП

В роботі виконано розрахунок методичної погрішності при визначенні частоти промислової мережі по переходах сигналу через заданий рівень. Моменти переходу визначаються шляхом лінійної інтерполяції сигналу від АЦП. Зроблені висновки про шляхи зниження відзначеної погрішності.

Systematic errors in determining the frequency of industrial network of transitions signal through a specified level are considered. Transition points are determined by linear interpolation of the signal from the ADC. Conclusions about ways to reduce the errors are made.

Введение. Актуальность проблемы совершенствования системы автоматической частотной разгрузки (АЧР) подтверждается значительным количеством публикаций выпускающихся как в Украине так и за рубежом. Одним из основных направлений работ является разработка новых или усовершенствование старых методов измерения частоты с целью повышения функциональных качеств системы АЧР. Основными требованиями к математическому аппарату метода измерения промышленной частоты, которые и определяют направление исследований, являются [1]: 1) высокое быстродействие (1...5 периодов основной гармоники); 2) высокая точность (до 0.01 Гц); 3) высокая устойчивость к помехам и искажениям исходного сигнала; 4) возможность реализации метода на современных вычислительных средствах в реальном времени.

Так, для реализации большинства разрабатываемых методов, способных удовлетворить вышеперечисленные требования, необходимы значительные вычислительные мощности, что, в свою очередь, приводит к удорожанию и снижению надежности конечных устройств [2,3]. На практике же наиболее часто применяемым методом определения частоты промышленной сети является метод определения периодов сигнала по моментами переходов сигнала через заданный уровень и, в частности, через нулевой уровень, так как он наиболее прост в реализации и обладает достаточными характеристиками.

Постановка задачи. Как правило, при определении момента пересечения применяется линейная интерполяция сигнала, что приводит к возникновению ошибки.

Если напряжение в сети изменяется по синусоидальному закону:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где U_m - амплитуда, ω - частота, а φ - фаза.

Тогда момент пересечения уровня l может быть определен как:

$$t_l = \frac{\arcsin\left(\frac{l}{U_m}\right) - \varphi}{\omega}. \quad (2)$$

Очевидно, что в условиях, когда параметры исходного сигнала являются неизвестными применение формулы (2) на практике является невозможным. Поэтому применяется линейная интерполяция по известным значениям, полученным с помощью аналого-цифрового преобразования (рис 1).

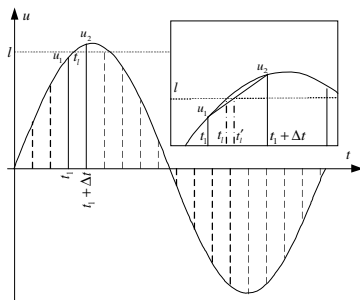


Рис. 1 - Определение моментов пересечения заданного уровня при помощи линейной интерполяции

Тогда, момент пересечения может быть определен как:

$$t'_l = t_1 + \frac{l/U_m - \sin(\omega t_1 + \varphi)}{\sin(\omega(t_1 + \Delta t) + \varphi) - \sin(\omega t_1 + \varphi)} \Delta t. \quad (3)$$

При этом результат приближения может значительно отличаться от истинного значения и зависит от параметров сигнала и частоты дискретизации. Для практической реализации метода необходимо установить характер этой зависимости и диапазон допустимых значений.

Решение задачи. Ошибка определения момента перехода через уровень l :

$$\Delta t_l = t_1 + \frac{l/U_m - \sin(\omega t_1 + \varphi)}{\sin(\omega(t_1 + \Delta t) + \varphi) - \sin(\omega t_1 + \varphi)} \Delta t - \frac{\arcsin\left(\frac{l}{U_m}\right) - \varphi}{\omega}. \quad (4)$$

Максимальное значение будет возникать при:

$$l_m = \pm \frac{U_m \sqrt{\omega^2 \Delta t^2 - a^2 + 2ab - b^2}}{\omega \Delta t}, \quad (5)$$

где $a = \sin(\omega(t_1 + \Delta t) + \varphi)$, $b = \sin(\omega t_1 + \varphi)$.

Подставив полученный результат в (4) можно получить вид зависимости величины ошибки от параметров сигнала, его фазы и частоты дискретизации.

Из соотношений следует, что изменение частоты дискретизации приводит к эффекту, обратному эффекту, связанному с изменением частоты основного сигнала. Причем снижение частоты синусоиды, которое наиболее характерно для условий работы АЧР, приводит к уменьшению величины ошибки интерполяции. Поэтому в дальнейшем исследовалось влияние частоты дискретизации на значение ошибки в относительном масштабе, то есть исходя из числа отсчетов АЦП на один период синусоиды. Полученные результаты сведены в таблицу 1 и показаны на рис.2. Число отсчетов было выбрано от 10 до 100, что соответствует частотам дискретизации от 500 Гц до 5000 Гц при номинальной частоте сети 50 Гц.

Таблица 1 - Величина ошибки при номинальной частоте 50 Гц

Начальная фаза, град	Число отсчетов за период основной частоты					
	10	20	40	60	80	100
0	0,1315	0,0160	0,0020	0,0006	0,0002	0,0001
10	0,2116	0,0340	0,0064	0,0025	0,0013	0,0008
20	0,3088	0,0546	0,0112	0,0046	0,0025	0,0016
30	0,4369	0,0796	0,0169	0,0071	0,0039	0,0024
40	0,6264	0,1130	0,0241	0,0102	0,0056	0,0035
50	0,9616	0,1632	0,0344	0,0145	0,0079	0,0050
60		0,2550	0,0514	0,0214	0,0117	0,0073
70		0,5010	0,0884	0,0357	0,0192	0,0119
80			0,2537	0,0887	0,0451	0,0272

Закключение. Характер полученных зависимостей показывает что, ошибка значительно возрастает при приближении фазы синусоиды к $\frac{\pi}{2} \text{ мрк}$, где $k=1,2,3,\dots$. При переходе через максимум или минимум синусоиды возникает область неопределенности, где линейная интерполяция может дать результат не соответствующий действительному. Поэтому наиболее целесообразно рассматривать моменты пересечения уровней близких к нулевому.

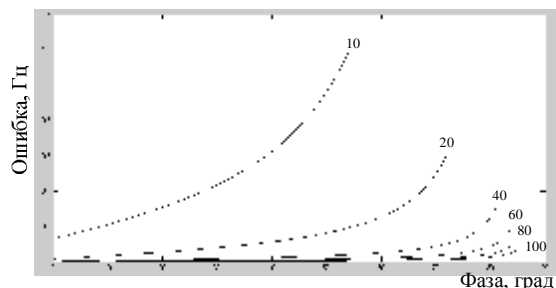


Рис. 2 - Зависимость ошибки от угла и частоты дискретизации

В тоже время, увеличение частоты дискретизации позволяет снизить данный эффект и расширить допустимый диапазон. Так:

1) При числе отсчетов 10...20 точность интерполяции неудовлетворительная;

2) При 40 отсчетах за период допустимые уровни, при которых погрешность удовлетворяет требованиям, находятся в диапазоне 0...0,25 от амплитуды синусоиды;

3) При 100 отсчетах за период применение интерполяции позволяет с достаточной точностью определять моменты перехода через уровни до 0,85 от амплитудного значения.

Таким образом, для данного метода следует рекомендовать частоты дискретизации от 3000 до 5000 Гц. В противном случае необходимо применять альтернативные методы, такие как использование аналоговых компараторов или интерполяцию кривыми более высоких порядков.

Список литературы: 1. Данильчук В.Н. Современная аппаратура частотных автоматик разгрузки, ввода резервов ГЭС, защит и блокировок / В.Н. Данильчук, И.Ф. Нехай, Е.А. Коломиец, В.А. Перетяцько – Электрические сети и системы. – 2008. -№2. – С. 45-64. 2. Jeon Hyeon-Jin Iterative Frequency Estimation Based on MVDR Spectrum / Hyeon-Jin Jeon, Tae-Gyu Chang // IEEE Transactions on power delivery. – 2010. - Vol.25/ - No.2. – P. 621-630. 3. Salcic Zoran An Improved Taylor Method for Frequency Measurement in Power Systems / Zoran Salcic, Sing Kiong Nguang // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2009. - Vol.58. -No.9. - P.3288-3294



Гапон Дмитрий Анатольевич закончил факультет автоматики и приборостроения Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» в 2001 году по специальности «Системы управления и автоматики». Круг научных интересов: автоматическая частотная разгрузка.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.316.925

Н.А. ДЕЙНЕКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

Анализ статистических данных оценки надежности функционирования разных видов оборудования выявил значительное влияние надежности функционирования системы контроля и управления на общие показатели надежности системы электроснабжения. Предлагается уделить особое внимание совершенствованию методов и средств их контроля и испытания, направленного на повышение достоверности контроля, что будет способствовать повышению общей надежности функционирования объектов энергетики.

The statistical data analysis of estimation of reliability of functioning of different types of equipment exposed considerable influence of reliability of functioning of the checking system and management on the general reliability indexes of the system of supply by electric energy. It is suggested to spare the special attention to perfection of methods and facilities of their control and test directed on the increase of authenticity of control, that will be instrumental in the increase of general reliability of functioning of objects of energy.

Вступ. Ефективність функціонування системи електропостачання визначається надійністю роботи її окремих елементів: електростанцій, підстанцій, кабельних і повітряних ліній електропередачі й т.ін. Незважаючи на різноманіття робіт, що проводяться в області надійності функціонування електротехнічного устаткування об'єктів енергетики, забезпечити їх роботоздатність тільки за рахунок високої надійності окремих елементів не представляється можливим, тому що складність системи росте швидше, ніж надійність цих елементів[1-7].

Як відомо, вибір тих або інших показників надійності якого-небудь елемента або ланки системи залежить від характеру їх роботи й від вимог, що ставляться до їх функціонування. Для електроустаткування найчастіше використовують такі показники, як безвідмовність, контролепридатність, ремонтпридатність і т.ін. Разом з тим, необхідно більше звернути уваги на такий критерій, як критерій ефективності функціонування електроустановок.

Основна частина. Якщо критерій технічної досконалості (ефективність функціонування при ідеальній надійності) представити як

$$E_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_{sp}}$$

де Φ_i – математичне очікування вихідного ефекту при реальній технічній досконалості в припущенні ідеальної надійності установки; Φ_{sp} – математичне очікування граничного вихідного ефекту в певних умовах,

то критерій ефективності функціонування установки можна характеризувати відносною часткою граничного ефекту, що забезпечується реальною установкою

$$E = \frac{\Phi_p}{\Phi_{zp}}$$

де Φ_p - математичне очікування реального вихідного ефекту, що забезпечує установка у розглянутих умовах.

Виходячи з наведених співвідношень, можна встановити певний зв'язок між критеріями надійності й критерієм ефективності функціонування

$$E = E_i \cdot R,$$

де $R = \frac{\Phi_p}{\Phi_i}$ - імовірність відсутності відмов у виконанні функцій.

В [8-10] величина R була визначена, як коефіцієнт ефективності функціонування. У цих роботах це співвідношення отримане при використанні теореми множення ймовірностей, однак, область його дії обмежена об'єктами із чіткими рівнями вихідного ефекту - нуль або 100%. Показано, що цей критерій придатний для відповідного класу установок незалежно від їх складності й структури.

Такі критерії є природною мірою відповідних властивостей об'єктів. Наприклад, установка може недодавати в середньому $(1-R) \cdot 100\%$ вихідного ефекту стосовно потенційно можливого рівня при ідеальній надійності, або недодавати в середньому $(1-E) \cdot 100\%$ вихідного ефекту через прояв технічної недосконалості й ненадійності.

Для розглядаємих установок вихідний ефект пропорційний часу правильного функціонування. Після відмови через несправність установка перестає правильно функціонувати й піддається відновленню (налагодженню), після чого вона працює з повною віддачею. Якщо для простоти прийняти, що відмов з інших причин, крім несправності, не відбудеться, то $E_i = 1$. Тоді

$$\Phi_p = \int_0^t K_{\Gamma}(\tau) \cdot b \cdot d\tau; \quad \Phi_{zp} = \Phi_i = b \cdot t,$$

де $K_{\Gamma}(\tau)$ - імовірність того, що установка у момент τ справна; b - коефіцієнт пропорційності.

Звідси

$$E = R = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t K_{\Gamma}(\tau) \cdot d\tau = K_{\Gamma_{cp}}(\tau).$$

Розглянуті критерії ефективності мають сенс тільки за певних умов роботи. Зміна умов спричиняє зміну значень критеріїв. Таким чином, варто більш докладно розглянути особливості функціонування установок, що

підлягають оцінюванню, комплексу ситуацій, у відношенні яких сформульоване їх призначення, комплексу різноманітних впливів на установку в умовах експлуатації, що несуть небезпеку критичних змін у схемах і алгоритмах функціонування.

Тому представляється важливим уточнити постановку основних питань надійності, зосередивши увагу на найбільш важливих напрямках: вибір найбільш надійних схем живлення на основі аналізу показників надійності; виявлення найбільш ненадійних елементів і вживання заходів по підвищенню їхньої надійності; розробка методів і засобів технічного контролю експлуатаційних показників пристроїв, що входять у розглянутий комплекс.

Звичайно при живленні електроенергією споживачів розглядають два характерні види порушення надійності функціонування установок. В одних випадках це відбувається через ушкодження одного із елементів системи і пов'язане з необхідністю його відновлення, тобто витратами часу й матеріальних витрат на виявлення несправності і її усунення. В інших випадках порушення функціонування може відбуватися й без ушкодження, тобто лише при відхиленні вихідних параметрів від встановленого режиму. Звичайно, на відміну від порушень першого виду, порушення другого виду доцільно відзначати не як відмови, а як порушення стабільності живлення (порушення якості функціонування). Для визначення показників надійності в першому випадку використовують дані аварійно-відновлювальної статистики різних елементів системи. У той же час порушення стабільності живлення має внутрішні причини, рівень стабільності може бути визначений параметрами навантажень і колами передачі електроенергії від центрів живлення до споживачів.

Відмови основних елементів системи відбуваються по різним причинам: внаслідок концентрації електричних навантажень, перенапруг, механічних ушкоджень, зносу, метеорологічних факторів і т.п. Аналіз даних показує, що коливання статистичної частоти відмов порівняно невеликі. На цій підставі можна вважати, що усереднені статистичні оцінки частоти $\omega(t)$ і інтенсивності відмов λ устаткування дозволяють у багатьох випадках застосовувати експонентний закон розподілу часу безвідмовної роботи $P(t) = e^{-\lambda t}$. Тобто ймовірність відмови елемента протягом часу t визначається виразом $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, а кількість відмов розподіляється за законом Пуассона

$$P_n(t) = (\lambda t)^n \cdot e^{-\lambda t} / n!$$

де $P_n(t)$ - імовірність n відмов за час t .

В [11, 12] відзначено, що відмови, пов'язані з порушенням стабільності функціонування системи електропостачання (СЕП) через порушення живлення також утворюють найпростіший потік, тобто розподіляються за законом Пуассона.

Показники надійності основних елементів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Найменування	Значення показників безвідмовності елементів ($t = 1$ рік)		
	$\lambda \cdot 10^5, 1/\text{год}$	$P(t)$	$Q(t)$
Лінія вводу 6 і 10 кВ	1,0425	0,9269	0,0731
Роз'єднувач	0,0266	0,9981	0,0019
Масляний вимикач	0,1220	0,9906	0,0094
Трансформатор	0,7233	0,9486	0,0514
Швидкодіючий вимикач	0,3247	0,9766	0,0334
Живильна лінія для живлення:			
централізованого	0,5383	0,9614	0,0386
децентралізованого	0,0781	0,9943	0,0057

Для оцінки надійності функціонування СЕП істотне значення має ремонтпридатність окремих елементів, що визначає час їхнього відновлення. Значення показників ремонтпридатності окремих елементів представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Найменування	Значення показників ремонтпридатності елементів	
	$t_a^*, \text{год}$	$\gamma \cdot 10^3$
Лінія вводу 6 і 10 кВ	86,0	0,897
Роз'єднувач	2,47	0,0007
Масляний вимикач	3,16	0,0041
Трансформатор	43,0	0,311
Швидкодіючий вимикач	3,42	0,0112
Живильна лінія для живлення:		
- централізованого	109,0	0,587
- децентралізованого	15,8	0,0123

У табл. 2 t_a^* - статистичне середнє часу відновлення, γ - коефіцієнт аварійного простою.

$$t_a^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^k n_i} \cdot \left(\sum_{i=1}^k n_i x_i \right),$$

де n_i - кількість ремонтів, тривалість яких попадає в i - інтервал; x_i - середина i - го інтервалу; k - число інтервалів розбивки.

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu},$$

де μ - інтенсивність відновлення елемента.

Результати розрахунків показників надійності для окремих елементів СЕП з урахуванням несправностей системи контролю й управління наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Найменування елемента	Значення показників надійності елемента ($t = 1$ рік)				
	$\lambda \cdot 10^5, \text{год}^{-1}$	$P_d(t)$	$Q_d(t)$	$\gamma_P \cdot 10^3$	$\gamma_Q \cdot 10^3$
Лінія вводу 6 і 10 кВ	1,37	0,9048	0,0952	0,9157	7,226
Перетворювальний агрегат	1,24	0,9130	0,0870	0,4303	9,73
Централізоване живлення лінії	0,935	0,9343	0,0657	0,6104	5,58
Децентралізоване живлення лінії	0,465	0,9665	0,0335	0,0253	4,66

Аналіз наведених даних свідчить про значний вплив надійності функціонування системи контролю й управління на загальні показники надійності всієї системи. При аналізі надійності функціонування системи контролю й управління використовують наступні параметри: потік необхідних спрацьовувань $\lambda_{\text{необх}}$, потік відмов у спрацьовуванні $\lambda_{\text{в}}$, потік помилкових $\lambda_{\text{п}}$ і неселективних $\lambda_{\text{н}}$ дій. Приклади показників надійності пристроїв релейного захисту та автоматики зведені в табл. 4.

Таблиця 4

Найменування пристрою	Параметр потоку, 1/рік			
	$\lambda_{\text{необх}}$	$\lambda_{\text{в}}$	$\lambda_{\text{п}}$	$\lambda_{\text{н}}$
Максимально - струмовий захист (МСЗ)	$(1-0,2) \cdot 10^5$	0,002	0,0014	0,0026
Газовий захист трансформаторів (ГЗ)	$1,4 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,0044	0,0009
Автоматичне включення резерву (АВР)	110	0,012	0,007	-

Щодо пристроїв телемеханіки, то вони досить різноманітні і тому оцінити їхню надійність у цілому не представляється можливим, однак можна констатувати, що більшість порушень функціонування відбувається в схемах формування вимірювальної й сигнальної інформації. Це в першу чергу пов'язане з недоліками якості напруги джерел їхнього живлення, зокрема, з порушенням нормального функціонування відповідних стабілізаторів.

Заключення. Таким чином, в останні роки здійснюється ряд заходів, спрямованих на підвищення надійності електротехнічного устаткування об'єктів енергетики. До числа цих заходів відносяться: підвищення якості конструкції елементів, що входять до складу цих об'єктів; підвищення якості технології їхнього виготовлення; підтримка правильного режиму функціонування; належна організація контролю їхнього технічного стану, а також технологія проведення профілактичних заходів. Звідси відносно високі

статистичні показники роботи розглянутого встаткування. Але отримані дані можуть стати основою лише для загальних рекомендацій і тепер недостатньо даних, заснованих на кількісному аналізі умов профілактичного обслуговування СЕП і, зокрема, обслуговування системи контролю й управління. Тому в удосконалюванні організаційних форм обслуговування є чималий резерв для підвищення достовірності контролю технічного стану цих пристроїв. Зокрема, необхідно застосовувати заходи щодо підвищення рівня ремонтно- і контролепридатності самих пристроїв, удосконалюванню методів і засобів контролю й випробування, спрямованих на підвищення достовірності контролю, поліпшенню умов праці й підвищенню кваліфікації обслуговуючого персоналу, організації робочих місць, і, нарешті, автоматизації технологічних операцій, що знижують вплив на надійність функціонування суб'єктивних факторів обслуговуючого персоналу. Запропоновані заходи мають сприяти підвищенню надійності функціонування, а також по-новому вирішувати завдання експлуатації й ремонту електроустановок, що приведе до зменшення числа відмов електроустановок, а також підвищенню загальної надійності роботи СЕП.

Список літератури: 1. Буряк В.Н. Эксплуатация систем электроснабжения / В.Н.Буряк - Харьков: ХВВКИУ, 1982. - 460 с. 2. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович и др. - К.: Наукова думка, 1992. - 311 с. 3. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 378 с. 4. Дейнеко Н.А. Влияние условий эксплуатации на надежность устройств релейной защиты и автоматики систем электроснабжения городского электрического транспорта / Н.А. Дейнеко // Коммунальное хозяйство городов.- Харьков, 1999. - Вып. 20. - С.141 – 143. 5. Ефремов И.С. Надежность тяговых подстанций городского транспорта / И.С. Ефремов Т.И. Лаптева. - М.: Транспорт, 1975. - 175 с. 6. Загайнов Н.А. Повышение эффективности и надежности оборудования электроснабжения ГЭТ / Н.А.Загайнов, Т.И.Лаптева. - М.: Транспорт, 1974. - 56 с. 7. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А.Н. Назарычев; под ред. В.А. Савельева; Иван.гос.ун-т. – Иваново, 2202. – 168 с. 8. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. - Л.: Судостроение, 1971. - 456 с. 9. Сыромятников И.А. Некоторые вопросы применения вероятностных и статистических методов в энергетике / И.А. Сыромятников // Электричество. - 1964. - №8. - С. 16 - 18. 10. Техническая диагностика. - М.: Наука, 1972. - 586 с. 11. Краснов Б.Д. Показатели безотказности и ремонтпригодности устройств систем электроснабжения трамвая и троллейбусов /Б.Д. Краснов, Д.К. Томлянович // Городской транспорт. - 1970. - №7. - С. 114 - 123. 12. Кузнецов С.М. Эксплуатация и ремонт тяговых подстанций городского электрического транспорта / С.М. Кузнецов, Л.Н.Ефремов. - М.: Транспорт, 1981. - 311 с.



Дейнеко Наталья Анатольевна закончила Харьковской государственной академии городского хозяйства (1990). Круг научных интересов: контроль технологического состояния электрооборудования систем электроснабжения.

Надійшло до редколегії 03.09.2010

УДК 621.316: 621.316.1

А.В.ЕФИМОВСКИЙ, соискатель, НТУ «ХПИ»
Ю.В. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Розглянуто питання про доцільність використання синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності. Дана порівняльна характеристика компенсації за допомогою синхронного двигуна і конденсаторних батарей.

A question is considered about expedience of the use of synchronous engines for indemnification of reactive power. Comparative description of indemnification is given by a synchronous engine and condensers batteries.

Постановка проблемы. В настоящее время прирост потребления реактивной мощности (РМ) существенно превышает прирост потребления активной. Вследствие чего увеличиваются перетоки РМ. РМ, протекая по элементам электрической сети, обладающим активным сопротивлением вызывает в них дополнительные потери мощности и электрической энергии. Кроме того, перетоки РМ снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, либо вынуждают увеличивать сечение проводов, осуществляют прокладку дополнительных кабельных линий, замену трансформаторов на большую номинальную мощность. Большая часть этих потерь приходится на сети 0,4 – 10 кВ, так как в этих сетях находятся основные потребители РМ: асинхронные двигатели, силовые трансформаторы и электробытовые приборы и лампы. Долевое участие этих потребителей составляет 50, 25 и 10% соответственно [1]. Также всё большую долю в общем объёме суммарных нагрузок занимают приёмники с нелинейными характеристиками и повышенным потреблением РМ. Поэтому именно в этих сетях наиболее эффективно устанавливать источники реактивной мощности (ИРМ) с помощью которых и осуществляется компенсация реактивной мощности (КРМ) [2]. Наряду со специальными средствами КРМ, в качестве ИРМ в большинстве источников [] рекомендуют в первую очередь использовать синхронные двигатели (СД), если они уже установлены у потребителя из технологических соображений. Например, СД находят применение в молотковых дробилках и шаровых мельницах горнорудных предприятий, в буровых лебедках нефтяной промышленности, в ножницах и пилах для металла, в непрерывных прокатных станах в металлургии и т. д. [3,4].

Рассматривая СД, как компенсатор РМ, можно отметить его преимущества и недостатки. Одним из преимуществ является плавность регулировки величины отдаваемой или потребляемой РМ (такая

необходимость может возникнуть в ночное время, когда в сети наблюдается избыток РМ). Это достигается путём изменения тока возбуждения двигателя. Основным недостатком использования СД в качестве КРМ – большая удельная величина потребляемой активной мощности на выработку реактивной. Например, дополнительные потери активной мощности в СД превышают в 5-12 раз (в зависимости от типа СД, его конструкции, загрузки по активной мощности) потери в конденсаторной батарее (КБ) [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Практически во всей литературе [3-8] говорится о том, что достаточно мощные СД (250 кВт и выше) выгодно использовать в качестве компенсирующего устройства, если на предприятии они уже установлены из технологических соображений. В частности в [8] на примере доказывается целесообразность использования СД для КРМ и рассчитана экономическая выгода, которую получает потребитель. Однако в [9] данные результаты были поставлены под сомнение и на том же примере показано, что СД не выгодно использовать в режиме генерации РМ.

Цель статьи. Определить действительно ли во всех случаях целесообразно использование СД для КРМ в сетях потребителя.

Основные материалы исследований. Используя исходные данные приведенные в [8], был произведен расчёт потерь активной и реактивной мощности в сети с СД, приведенной на рис. 1.

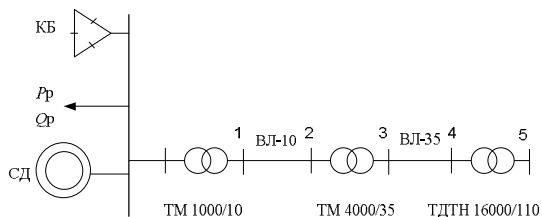


Рис. 1 - Схема электрической сети с СД, используемых для компенсации реактивной мощности

Расчётная активная и реактивная нагрузки потребителя составляют $P_p=560$ кВт и $Q_p=420$ квар соответственно. Число часов максимума использования нагрузки составляет $T_m=3,5$ ч/сут, а время максимальных потерь $t_m=1,53$ ч/сут.

Номинальная активная мощность СД составляет $P_{СДном}=250$ кВт. Номинальный коэффициент мощности $\cos j = 0,9$ (опережающий ток).

Коэффициенты удельных потерь активной мощности в СД: $D_1=1,74$ кВт, $D_2=2,18$ кВт. Коэффициент загрузки СД по активной мощности $b_{СД}=0,8$.

По условию устойчивой работы СД, минимальную величину располагаемой реактивной мощности СД можно определить как [2]:

$$Q_{ген} = P_{СДном} \cdot \beta_{СД} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} j$ коэффициент реактивной мощности СД, соответствующий номинальному коэффициенту мощности $\cos j = 0,9$.

Следовательно, величина минимальной реактивной мощности генерируемой рассматриваемым СД составляет 96 квар. Также заметим, что если двигатель недогружен по активной мощности, то его можно дополнительно загрузить по реактивной. Величину максимальной РМ отдаваемой двигателем можно определить по номограммам [10].

Активные потери в СД, которые идут на выработку РМ, можно определить по следующей формуле [11]:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} \quad (2)$$

Необходимо отметить, что данная формула является приближённой, потому что величина ΔP зависит не только от генерируемой РМ СД $Q_{СД}$, но и от загрузки двигателя по активной мощности, изменению напряжения подводимого к статору, остальных параметров СД [5].

Был произведен расчёт потерь в сети, приведенной на рис. 1 для четырёх режимов ее работы: 1) В сети потребителя отсутствуют устройства КРМ; 2) КРМ осуществляется только с помощью СД (генерация РМ СД 96 квар); 3) КРМ осуществляется с помощью СД и КБ (генерация РМ 96 квар и 320 квар соответственно); 4) КРМ осуществляется с помощью КБ (генерация РМ КБ 420 квар);

Результаты расчётов сведены в табл. 1. (индексы нагрузок и потерь от 1 до 5 соответствуют точке сети, приведенной на рисунке).

Таблица 1

	Без КРМ	КРМ с помощью СД	$d 1$	КРМ с помощью СД+КБ	$d 2$	КРМ с помощью КБ	$d 3$
	2	3	4	5	6	7	8
P_n , кВт	760	763,11	+3,11	764,00	+4,00	761,26	+1,26
Q_n , квар	420	324,00	-96,00	4,00	-416,00	0,01	-419,99
S_n , кВА	868,3	829,04	-39,29	764,01	-104,32	761,26	-107,07

ΔP_1 , кВт	10,74	10,01	-0,73	8,87	-1,87	8,82	-1,92
--------------------	-------	-------	-------	------	-------	------	-------

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ΔQ_1 , квар	55,47	51,80	-3,67	46,10	-9,37	45,87	-9,60
$P_{\Sigma 1}$, кВт	770,7	773,12	+2,38	772,87	+2,13	770,08	-0,66
$Q_{\Sigma 1}$, квар	475,7	375,80	-99,67	50,10	-425,37	45,88	-429,59
$S_{\Sigma 1}$, кВА	905,6	859,62	-45,99	774,49	-131,11	771,45	-134,15
ΔP_2 , кВт	1,48	1,33	-0,15	1,08	-0,40	1,07	-0,40
ΔQ_2 , квар	2,15	1,94	-0,21	1,57	-0,58	1,56	-0,59
$P_{\Sigma 2}$, кВт	772,2	774,45	+2,23	773,95	+1,73	771,16	-1,06
$Q_{\Sigma 2}$, квар	477,6	377,74	-99,88	51,68	-425,94	47,44	-430,18
$S_{\Sigma 2}$, кВА	907,9	861,66	-46,33	775,67	-132,32	772,61	-135,37
ΔP_3 , кВт	7,03	6,85	-0,17	6,56	-0,47	6,55	-0,48
ΔQ_3 , квар	51,46	49,92	-1,54	47,28	-4,18	47,19	-4,27
$P_{\Sigma 3}$, кВт	779,2	781,31	+2,06	780,51	+1,26	777,71	-1,54
$Q_{\Sigma 3}$, квар	529,8	427,66	-101,42	98,96	-430,12	94,64	-434,44
$S_{\Sigma 3}$, кВА	941,8	890,69	-51,19	786,76	-155,13	783,44	-158,44
ΔP_4 , кВт	4,56	4,08	-0,48	3,18	-1,38	3,16	-1,41
ΔQ_4 , квар	4,35	3,89	-0,46	3,03	-1,31	3,01	-1,34
$P_{\Sigma 4}$, кВт	783,1	785,39	+1,58	783,69	-0,12	780,86	-2,95
$Q_{\Sigma 4}$, квар	533,2	431,55	-101,88	101,99	-431,4	97,64	-435,78
$S_{\Sigma 4}$, кВА	948,1	896,14	-51,96	790,30	-157,8	786,94	-161,16
ΔP_5 , кВт	21,35	21,31	-0,04	21,24	-0,11	21,24	-0,11
ΔQ_5 , квар	133,9	133,27	-0,63	132,10	-1,80	132,06	-1,83
$P_{\Sigma 5}$, кВт	805,2	806,70	+1,54	804,94	-0,22	802,10	-3,06
$Q_{\Sigma 5}$, квар	667,3	564,82	-102,51	234,09	-433,23	229,71	-437,62
$S_{\Sigma 5}$, кВА	1045,7	984,77	-60,98	838,28	-207,47	834,35	-211,41

Из табл. 1 видно, что суммарное потребление активной мощности в точке 5 больше при КРМ с помощью СД, чем при отсутствии такой компенсации. Таким образом, очевидно, что в данной схеме при данной

величине нагрузки компенсировать реактивную составляющую мощности нецелесообразно.

Как видно из таблицы 1, при более высоких $\cos\varphi$ целесообразней КРМ осуществлять с помощью КБ. Расчёты показали, что в случае полной КРМ с помощью КБ потребление активной мощности в точке 5 уменьшается более чем на 3 кВт, в то время как при частичной КРМ с помощью СД суммарные потери активной мощности увеличиваются более чем на 1,5 кВт. Таким образом, использование СД в качестве компенсатора РМ не выгодно при данных значениях потребляемой мощности и параметрах сети.

Далее были произведены расчёты активных потерь в случае увеличения реактивной нагрузки потребителя. Оказалось, что реактивная нагрузка потребителя, при которой в случае КРМ с помощью СД активные потери в точке 5 были бы такие же, как и в случае без КРМ соответствует величине реактивной нагрузки равной 700 квар, ($\cos\varphi=0,73$). Таким образом, при снижении $\cos\varphi$ нагрузки эффективность использования СД для КРМ повышается. Об этом свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

$P_{нагр}$, кВт	760			
$Q_{нагр}$, квар	96	420	700	800
$\cos\varphi$	1	0,88	0,73	0,69
Величина скомпенсированной РМ с помощью СД	96			
Уменьшение потерь активной мощности	-2,56	-1,54	0	+0,47

Полученные результаты расчетов (табл.1 и 2) ставят под сомнение однозначность утверждения о целесообразности первоочередного использования СД в качестве средства КРМ.

СД мощностью 250 кВт выполняются также на напряжение 6 (10) кВ. Предположим, что такой двигатель установлен в точке 1 электрической сети представленной на рис. 1. Остальные параметры СД такие же, как и в предыдущем случае. Результаты расчётов приведены в таблице 3.

Таблица 3

	Без КРМ	КРМ с помощью СД	d_1	КРМ с помощью СД+КБ	d_2	КРМ с помощью КБ	d_3
	2	3	4	5	6	7	8
P_n , кВт	560	560	0	560	0	560	0

Q_n ,квар	420	420	0	420	0	420	0
-------------	-----	-----	---	-----	---	-----	---

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
S_n ,кВА	700	700	0	700	0	700	0
ΔP_1 ,кВт	6,33	6,33	0	6,33	0	6,33	0
ΔQ_1 ,квар	45,19	45,19	0	45,19	0	45,19	0
$P_{\Sigma 1}$,кВт	766,3	769,44	+3,11	770,96	+4,63	767,73	+1,40
$Q_{\Sigma 1}$,квар	465,2	369,19	-96,00	4,00	-461,19	0	-465,18
$S_{\Sigma 1}$,кВА	896,5	853,43	-43,04	770,97	-125,50	767,73	-128,74
ΔP_2 ,кВт	1,45	1,31	-0,14	1,07	-0,38	1,06	-0,39
ΔQ_2 ,квар	2,67	2,27	-0,41	1,56	-1,12	1,54	-1,13
$P_{\Sigma 2}$,кВт	767,8	770,75	+2,97	772,03	+4,25	768,79	+1,01
$Q_{\Sigma 2}$,квар	467,9	371,46	-96,41	1,57	-466,30	1,55	-466,31
$S_{\Sigma 2}$,кВА	899	855,59	-43,51	772,03	-127,07	768,79	-130,30
ΔP_3 ,кВт	6,99	6,83	-0,16	6,55	-0,44	6,54	-0,46
ΔQ_3 ,квар	51,16	49,73	-1,43	47,18	-3,98	47,08	-4,08
$P_{\Sigma 3}$,кВт	774,7	777,58	+2,81	778,58	+3,81	775,33	+0,56
$Q_{\Sigma 3}$,квар	519	421,18	-97,84	48,74	-470,28	48,64	-470,38
$S_{\Sigma 3}$,кВА	932,5	884,32	-48,22	780,10	-152,45	776,85	-155,7
ΔP_4 ,кВт	4,47	4,02	-0,45	3,13	-1,34	3,10	-1,37
ΔQ_4 ,квар	4,26	3,83	-0,43	2,98	-1,28	2,96	-1,30
$P_{\Sigma 4}$,кВт	779,2	781,61	+2,36	781,71	+2,47	778,43	-0,81
$Q_{\Sigma 4}$,квар	523,2	425,01	-98,27	51,72	-471,56	51,59	-471,7
$S_{\Sigma 4}$,кВА	938,6	889,69	-48,95	783,42	-155,22	780,14	-158,5
ΔP_5 ,кВт	21,34	21,31	-0,03	21,24	-0,10	21,24	-0,11
ΔQ_5 ,квар	133,7	133,19	-0,59	132,03	-1,75	131,99	-1,79
P_{Σ} ,кВт	800,5	802,91	+2,33	802,95	+2,36	799,67	-0,92
Q_{Σ} ,квар	657,6	558,21	-98,86	183,75	-473,31	183,59	-473,4
S_{Σ} ,кВА	1035,7	977,89	-57,81	823,70	-211,99	820,47	-215,2

Как видно из таблицы 3, результаты расчётов аналогичны приведенным

в таблице 1. Более того, суммарные активные потери увеличились с 1,5 кВт до 2,3 кВт, в случае КРМ с помощью СД. Тем самым порог коэффициента мощности нагрузки, при котором выгодно использовать СД в качестве КРМ, также снижается.

Выводы. 1. Использование СД в качестве КРМ целесообразно, когда снижение активных потерь от перетока РМ превышает возникающие дополнительные активные потери в СД при выработке РМ, что возможно только при низких коэффициентах мощности нагрузки. 2. Эффективность использования СД в качестве ИРМ повышается при снижении коэффициента мощности нагрузки. 3. Выгодней использовать СД в качестве КРМ на напряжении 0,4 кВ нежели на 10 кВ.

Список литературы: 1. Зорин В.В. Системы электроснабжения общего назначения / В.В. Зорин, В.В.Тесленко // Учебник для студентов ВУЗов.–Чернигов: ЧГТУ, 2005. – 341 с. 2. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Ю.С Железко. - М.: Энергоатомиздат, 1989.-176 с. 3. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: Учебное пособие для вузов / уклад. А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. - М: Энергоатомиздат, 1987.-368 с. 4. Производство и распределение электрической энергии: электротехнический справочник: В 3т. Т.3. 2кн. Кн1 / под ред. И.Н.Орлова. - 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-880 с. 5. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.:Энергоатомиздат, 1963. – 256 с. 6. Ипатенко Н.Р. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство $\cos\varphi=1$ / Н.Р. Ипатенко. - Брянск: Б ИТМ, 1974. 7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. - 4-е изд., перераб. и доп - М. Энергоатомиздат 1984, 240 с. 8. Омельчук А.О. Щодо компенсації реактивної потужності синхронними двигунами споживачів / А.О. Омельчук // Енергетика і електрифікація. – 2005. - №3. – С. 32-35. 9. Дорошенко О.І. Щодо застосування синхронних двигунів для потреб компенсації реактивного навантаження споживачів / О.І. Дорошенко // Промелектро. – 2005. - №4. -С.36-40. 10. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

Поступила в редакцию 03.09.2010

М.Б. ЗИКОВ, О.В. ВАСИЛЬЄВА, ЗАТ «Завод Південкабель»
А.М. БОЙКО, І.Є. КУРЧЕНКО, І.В. ТАРАН, студенти НТУ «ХПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КАБЕЛЬНИХ ПЛАСТМАС В УМОВАХ ЗАВОДСЬКОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

Исследовались критерии оценки прочности при растяжении и относительного удлинения для кабельных поливинилхлоридных пластикатов марок И-40 13А и ОМ-40.

Criteria of an estimation of strength were investigated at extension and a percentage elongation for cable polyvinylchloride plastic compounds of brands I-40 13A and OM-40.

Постановка проблеми. Сучасні реалії кабельного виробництва такі, що вимоги замовників продукції часто перевищують вимоги, передбачені нормативною документацією. Викликом часу для виробників масової продукції є верховенство вимог замовників.

В цих умовах основним критерієм якості продукції є однорідність її основних характеристик, співвіднесена з допустимими діапазонами цих характеристик, узгодженими з замовниками. Вказаний критерій якості масової продукції є визнаним у вигляді відомої концепції якості «Six Sigma methodology» і проблема полягає в тому, що вимоги виробників змінюються швидше, ніж нормативна технічна документація на випробування продукції. Тому принципи концепції «Six Sigma methodology» мають бути застосовані до випробувань в заводській лабораторії.

При виготовленні елементів конструкції кабелів з ПВХ-пластикатів методом екструзії лінійні молекули полімеру виявляються орієнтованими переважно вздовж осі кабелю. Тому при випробуваннях на механічну міцність зразки вирубують завжди вздовж напрямку вальцювання. Однак нижня границя міцності полімеру завжди визначається слабшою (аморфною) складовою, вплив якої на характеристики міцності можна визначити, використавши зразки, вирізані впоперек напрямку вальцювання, що приводить до суттєвого розсіяння результатів випробувань.

Аналіз літератури. В концепції «Six Sigma methodology» однорідність продукції кількісно виражена загальновідомою характеристикою розсіяння параметра, що контролюється, - його середньоквадратичним відхиленням σ [1]. Згідно з матеріалами докладів Європейської конференції Cables 2009, що відбулася у березні 2009 року у Кельні, сьогодні спостерігається підвищення вимог до механічних характеристик полімерних композицій [2].

Система якості заводу «Південкабель», яка одержала міжнародний сертифікат, передбачає моніторинг параметрів по всім складовим технологічного процесу. При цьому базовим рівнем однорідності є рівень

«3 σ », що в рамках концепції «Six Sigma methodology» відповідає середньому рівню однорідності для світових виробників [3].

Випробування на механічну міцність кабельних пластмас в сертифікованій лабораторії виконують відповідно до чинних вітчизняних і міжнародних стандартів, які є гармонізованими між собою [4]. Цими стандартами не передбачене визначення середньоквадратичних відхилень σ характеристик механічної міцності кабельних пластмас.

Ціль роботи. Дослідження розсіяння результатів випробувань на механічну міцність для ПВХ-пластикатів марок И-40 13А и ОМ-40, виготовлених методом екструзії на заводському обладнанні.

Одержані результати. Визначені: найбільше зусилля при розтягуванні F_{max} , Н; мінімальна товщина для кожного зразка t , мм; контрольна довжина зразка при розриві L , мм; ширина зразка h , мм. На основі одержаних результатів розраховано наступні величини:

1. P - міцність при розтягуванні, МПа - найбільше напруження при розтягуванні зразка до розриву: $P = F_{max} / t \cdot h$;

2. δ - відносне видовження при розриві, %: $\delta = [(L - L_0) / L_0] \cdot 100\%$, де L - контрольна довжина зразка при розриві, мм; L_0 -контрольна довжина не розтягнутого зразка, мм;

3. Середньоквадратичне відхилення параметра X :

$$\sigma[X] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M[X])^2}; \text{ де } M[X] - \text{ середнє значення контрольного}$$

параметру X ; x_i - значення, підраховані на основі експериментальних вимірювань. Результати наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Матеріал	Результати вимірювань				
	t , мм	L , мм	P , МПа	δ , %	F_{max} , Н
И-40 13А	1,78	110	15,48	340	110,2
	1,85	120	15,58	380	115,3
	1,86	100	20,20	300	150,3
	1,71	110	21,18	340	144,9
	2,01	105	20,38	320	163,9
	2,00	100	14,00	300	72,00
	2,09	105	17,70	320	148,0
	1,56	105	20,70	320	129,1
	1,70	105	22,10	320	150,3
	1,77	110	22,80	340	161,4
	1,74	110	23,05	340	160,4

					3	
	1,60	105	23,50	380	0	150,4

Таблиця 2

Матеріал	Результати вимірювань				
	<i>t</i> , мм	<i>L</i> , мм	<i>P</i> , МПа	δ , %	<i>Fmax</i> , Н
ОМ-40	1,71	110	14,4	340	98,5
	1,93	110	16,3	340	125,8
	1,63	115	14,1	360	92,1
	1,70	115	14,3	360	97,2
	1,87	110	15,8	340	118,1
	1,82	105	13,4	320	97,5
	2,09	105	14,1	320	117,8

На рисунку 1 наведено функції розподілу міцності при розтягуванні, побудовані за одержаними даними, які свідчать про суттєву різницю в розсіянні даних навколо середнього значення.

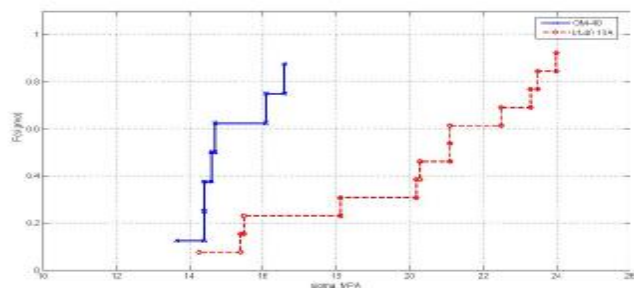


Рис. 1- Функції розподілу міцності при розтягуванні для ПВХ-пластикатів марок И-40 13А та ОМ-40, виготовлених методом екструзії на заводському обладнанні

З представлених графіків видно, що середні значення міцності при розтягуванні для зразків И-40 13А більше, ніж для зразків ОМ-40. Водночас, внаслідок більшого розсіяння цього показника у ізоляції И-40 13А, мінімальні

значення міцності при розтягуванні досліджуваних зразків у обох матеріалів майже однакові.

Очевидно, що взявши більшу кількість зразків можна отримати ще менші значення даного параметру. Якщо ж керуватись правилом, що міцність ланцюгу визначається міцністю найслабшої з його ланок, то матеріал ОМ-40 за міцністю при розтягуванні може виявитися не гіршим за И-40 13А за порівняно менші його середні значення цієї величини.

Оскільки нижня границя міцності полімеру завжди визначається слабшою (аморфною) складовою, було експериментально перевірене припущення про те, що практично однакові мінімальні значення міцності при розтягуванні у пластикатів ОМ-40 і И-40 13А пов'язані з наявністю аморфних зон в структурі пластикату. Для цього випробні зразки вирубані з в середньому більш механічно міцного пластикату марки И-40 13А після його накладання на жилу на екструдері в двох протилежних напрямках відносно напрямку пресування. Відповідні дані наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

№ зразка	<i>t</i> , мм	<i>t</i> x <i>h</i> , см ²	<i>P</i> , МПа	<i>Fmax</i> , Н	<i>L</i> , мм	δ , %	Напрямок розтягування відносно напрямку пресування
1	0.64	0.0256	23.05	59	87	335	вздовж
2	0.74	0.0296	19.59	58	84	320	вздовж
3	0.74	0.0296	19.93	59	86	330	вздовж
4	0.73	0.0292	17.12	50	78	290	поперек
5	0.73	0.0292	19.86	58	78	290	поперек
6	0.71	0.0284	18.31	52	76	280	поперек
7	0.72	0.0288	17.71	51	76	280	поперек

За даними таблиці 3 визначено оцінки нижньої границі *LC* для значень міцності *P* при розтягуванні відповідно до концепції «Six Sigma methodology», а саме для рівня однорідності «3 σ » має виконуватись нерівність [1]:

$$\sigma [P] \leq |LC - M[P]| / 3,$$

де *M[P]* - середнє значення, а $\sigma [P]$ - середньоквадратичне відхилення міцності *P* при розтягуванні.

Результати наведені на рисунку 2.

Нижня границя міцності при розриві виявилась вищою для зразків, що були вирізані впоперек напрямку вальцювання; а розсіяння значень для цих зразків виявилось меншим. Це свідчить про те, що нижня границя міцності полімеру, накладеного екструзією, визначається аморфними областями, розташованими між кристалітами (повздовж орієнтованими пакетами молекул).

Видно, що нижня границя міцності при розтягуванні виявилась вищою для зразків, що були вирізані впоперек напрямку вальцювання; а розсіяння значень для цих зразків виявилось меншим. Це свідчить про те, що нижня границя міцності полімеру, накладеного екструзією, визначається аморфними областями, розташованими між кристалітами (повздож орієнтованими пакетами молекул).

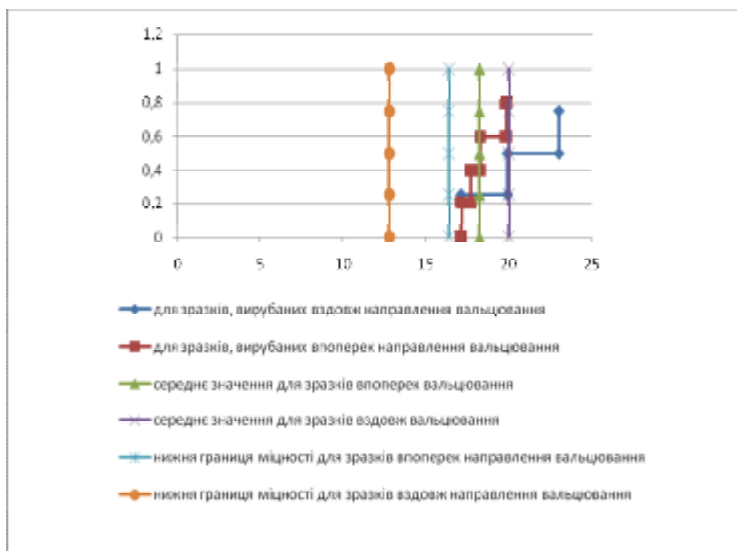


Рис.2 - Результати співставлення експериментальних значень і оцінки мінімальних значень міцності при розтягуванні для ПВХ-пластикату марки И-40 13А: мінімальні значення визначені відповідно до концепції «Six Sigma methodology», а саме для рівня однорідності «3 σ »

Висновки. 1. Покращення показників продукції лише за рахунок покращення їхніх середніх значень може виявитися неефективним за умови суттєвої дисперсії цих показників. При мінімізації ж дисперсії залишається певна визначеність того, що контрольні параметри продукції не вийдуть за їхні допустимі межі. Таким чином, основним способом запобігання неякісної продукції є мінімізація розсіювання її основних параметрів.

2. Для визначення нижньої границі міцності полівінілхлоридного пластикату доцільно використати зразки, вирібані впоперек напрямку вальцювання.

Список літератури: 1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: підруч. для студ. вузів / В.П. Карпушенко, Л.А. Щербенюк, Ю.О. Антоненко, О.А.

Науменко. – Харків: Регіон-інформ, 2000. – 376 с. 2. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжнародна науково-практична конференція, Ч II 12 – 14 травня 2010 р.: тези доповідей / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 320 с. 3. Золотарьов В.М. Системний підхід до управління якістю – фундамент перспективного розвитку підприємства / В.М. Золотарьов // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2002. – № 1. – С. 57– 61. 4. ДСТУ ІЕС 811-1-1: 2003. Загальні методи випробувань матеріалів ізоляції та оболонок електричних кабелів. Методи загального застосування. Вимірювання товщини та зовнішніх розмірів. Випробування для визначення механічних властивостей.

Надійшла до редакції 03.09. 2010

В.У. КИЗИЛОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПІ»
Н.В. РУДЕВИЧ, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПІ»

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

В работе показано, что самым эффективным способом повышения точности преобразования действующих высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения является электронная компенсация погрешности. Приведены недостатки существующих схемных решений высоковольтных трансформаторов напряжения с электронной компенсацией погрешности. Предложена схема надежного устройства электронной компенсации погрешности высоковольтного трансформатора напряжения.

It is in-process rotined that electronic indemnification of error is the most effective method of increase of exactness of transformation of operating high-voltages measuring transformers of tension. The lacks of existent schematics of high-voltages transformers of tension are resulted with electronic indemnification of error. The chart of reliable device of electronic indemnification of error of high-voltage transformer of tension is offered.

Постановка проблеми. Значна відмінність вимірюваних значень електричних величин від дійсних їх значень у високовольтних мережах енергосистем, обумовлена наявністю похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги (ВВТН) та струму.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. В даний час набуло розповсюдження використання у якості феромагнітного матеріалу осердя нанокристалічних і аморфних сплавів, які мають вузьку петлю гистерезису і лінійні характеристики. Виготовлення трансформаторів на осердях з таких сплавів дозволяє отримати клас точності 0.2S, однак вартість при цьому значно збільшується по зрівнянню за традиційні аналоги.

При перетворенні напруги за кордоном почали застосовувати оптиелектронні трансформатори, побудовані на ефекті Поккельса. Такі трансформатори мають широку смугу пропускання, малі габаритні розміри та достатньо високу точність перетворення, на рівні десятих часток відсотка [1]. До недоліків можна віднести малу вихідну потужність та значну вартість.

Невирішені проблеми. Нажаль, тисячі вимірювальних трансформаторів напруги (ВТН), які сьогодні експлуатуються в електроенергетичних системах, мають в найкращому випадку клас точності 0.5 і заміна їх в короткі терміни неможлива.

Мета статті. Визначення ефективного способу підвищення точності перетворення діючих ВВТН.

Основний матеріал досліджень. Вирішити проблему підвищення точності перетворення діючих ВВТН можна шляхом застосування електронної компенсації похибки.

Існує ряд схемних рішень ВТН з електронною компенсацією похибки [2-6], які можуть використовуватись для трансформаторів напруги пристроїв введення напруги. Використання тільки деяких з них можливе для високовольтних трансформаторів напруги. На рис. 1. представлена схема ВТН з електронною компенсацією, яка може застосовуватись для трансформаторів на напругу 6-35 кВ [5].

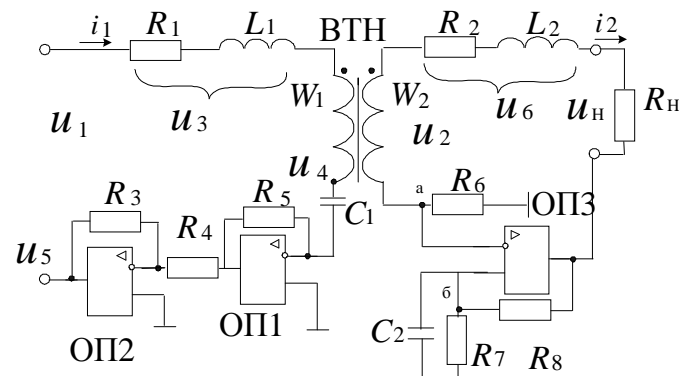


Рис. 1. Схема компенсації падіння напруги в первинній і вторинній обмотці ВТН окремо

Як відомо, основною причиною виникнення похибки в трансформаторі напруги є падіння напруги на опорі первинної обмотки від протікання струму намагнічування та струму навантаження і падіння напруги на опорі вторинної обмотки від протікання струму навантаження.

В схемі на рис.1 падіння напруги на ємності C_1 компенсує падіння напруги на індуктивності L_1 в первинній обмотці. Падіння напруги на активному опорі R_1 від протікання струму i_1 компенсується за допомогою певного підключення операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 та резисторів R_3 , R_4 , R_5 .

При повній компенсації падіння напруги на первинній обмотці повинні виконуватись рівняння $i_1 R_5 \frac{R_3}{R_4} + i_1 \frac{j}{\omega C_1} = R_1 i_1 + j\omega L_1 i_1$ (ω - кутова частота).

Для компенсації падіння напруги на вторинній обмотці використовується ОПЗ з певним підключенням ємності та опорів.

$$\text{Компенсація буде здійснюватись за умов } \frac{R_6}{R_2} = \frac{R_7}{R_8} \text{ та } C_2 = \frac{L_2}{R_6 R_8}.$$

Перевагами даного схемного рішення, як стверджують автори, є: 1) висока точність (зниження похибки перетворення до сотих відсотка), 2) можливість використання для ВВТН, 3) можливість використання для діючих трансформаторів. Недоліки цього рішення: 1) частотна залежність похибки компенсації, 2) велика кількість активних елементів, 3) необхідність різних блоків живлення для ОП встановлених в первинній та вторинній обмотках, 4) підвищенні вимоги до ізоляції трансформатора джерела живлення ОП у випадку з'єднання у трикутник обмоток трьохфазного трансформатора або при з'єднанні обмоток у зірку в мережі з ізолюваною нейтраллю, 5) необхідність ОП на низькій стороні ВТН створювати весь струм навантаження.

На рис.2 приведено схемне рішення, яке також можна застосовувати для ВВТН [6].

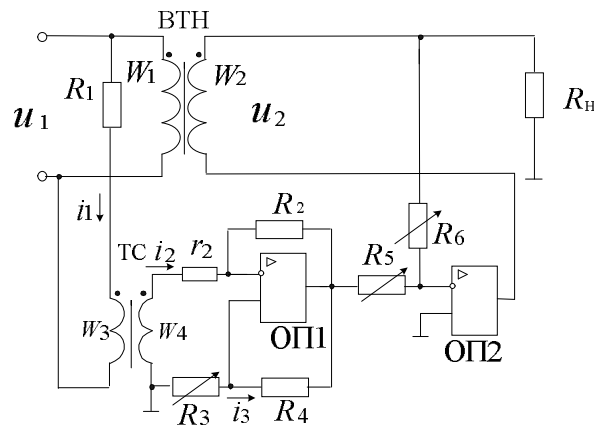


Рис. 2 - Схема компенсації похибки за допомогою ТС

На резисторі R_1 напруга u_1 перетворюється в струм i_1 , що протікає по первинній обмотці W_3 трансформатора струму (ТС), котрий має електронну компенсацію, звідки вихідна напруга ОП1 буде пропорційна вимірювальній напрузі. Вихідна напруга ОП1 через резистор R_5 надходить на вхід ОП2, де вона порівнюється з напругою на навантаженні U_H через резистор R_6 і на

виході ОП2 буде така напруга, що $U_H = \frac{(r_2 + R_2)R_6}{R_1 R_5} \frac{W_3}{W_4} U_1$. Отже, при певнім значенні опорів R_1, R_2, R_5, R_6 напруга U_H буде пропорційна вимірюваній напрузі U_1 . Перевагами пристрою по схемі рис. 2 є висока точність та можливість використання для діючих ВВТН.

Схема має два недоліки. Перший полягає в тому, що в резисторі R_1 розсіюється досить значна потужність. Так при струмі $I_1 = 1+10$ мА та при напрузі $U_1 = 10$ кВ на резисторі R_1 розсіюється потужність від 10÷100 Вт у номінальному режимі. На 110 кВ ця величина збільшується на порядок, тобто складе 110÷1100 Вт. Інший недолік пристрою за схемою полягає в тому, що максимальний струм навантаження обмежується максимальним струмом ОП2.

Як можна бачити, загальним недоліком відомих схем ВТН з електронною компенсацією похибки, які можна використовувати для діючих ВВТН, є створення операційним підсилювачем усього струму навантаження, що значно знижує надійність такого трансформатора. У разі виходу з ладу ОП буде знеструмлене усе навантаження.

Отже, з точки зору надійності, доцільно використання такої компенсації, коли ОП створює не всю потужність трансформатора, а тільки для частини навантаження, яка потребує високу точність (наприклад, мікропроцесорні лічильники).

На рис. 3 представлено схемне рішення, де відсутній вище наведений недолік [7].

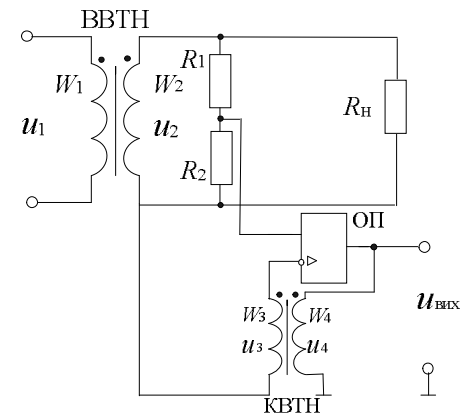


Рис. 3 - Схема пристрою електронної компенсації похибки ВВТН

Напруга з дільника на резисторі R_2 порівнюється з напругою u_3 на виході компенсуючого вимірювального трансформатора напруги (КВТН). Операційний підсилювач змінює напругу на первинній обмотці КВТН таким чином, що напруга на його вході стає рівною нулю. Якщо КВТН розрахувати так, що його похибки при будь-якому значенні u_1 рівні похибкам ВВТН, то в цьому випадку напруга u_4 на виході пристрою буде пропорційна вимірюваній напрузі u_1 . Рівність похибок ВВТН та КВТН можливе при виконанні умов: 1) ідентичність феромагнітних матеріалів ВВТН та КВТН; 2)

$$\frac{l_1 l_{m1}}{k_{m1} Q_{01} S_1} = \frac{l_2 l_{m2}}{k_{m2} Q_{02} S_2}, W_4 = \frac{U_{m4} W_1 S_1}{U_{m1} S_2} (l_1, l_2 - \text{середня довжина лінії магнітного поля осердя ВВТН та КВТН відповідно; } l_{m1}, l_{m2} - \text{середня довжина витка первинної обмотки ВВТН та КВТН відповідно; } k_{m1}, k_{m2} - \text{коефіцієнт заповнення вікна міддю ВВТН та КВТН відповідно; } Q_{01}, Q_{02} - \text{площа вікна осердя ВВТН та КВТН відповідно; } S_1, S_2 - \text{поперечний переріз осердя ВВТН та КВТН відповідно).}$$

За допомогою дільника напруги, КВТН та одного ОП створено паралельний канал для засобів вимірювання, що потребують високу точність. Сьогодні засоби вимірювання зазвичай виготовляють на мікропроцесорній базі і, отже, потужність їх споживання незначна – не перевищує 0.2 ВА. Для сучасних операційних підсилювачів забезпечення такої потужності можливе без зниження надійності.

Таким чином, високовольтний вимірювальний трансформатор напруги може одночасно жити пристрої захисту і вимірювання, які не потребують високої точності, а пристрій електронної компенсації похибки ВВТН дозволяє формувати напругу однозначно пов'язану з вимірюваною напругою по формі для засобів вимірювання.

Запропонований пристрій не потребує змінення в стандартній конструкції ВВТН і може бути застосований для діючих ВВТН, при цьому розміри КВТН можуть бути значно меншими за ВВТН. В пристрої можливе усунення впливу зміни навантаження на похибку компенсації ВВТН, але в цій роботі це не розглядається. Навіть якщо в процесі створення пристрою для діючого ВВТН не вдасться 100 % забезпечити ідентичність феромагнітних матеріалів ВВТН та КВТН, все одно буде скомпенсована значна частина похибки високовольтного трансформатора.

Ще одною перевагою даного схемного рішення перед вище наведеними є те, що вихідна напруга пристрою не перевищує 15 В (максимальна напруга ОП), а, отже, може бути подана безпосередньо на мікропроцесорний пристрій

Висновки. На сьогодні, в умовах що склались, використання електронної компенсації похибки, а саме пристрою по схемі рис.3, для підвищення точності перетворення діючих високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги є найбільш ефективним і не затратним способом.

Список джерел: 1. *Rahmatian F.* 230 kV optical voltage transducers using multiple electric field sensors / *F. Rahmatian, P. Chavez, A. Jaeger* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17 / - № 2. – P. 417–422. 2. *Slomovitz D.* Electronic compensation of voltage transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. - № 4. – P. 652–654. 3. *Deacon T.A.* Comments on "Electronic error- compensation of a voltage transformer" / *T.A. Deacon* // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1980/ - Vol. IM-29. - № 1. – P. 79-80. 4. *Slomovitz D.* Electronic compensation of inductive voltage dividers and standart voltage transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. - № 4. – P. 652–654. 5. *Slomovitz D.* Electronic based high-voltage measuring transformers // *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. - № 2. - P. 359–361. 6. *Рудевич Н. В.* Повышение точности измерительных трансформаторов напряжения / *Н. В. Рудевич* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». –Харків, 2005. – №36. – С. 99– 102. 7. Пат. 81842 Україна, МПК⁶ G 01 R 19/00, H 01 F 27/42. Пристрій для електронної компенсації похибки вимірювальних трансформаторів напруги / *Кизилов В. У., Рудевич Н. В.*; заявник та патентовласник *Кизилов В. У.* – № а 2006 03919 ; заявл. 10.04.2006 ; опубл. 11.02.2008, Бюл. №3.



Кизилов Володимир Улянович закінчив в 1959 році закінчив Харківський політехнічний інститут по спеціальності «Електричні станції, мережі і системи». Захистив в 1968 році кандидатську дисертацію на тему «Время-импульсный статический преобразователь мощности повышенной частоты». Наукові інтереси: компенсація реактивної потужності, зменшення похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів, визначення місця пошкодження.



Рудевич Наталія Валентинівна закінчила в 2005 році електроенергетичний факультет НТУ «ХПІ». В 2009 році захистила кандидатську дисертацію на тему «Зменшення похибок, обумовлених високовольтними трансформаторами струму та напруги, приєднанням до їхніх вторинних кіл компенсуючих пристроїв». Наукові інтереси: зменшення похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів.

Поступила в редколегію 03.09.2010

В. У. КИЗИЛОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Е. А. ПАНЧЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

У статті розглядаються алгоритми, реалізовані у вимірювальних перетворювачах для визначення активної потужності в чотирьох провідних і трьох провідних трифазних ланцюгах, а також наводиться опис універсального ВПТАП для вимірювання сумарної активної потужності для двох видів трифазного ланцюга, що важливо для зобів перевірки перетворювачів потужності і формування резерву при виходу з ладу діючого перетворювача.

The algorithms, implemented in the measuring transformers to determine the active power in the top four and the top three-phase circuits, and describes universal MTCAP for measurement of total active power for the two types of three-phase circuit which is important for device calibration transmitter power and building up reserves in case of failure of the converter.

При измерении активной мощности потребителя в трехфазной четырехпроводной цепи в измерительном преобразователе активной мощности реализуется алгоритм

$$P_{34} = \overline{U_{a0}i_a} + \overline{U_{b0}i_b} + \overline{U_{c0}i_c}, \quad (1)$$

где U_{a0} , U_{b0} , U_{c0} - напряжения фаз потребителя электроэнергии (ПЭ) относительно нейтрали (земли), а i_a , i_b , i_c - токи фаз ПЭ. Черта сверху означает усреднение на периоде.

В трехпроводной трехфазной цепи нейтрали ПЭ не заземлены и недоступны для подключения средств измерения, а сумма токов фаз равна нулю

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (2)$$

В этом случае алгоритм (1) можно преобразовать, заменив ток одной из фаз суммой токов двух других фаз с обратным знаком. Например,

$$i_b = -i_c - i_a. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим

$$P_{33} = \overline{U_{ab}i_a} + \overline{U_{bc}i_b}. \quad (4)$$

Сегодня производители выпускают два типа измерительных преобразователей активной мощности (ИПАМ). В одном для четырехпроводных цепей реализуется алгоритм (1), а в другом реализуется алгоритм (4) для трехфазных трехпроводных цепей.

Принято считать, что алгоритм (1) не пригоден в трехпроводных трехфазных цепях, так как некуда подключить ноль измерительного преобразователя, а алгоритм (4) не пригоден в четырехпроводных цепях, так как имеется погрешность

$$\Delta P_{34} = -3U_{b0}i_0. \quad (5)$$

Действительно из (4) следует, что

$$\overline{U_{ab}i_a} - \overline{U_{bc}i_c} = \overline{U_a i_a} - \overline{U_b i_a} - \overline{U_b i_c} + \overline{U_c i_c} = \overline{U_a i_a} + \overline{U_b i_b} + \overline{U_c i_c} - \overline{U_b (i_a + i_b + i_c)} = P_{34} - 3U_{b0}i_0, \quad (6)$$

где $3i_0 = i_a + i_b + i_c$

В ряде случаев желательно иметь такой ИПТАМ, который может использоваться как в четырехпроводных, так и в трехпроводных трехфазных цепях. Особенно это целесообразно в проверочных средствах и при формировании резерва ИПТАМ на предприятиях.

В [1] предложен следующий алгоритм для ИПТАМ

$$P_3 = \overline{U_{ab}i_a} - \overline{U_{bc}i_c} + 3\overline{U_{b0}i_0} = P_{34} - 3\overline{U_{b0}i_0} + 3\overline{U_{b0}i_0} = P_{34}. \quad (7)$$

В трехпроводной цепи последний член выражения (7) равен нулю, так как $i_0=0$ и U_{b0} нельзя подключить к отсутствующему нулю. В четырехпроводной цепи P_{34} в соответствии с (7) будет измерена точно. Алгоритм (7) имеет недостаток, так как требует разные трансформаторы: с первичными линейными напряжениями U_{ab} и U_{bc} и один с фазным первичным напряжением U_{b0} . Кроме того настройка ИПТАМ с этим алгоритмом усложнена. Алгоритм (7) реализован в ИПТАМ Е848 класса точности 02 завода ВЗЭП г.Витебск.

Покажем, что алгоритм (1), вопреки сложившемуся мнению, может быть без изменений успешно использован в ИПТАМ для измерений как в четырехпроводных цепях, так и в трехпроводных. В трехпроводных цепях отдельные ПЭ могут быть соединены в звезду с разными потенциалами нейтрали или треугольник, могут быть потребители, включенные на линейное напряжение, как показано на рисунке 1.

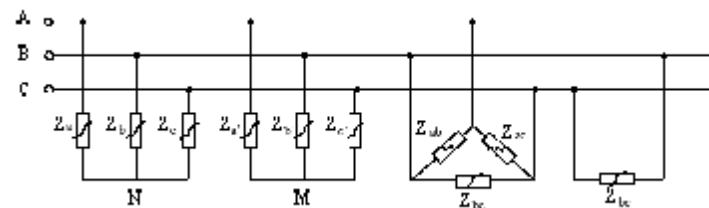


Рис. 1.

Все отдельные нагрузки на рисунке 1 могут быть преобразованы в треугольники, из которых можно сформировать результирующий треугольник всех нагрузок. Результирующий треугольник всех нагрузок контролируемой цепи можно преобразовать в звезду, нейтраль которой имеет определенный потенциал. Обозначим потенциал этой нейтрали как P (рисунок 2).

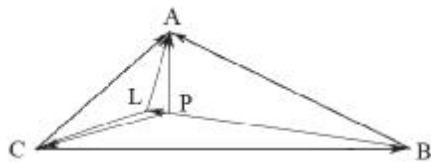


Рис. 2.

Хотя значение потенциала нейтрали в общем случае неизвестно, но мы можем записать выражение для активной мощности ПЭ.

$$P_{33} = \overline{U_{AP}i_A} + \overline{U_{BP}i_B} + \overline{U_{CP}i_C}. \quad (8)$$

Предположим теперь, что мы сформировали искусственную звезду с другим потенциалом нейтрали LA как на рисунке 2.

Очевидно, что

$$U_{AL} = U_{AP} - U_{PL}; U_{BL} = U_{BP} - U_{PL}; U_{CL} = U_{CP} - U_{PL}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (8), получим, что

$$P_{33} = \overline{U_{AP}i_A} + \overline{U_{BP}i_B} + \overline{U_{CP}i_C} + \overline{U_L(i_A + i_B + i_C)}. \quad (10)$$

Так как сумма токов трехпроводной системы равна нулю, то очевидно, что измеренное значение суммарной активной мощности трех фаз трехпроводной трехфазной цепи не зависит от потенциала нейтрали. Этот результат был доказан ранее в [2] на стр. 224-225.

Для создания универсального ИПТАМ для измерений суммарной активной мощности как в четырехпроводной так и в трехпроводной трехфазной цепи целесообразно выбрать потенциал нейтрали, подключив напряжения фаз через равные сопротивления как на рисунке 3.

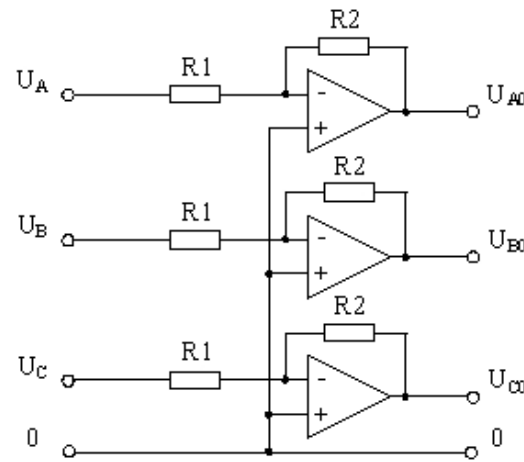


Рис. 3.

При измерении активной мощности в четырехпроводной цепи зажим «0» подключается к потенциалу земли, а в трехпроводной цепи никуда не подключается.

Список литературы: 1. Кизилов В.В., Смилянский Н.И. Устройство для измерения электрической мощности трехфазных цепей. Авторское свидетельство СССР, №1798714, Бюл. №8, 1993г. 2. Круг К. А. Основы электротехники.: в 2 т. Т.2. Теория переменных токов / К. А. Круг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 634с.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

КИМ ЕН ДАР, д-р.техн. наук, УИПА
В.Н. ТАРАН, инженер, ГП НИИВН (Харьков)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО АВАРИЙНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 220 кВ И ВЫШЕ

В статті проаналізовано статистичні дані щодо відмов ізоляції високовольтного обладнання розподільчих пристроїв 220 кВ та вище.

In this paper have been analysed failure insulators' for high-voltage equipment of distributing devices for 220 kV and higher statistical data.

В энергосистемах Украины находятся в эксплуатации 131 трансформаторных подстанций класса напряжений 220кВ и выше. Каждой из подстанции присущи свои условия работы, характеризующиеся климатическими условиями, степенью загрязненности окружающей среды, средствами и качеством контроля оборудования, своевременностью выполнения профилактических работ и т.д. С учетом большого количества оборудования и аппаратов высокого напряжения различного назначения, составляющего систему подстанционной сети, при оценке надежности работы подстанции в качестве показателя принимается удельная частота отказов одной подстанции:

$$F = \frac{n}{N \times t},$$

где: n - число отказов оцениваемой подстанции; N - число обследуемых подстанций; t – период контроля, лет.

Аналогичным образом определяется удельная частота отказов отдельного подстанционного оборудования, только при этом в формуле принимается:

$$n = n_{об},$$

где $n_{об}$ – число отказов интересующего нас оборудования на конкретной подстанции.

Под отказом энергетических объектов понимается авария или выход из нормального режима согласно РД 34.20.801-90 «Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе электростанций, сетей и энергосистем».

Основными объектами обследования являлись: силовые трансформаторы; измерительные трансформаторы; высоковольтные выключатели; разъединители; разрядники; отделители; короткозамыкатели; реакторы; изоляция; сборные шины.

Под отказом подстанции принимается отказ хотя бы одного из перечисленных объектов.

В статье приведены результаты анализа отчетных материалов энергосистем Украины за период 1982-2002гг. Нам представляется, что за истекшее время соотношения между рассматриваемыми параметрами не потерпели значительных изменений.

Сводные данные по удельной частоте отказов за этот период показывают, что величина F на разных подстанциях колеблется в диапазоне от нуля до единиц отказов в год. При этом было выявлено, что урони отказов на подстанциях с большим классом напряжения заметно выше, чем на подстанциях более низкого напряжения.

В качестве примера на рис.1 приведено распределение удельной частоты отказов по каждому оборудованию подстанций 330кВ. Эти данные являются результатом анализа 58 рассмотренных подстанций этого класса напряжения, поэтому представляются наиболее объективными.

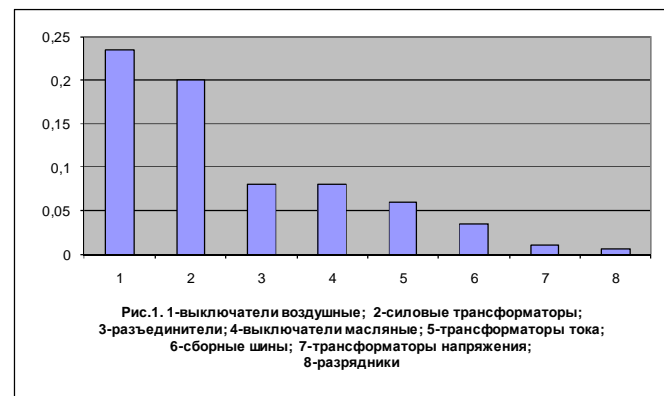


Рис.1-1-выключатели воздушные; 2-силовые трансформаторы;
3-разъединители; 4-выключатели масляные; 5-трансформаторы тока;
6-сборные шины; 7-разрядники;
8-разрядники

Как видно из этого рисунка, чаще всего выходят из нормального режима работы выключатели, силовые трансформаторы и разъединители. Такая тенденция отмечается и для оборудования на подстанциях 750кВ и 220кВ.

Так как оборудование состоит из различных элементов и узлов, и конструктивное исполнение оборудования для разных классов напряжений существенно отличаются друг от друга, статистика отказов составляющих элементов тоже была различна в зависимости от класса напряжения. В частности, для воздушных выключателей на 220кВ отказы до 49% были обусловлены повреждением привода, до 33% - дугогасительной камерой, до 16% - контактной системой. Для воздушных выключателей на напряжение 330кВ самой весомой причиной отказа явились повреждения опорных

изоляторов – до 40%, затем идут поломка привода - до 28% и выход из строя высоковольтных вводов – до 14%.

Для силовых трансформаторов на 750кВ чаще всего происходит нарушение внутренней изоляции – до 43%; на втором месте по значимости, до 19%, зарегистрировано перекрытие внешней изоляции; на третьем месте – попадание птиц и посторонних предметов (до 14%); около 10% отказов трансформаторов вызваны повреждением высоковольтных вводов и опорных изоляторов. В то же время, для трансформаторов класса 330кВ на первое место по весомости причин отказов выходит повреждение высоковольтных вводов - до 44%; на внутреннее короткое замыкание относят отказы до 20%, на перекрытие и разрушение опорных изоляторов-до 5%.

Весовые составляющие причин отказов разъединителей для различных классов также значительно отличаются между собой (таблица 1).

В целом, если ранжировать причины аварий на подстанциях по уровню повреждаемости элементов, то можно составить следующую последовательность:

- 1-внутренняя изоляция трансформаторов;
- 2-высоковольтные вводы;
- 3-приводы коммутационных аппаратов;
- 4-опорные изоляторы;
- 5-дугогасительные камеры;
- 6-резиновые уплотнения высоковольтных выключателей;
- 7-полые провода

Таблица 1

Класс напряжения	Элементы повреждения			
	привод	изолятор	контактная система	прочие
750кВ	61%	32%	3,2%	3,2%
330кВ	15%	74%	7,4%	3,7%

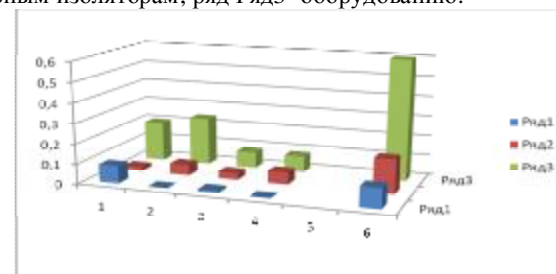
В таблице 2 приведены показатели надежности оборудования с наиболее высоким уровнем повреждаемости (см. рис.1) и связанная с ним доля удельных отказов высоковольтных вводов и опорных изоляторов, обобщенные по всем подстанциям на 330кВ.

Таблица 2

Объект подстанционного оборудования						
Силовой трансформатор		Высоковольтный выключатель				Разъединитель
		воздушный		масляный		
$F=0,2$		$F=0,24$		$F=0,08$		$F=0,08$
ввод	изолятор	ввод	изолятор	ввод	изолятор	изолятор
43,9%	9,8%	--	22,4%	14%	41,8%	74,1%

0,088	0,02	--	0,0538	0,0112	0,0334	0,0593
-------	------	----	--------	--------	--------	--------

Для наглядности удельные уровни отказов таблицы 2 представлены в виде гистограмм на рис. 2, где ряд Ряд1 относится высоковольтным вводам; ряд Ряд2- опорным изоляторам; ряд Ряд3- оборудованию.



1 – силовые трансформаторы, 2 – выключатели воздушные; 3 – выключатели масляные; 4 – разъединители; 6 – суммарная частота отказов

Рис. 2 Удельные уровни отказов оборудования

Из приведенных данных обследования подстанций 330кВ получаем, что из суммарной удельной частоты отказов F силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и разъединителей, равной 0,60 отк/год, 0,1 отк/год относится высоковольтным вводам и около 0,17 отк/год – опорным изоляторам. Это означает, что для наиболее подверженного к отказам подстанционного оборудования доля отказов по причине повреждения только вводов и изоляторов достигает до 45%. К тому же следует отметить, что выход со строя перечисленного оборудования на подстанциях квалифицируется как тяжелая аварийная ситуация.

Высокий уровень повреждаемости опорных изоляторов подтверждается недавно проведенными обследованиями их состояния в Юго-Западной электроэнергетической системе НЭК «Укрэнерго». (М.П. Лабзун. Диагностика опорно-стержневых изоляторов средствами инфракрасной техники// Электрические сети и системы. -2009-№2). За период 2002-2008гг проверены 7500 изоляторов, что составляет более половины от общего количества изоляторов в данной энергосистеме. Из них дефектных изоляторов составило около 12%.

Заключение. В данной статье дана информация как об общей картине аварийности распределительных устройств 220 – 750 кВ Украины, так и, в частности, об уровнях отказов конкретных видов энергетического оборудования и их составных элементов, проведено ранжирование весовых составляющих причин отказов различных элементов подстанционного оборудования.

Список литературы: 1. Лабзун М.П. Диагностика опорно-стержневых изоляторов средствами инфракрасной техники / М.П. Лабзун // Электрические сети и системы. -2009. -№2 .
Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.311

А.П. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Г.И. ЧЕРКАШИНА, ассистент, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА

В роботі представлено розрахунок характеристик споживання електричної енергії житлового будинку, а саме коефіцієнт несиметрії, коефіцієнт форми, коефіцієнт завантаження силових трансформаторів ТП, а також аналіз їх впливу на втрати електричної енергії.

In work the calculation of descriptions of consumption of electric energy of dwelling-house is represented, namely coefficient of unsymmetry, coefficient of form, load factor of the power transformers TP, and also analysis of their influence on the losses of electric energy.

Передача и потребление электроэнергии неизбежно сопровождается потерями мощности и энергии в трансформаторах и линиях. Указанные потери покрываются за счет увеличения мощности источника питания и пропускной способности всех элементов сети, т.е. за счет повышения капиталовложений. Кроме того, потери влекут за собой перерасход топлива на электростанциях энергосистем, что особенно актуально в современных условиях.

В данной работе рассматривается электропотребление жилым домом – первичной ячейкой жилого сектора. Актуальность данного вопроса возрастает в связи с ростом доли бытового потребления, а, следовательно, и влияния его на режимы и характеристики электропотребления по энергосистеме.

В качестве исследуемого объекта был выбран жилой дом, технические характеристики которого приведены ниже:

- Этажность – 9 этажей
- Тип плиты – электрическая
- Тип кабеля от ТП до ВРУ дома – АВВГ-120
- Расстояние до ТП – 200 м.

- Годовое потребление электрической энергии – $236 \cdot 10^6$ кВт·ч

На момент сдачи в эксплуатацию на ТП были установлены 2 трансформатора типа ТМ 630/6.

В ходе эксплуатации, в следствии низкого коэффициента загрузки трансформаторов ТП, была произведена замена и установлены новые трансформаторы типа ТМ-400/6 и ТМ-320/6 кВА. Контрольные замеры значений тока нагрузки до замены трансформаторов и после представлены в таблице 1, 2 соответственно.

Таблица 1 – Результаты замеров тока нагрузки до замены трансформаторов

Дата замера	Время замера	№ тр-ра	Тип	Мощность, кВА	Ном.ток, А	Режим работы	Ток нагрузки, А		
							Фаза А	Фаза В	Фаза С
29.02.08	20.54	1	ТМ	630	910	Разд	20	10	10
		2	ТМ	630	910	Разд	40	90	50

Таблица 2 – Результаты замеров тока нагрузки после замены трансформаторов

Дата замера	Время замера	№ тр-ра	Тип	Мощность, кВА	Ном.ток, А	Режим работы	Ток нагрузки, А		
							Фаза А	Фаза В	Фаза С
03.02.09	20.45	1	ТМ	400	580	Разд	5	0	0
		2	ТМ	320	462	Разд	40	95	55

1 Влияние несимметрии нагрузки

Симметричная нагрузка:

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

при условии, что $I_A = I_B = I_C$, $I_N = 0 \Rightarrow \Delta W_N = 0$

где $I_A; I_B; I_C$ – токи фаз А, В, С, соответственно; I_N – ток в нейтрали (нулевом проводе); ΔW_N – потери электрической энергии в нулевом проводе.

Потери в сети будут обусловлены потерями в линейных проводах:

$$\Delta W_A + \Delta W_B + \Delta W_C = \Delta \sum W = 3 \cdot \Delta W_\phi$$

Несимметричная нагрузка:

Создает дополнительные потери в силу неравенства:

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \geq 3 \cdot I_{CP}^2$$

А также создает дополнительные потери за счет прохождения тока по нулевому проводу.

$$I_A + I_B + I_C \neq 0 \Rightarrow I_N \neq 0$$

Общие потери

$$\Delta W = I_A^2 \cdot R_A + I_B^2 \cdot R_B + I_C^2 \cdot R_C + I_0^2 \cdot R_0$$

Потери в линии 0,4 кВ (%) с учетом несимметрии нагрузки

$$\Delta W = \frac{W^2 \cdot (1 + tg^2 \phi) \cdot k_\phi^2}{24 \cdot D \cdot U^2} \cdot k_{нес} \cdot R_{ЭК}$$

где tgj – коэффициент нагрузки, $tgj = 0,2$; k_ϕ^2 – коэффициент формы графика нагрузки; $k_{нес}$ – коэффициент несимметрии.

Коэффициент формы графика нагрузки:

$$k_\phi^2 = \frac{1 + 2 \cdot k_3}{2 \cdot k_3} = 2,1267$$

где k_3 – коэффициент заполнения графика нагрузки.

Коэффициент несимметрии:

$$k_{нес} = 3 \cdot \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \cdot (1 + 1,5 \cdot \frac{R_N}{R_\phi}) - 1,5 \cdot \frac{R_N}{R_\phi}$$

где $\frac{R_N}{R_\phi}$ – отношение сопротивлений нулевого и фазного проводов.

Определим экономию потерь электроэнергии при проведении выравнивания нагрузки по фазам:

$$\delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2$$

где ΔW_1 – потери электрической энергии до симметрирования; ΔW_2 – потери электрической энергии после симметрирования.

Коэффициент несимметрии до симметрирования:

$$k_{\text{нес}1} = 3 \cdot \frac{40^2 + 95^2 + 55^2}{(40 + 95 + 55)^2} \cdot (1 + 1,5 \cdot 1) - 1,5 \cdot 1 = 1,34$$

Коэффициент несимметрии после симметрирования:

$$k_{\text{нес}2} = 3 \cdot \frac{63^2 + 64^2 + 63^2}{(63 + 64 + 63)^2} \cdot (1 + 1,5 \cdot 1) - 1,5 \cdot 1 = 0,0001$$

Потери электрической энергии до симметрирования:

$$\Delta W_1 = \frac{237 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,85^2) \cdot 2,1267^2}{8760 \cdot 380^2} \cdot 1,34 \cdot 0,054$$

$\Delta W_1 = 25000807,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (10,54% от годового потребления электрической энергии)

Потери электрической энергии после симметрирования:

$$\Delta W_2 = \frac{237 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,85^2) \cdot 2,1267^2}{8760 \cdot 380^2} \cdot 1,0001 \cdot 0,054$$

$\Delta W_2 = 18659184,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (7,87% от годового потребления электрической энергии)

Экономия потерь электроэнергии:

$$\delta W = 25000807 - 18659184,7 = 6341622,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \text{ или } 2,7\%$$

2 Влияние загрузки силовых трансформаторов

Годовые потери электроэнергии в трансформаторе:

$$\Delta W_{TP} = \Delta W_{XX} + \Delta W_{K3}$$

$$\Delta W_{XX} = \Delta P_{XX} \cdot T$$

$$\Delta W_{K3} = k_3 \cdot \Delta P_{K3} \cdot T$$

Для трансформатора ТМ-400/6

$$\Delta W_{TP400} = 1,05 \cdot 8760 + 0,01 \cdot 5,5 \cdot 8760 = 9676,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Для трансформатора ТМ-320/6

$$\Delta W_{TP320} = 1,6 \cdot 8760 + 0,15 \cdot 6,1 \cdot 8760 = 22031,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Суммарные потери

$$\Delta W_{TP} = \Delta W_{TP400} + \Delta W_{TP320}$$

$$\Delta W_{TP} = 31707,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \text{ (13,38\%)}$$

3 Влияние неравномерности графика нагрузки потребителей электрической энергии

Так как потери электрической энергии в линиях электропередач, пропорциональны квадрату тока, сопротивлению и времени электропотребления то

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(T) dT \Rightarrow \Delta W = R \int_0^T I^2(T) dT.$$

Можно констатировать, что форма графика электропотребления существенно влияет на величину потерь электроэнергии на ее передаче.

Мероприятия по выравниванию графика нагрузки рекомендуется выполнять потребителям электрической энергии под оперативным управлением энергоснабжающей организации.

Снижение потерь электроэнергии от выполнения мероприятия δW определяется по следующей формуле

$$dW = \Delta W_H \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 2}^2}{k_{\phi 1}^2}\right) \text{ или } dW = \frac{W_P^2 + W_Q^2}{U^2 \cdot T} \cdot R_{\Sigma} \cdot (k_{\phi 1}^2 - k_{\phi 2}^2),$$

где $k_{\phi 1}$, $k_{\phi 2}$ – коэффициенты формы графика нагрузки соответственно до выравнивания и после него; ΔW_H – нагрузочные потери в электрической сети

при коэффициент формы $k_{\phi 1}$

$$dW = 4440433,7 \cdot \left(1 - \frac{1}{2,1267}\right) = 2353429,86 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \text{ или } 1\%$$

Вывод. Таким образом, выполняя мероприятия по симметрированию нагрузки по фазным проводам питающей сети, по выравниванию графиков нагрузки потребителей, можно снизить потребление электрической энергии на 3,7%.

Список литературы: 1. РД 34.20.185-94 «Инструкции по проектированию городских электрических сетей»; 2. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38 – 150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії, ГНД 3.4.09.104-2003; 3. Методичні рекомендації щодо визначення понаднормативних втрат електроенергії в електричних мережах енергопостачальних компаній, ТОВ «Енергосалтінг», Київ 2004.



Лазуренко Александр Павлович закончил в 1981 году ХПИ по специальности «Автоматика и телемеханика» факультета «Автоматика и приборостроение». В 1991 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Многофункциональный измерительный преобразователь электрических параметров энергообъектов». Круг научных интересов – измерение энергетических параметров для информационного обеспечения задач энергосбережения, повышение энергоэффективности систем электроснабжения бытовых потребителей, моделирование процессов в энергосистемах при решении задач повышения энергоэффективности.



Черкашина Галина Игоревна закончила электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 2006 г. по специальности «Энергетический менеджмент». Круг научных интересов: разработка комплексных энергосберегающих мероприятий на основе информационных моделей «идеального потребителя».

Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.315

С.В.ЛАКТИОНОВ, аспирант, НТУ «ХПИ»

ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Виконано розрахунки напруги початку часткових розрядів в кабелях високої напруги зі зшитого поліетиленовою ізоляцією. Встановлені рівні випробувальної напруги, при яких активізуються повітряні порожнини максимально можливого розміру.

Выполнены расчеты напряжения начала частичных разрядов в кабелях высокого напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена. Установлены уровни испытательных напряжений, при которых активизируются воздушные полости максимально допустимого размера.

Полимерная изоляция на основе сшитого полиэтилена чувствительна к посторонним микровключениям, пустотам, выступам на электропроводящих экранах, расслаиваниям изоляции и другим дефектам, которые повышают локальную напряженность электрического поля и создают предпосылки для возникновения частичных разрядов (ЧР). Под действием ЧР в полимерной изоляции развиваются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя. Развитие дендритов приводит к быстрой деградации изоляции и, в конечном итоге, к преждевременному пробое кабеля [1 – 4]. В кабелях высокого напряжения средняя напряженность электрического поля в 3 раза выше, чем в кабелях среднего напряжения. Поэтому требования к однородности изоляции в таких кабелях более высокие (Таблица 1).

Таблица 1- Требования к однородности изоляции кабелей

Параметр	Кабели среднего напряжения 6 – 35 кВ	Кабели высокого напряжения 35 – 200 кВ
Средняя напряженность электрического поля, E, кВ/мм	2	6
Размер недопустимых примесей, мкм	> 200	>100
Примеси, подлежащие контролю, мкм	100 – 200	70 - 100
Максимально допустимая концентрация примесей, подлежащих контролю, шт/ кг	3	10
Максимальный размер воздушной полости в толще изоляции в соответствии со стандартом S-94-649-2004 (ANSI/ ICE, США), мкм	76	51

Цель статьи – установить усредненные пороговые значения испытательных напряжений в изоляции на основе сшитого полиэтилена

кабелей высокого напряжения, при которых активизируются ЧР в воздушных полостях, меньших максимально допустимого размера.

ЧР принято характеризовать рядом параметров: напряжение начала ЧР – $U_{нчр}$; кажущаяся амплитуда ЧР – $q_{чр}$; частота импульсов ЧР – $n_{чр}$; фазовые характеристики ЧР. Характеристики частичных разрядов зависят от типа, размера и местоположения дефекта, изоляционного материала, приложенного напряжения, температуры кабеля, а также изменяются с течением времени.

Напряжение начала ЧР связано с толщиной x воздушного включения (рис.1).

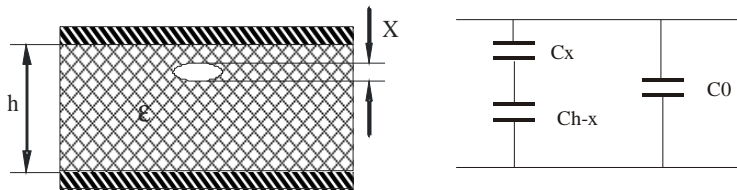


Рис. 1 - Модель для расчета напряжения начала ЧР: x – толщина воздушного включения в изоляции; h – толщина изоляции; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. C_x – емкость включения; C_{h-x} – емкость части изоляции напротив включения; C_0 – емкость остальной части изоляции.

Для качественной изоляции $x \ll h$. Найдем, какая часть U_x внешнего напряжения U приходится на включение. Емкость включения [5]:

$$C_x = \epsilon_0 S_x / x. \quad (1)$$

Емкость сплошного слоя диэлектрика, расположенного напротив включения

$$C_{h-x} = \epsilon \epsilon_0 S_x / (h-x), \quad (2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S_x – площадь включения, м². Тогда из емкостной схемы замещения находим U_x :

$$U_x = U \frac{1/(wC_x)}{1/(wC_x) + 1/(wC_{h-x})} = U \frac{\epsilon x}{h + (\epsilon - 1)x} \quad (3)$$

При $x \ll h$ напряжение на включении стремится к нулю $U_x \rightarrow 0$, (т.к. ее собственная емкость неограниченно возрастает), при $x \rightarrow h$ все внешнее напряжение приходится на включение $U_x \rightarrow U$ (т.к. она занимает весь изоляционный промежуток).

Если напряжение на включении достигает уровня пробивного напряжения

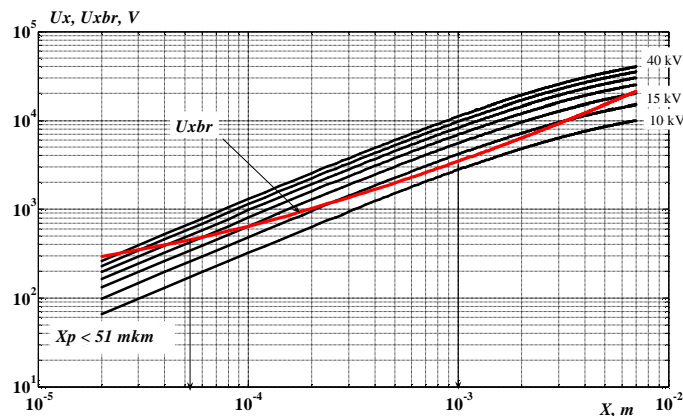
$$U_x \geq U_{xbr}, \quad (4)$$

то включение пробьется. Так как при этом пробивается только часть x изоляционного промежутка h , то разряд называют частичным. Соответствующее напряжение на электродах, при котором начинает выполняться условие (4), и есть так называемое напряжение начала ЧР – $U_{нчр}$ [9 - 11].

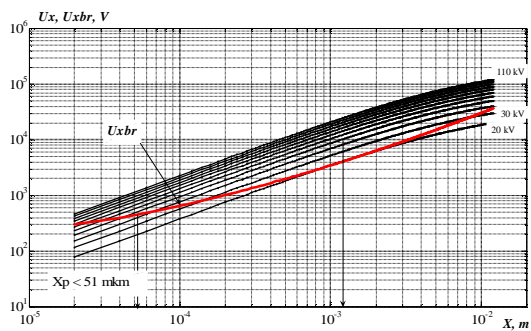
В таблице 2 приведены результаты расчета напряжений начала частичных разрядов в полиэтиленовой шитой изоляции ($\epsilon = 2,3$) в зависимости от ее толщины, соответствующей кабелям разного класса напряжения. Там же приведены размеры включений, которые загораются при касании кривых U_x и U_{xbr} .

Таблица 2 - Минимально возможные значения напряжения начала частичных разрядов и толщина активизируемых включений в толще шитой полиэтиленовой изоляции силовых кабелей высокого напряжения

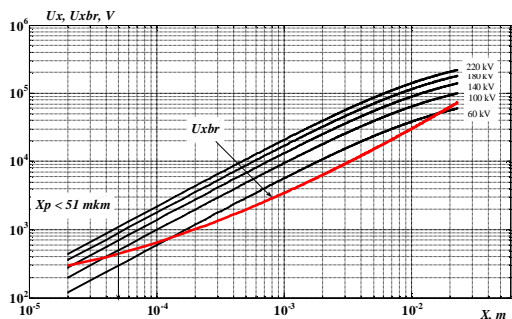
Линейное/Фазное напряжение кабеля, кВ	Толщина изоляции, h, мм	Напряжение начала ЧР $U_{нчр}$, кВ	Размер активизируемых воздушных включений X, мкм
35/20	7	12,5	1000
110/64	12	19,8	1400
220/127	23	35,3	1900
330/190	26	53	2100



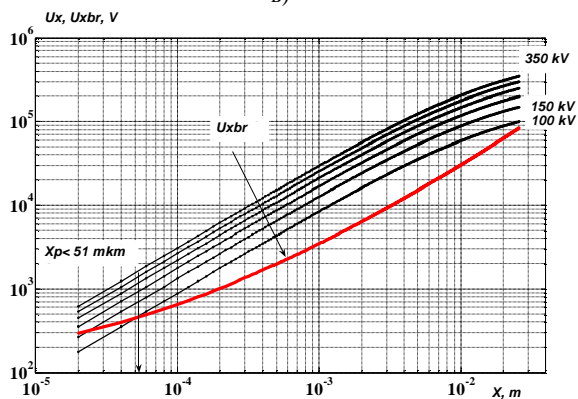
а)



а)



б)



в)

Рис.2 - Зависимости от толщины (x) воздушного включения его пробивного напряжения (U_{xbr}) и расчетных напряжений на включениях при толщинах изоляции: а - 7 мм; б - 12 мм; в - 23 мм; г - 26 мм

Как видно из результатов расчета, при напряжении начала ЧР активизируются грубые включения миллиметрового размера, которых не должно быть в толще твердой сшитой полиэтиленовой изоляции.

На рис.2 приведены зависимости от толщины (x) воздушного включения его пробивного напряжения (U_{xbr}) и расчетных напряжений на включениях в толще изоляции силовых кабелей высокого напряжения.

Воздушные полости размером от 100 до 51 мкм активизируются при подаче испытательного напряжения в диапазоне: 20 – 25 кВ при толщине изоляции 7 мм (кабель напряжением 35 кВ); 35 – 45 кВ при толщине изоляции 12 мм (кабель напряжением 110 кВ); 60 – 80 кВ при толщине изоляции 23 мм (кабель напряжением 220 кВ) и 70 – 110 кВ при толщине изоляции 26 мм (кабель напряжением 330 кВ) соответственно.

При более высоких испытательных напряжениях будут загораться полости размером меньше, чем 51 мкм, т.е. те, которые не представляют опасности для работы кабелей высокого напряжения.

Таким образом, усредненные значения пороговых испытательных напряжений, соответствующих активизации полостей размером, меньше 50 мкм, составляют: **25 кВ** (кабели на 35 кВ); **45 кВ** (кабели на 110 кВ); **80 кВ** (кабели на 220 кВ); **110 кВ** (кабели на 330 кВ).

Значения пороговых уровней испытательных напряжений могут быть рекомендованы при освоении выпуска кабелей высокого напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена для выявления включений, представляющих опасность для изоляции.

Список литературы: 1. Кабели на напряжение 10 -500 кВ: состояние и перспективы развития / Г.И. Мещанов, М.Ю. Шувалов, М.К. Каменский и др. // Кабели и провода. – 2008. – №5 (312). – С.32 – 38. 2. Пешков И.Б. Электрохимическое старение полимерной экструдированной изоляции силовых кабелей: исследования, испытания, диагностика, оценка ресурса / И.Б.Пешков, М.Ю.Шувалов // Изв. Акад. наук России. Энергетика. – 2008. – №1. – С.70 – 88. 3. Щерба А.А. Анализ процессов электрического старения полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых электрокабелей / А.А. Щерба, М.М.Резинкина // Технічна електродинаміка. – Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ. – 2006. – Ч.1. – С.106 – 111. 4. Набока Б.Г. Твердая тонкослойная изоляция: контроль технологии изготовления и диагностика качества / Набока Б.Г. – Х.: Основа, 1996. – 180 с. 5. Божко И.В. О напряженности электрического поля начала частичных разрядов в твердой изоляции / И.В. Божко, И.С. Петухов, А.П. Рацелкин // Технічна електродинаміка. – Київ. – 2001. – № 5. – С. 18 – 23. 6. Early detection of electrical tree through advanced PD measurement inference techniques / A. Cavallini, M. Conti, G. C. Montanari and all // JICABLE: Versailles, France. – June 2003. – P. 612 – 616. 7. Advanced PD inference in on-field measurements. Part 2: Identification of defects in solid insulation / A. Cavallini, M. Conti, A. Contin and all // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – June 2003. – Vol. 10. - № 3. – P. 528 – 538. 8. Набока Б.Г. Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // Электричество. – М. – 1990. – № 11.– С. 71 – 74. 9. Набока Б.Г. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // Электричество. – М. – 1991. – № 5.– С. 5 – 9.

Надійшла в редколегію 03.09.2010

Е.В. МОРОЗОВА, ОАО «Одескабель»

ТЕМПЕРАТУРОСТОЙКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕРМОЗОНЕ АЭС

Розглянута стійкість кварцових оптичних волокон з особливими фізико-механічними властивостями до дії високих температур. Такі волокна можуть бути використані як сенсори (датчиків), які експлуатуються в агресивних і вибухонебезпечних середовищах разом з волоконно-оптичними кабелями. Оптичне волокно з осердям на основі чистого кварцу і оболонкою, яка легована домішками фтору, більш стійка до дії опромінювання. Захисна оболонка з металу дозволяє розширити температурний діапазон експлуатації оптичних волокон. Залежно від типу металевієї захисної оболонки оптичні волокна можуть працювати при температурах до 700 °С.

Stability of quartz optical fibers with special physic mechanical properties to influence high temperatures is considered. Such fibers are used as the sensor controls (gauges) working in aggressive and explosive environments together with optical fiber cables. The optical fiber with a core from pure quartz and an environment alloyed by an impurity of fluorine is established, that is steadier against influence of an irradiation. The protective environment from metal allows expanding a temperature range of operation of optical fibers. Depending on type of a metal protective environment optical fibers can work at temperatures up to 700 °C.

Введение. Кварцевые стекла являются основой для изготовления оптических волокон (ОВ) в системах автоматического контроля и управления различными объектами и процессами АЭС. Оптические волокна в качестве детекторов γ -излучения позволяют регистрировать как дозу облучения, так и местоположение воздействия. Они обладают рядом преимуществ: малым диаметром, отсутствием электромагнитных помех, возможностью измерения от распределенного участка и работы в агрессивных и взрывоопасных средах. При этом оптические волокна могут работать как в качестве датчика, так и в качестве линии связи [1 – 7].

Требования к защитной оболочке ОВ гермозоны. ОВ состоят из сердцевинки (1), светоотражающей оболочки (2), первичного полимерного покрытия (3), защищающего ОВ от механических воздействий и влаги, и вторичного защитного покрытия (4) (рис.1). В зависимости от условий эксплуатации защитное покрытие может выполняться свободным, в виде трубки, или плотным. В последнем случае обеспечивается повышенная гибкость волокна, что особенно важно при эксплуатации ОВ в системах контроля гермозоны АЭС. При этом условия эксплуатации ОВ, предназначенных для работы в гермозоне, отличаются от режимов работы ОВ вне гермозоны. Волокна, работающие в гермозоне, должны сохранять работоспособность, как в режиме нормальной эксплуатации, так и в режимах нарушения теплоотвода из герметичной зоны, малой течи, большой течи и запроектной аварии [6]. Для этого ОВ должно иметь герметичную защитную оболочку, которая

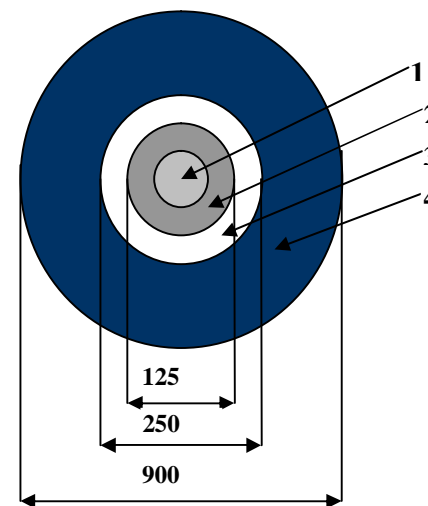


Рис.1 - Конструкция оптического волокна в плотном вторичном защитном покрытии для прокладки внутри помещений

обеспечивает герметичность при многократной обмывке дезактивирующими растворами; выдерживает не менее 120 циклов нагрева и охлаждения за срок службы; устойчива к воздействию высоких температур до + 250 °С в течение, как минимум, 1 часа (в режиме запроектной аварии). Защитная оболочка должна быть радиационно-стойкой и сохранять герметичность и работоспособность ОВ во всем диапазоне сейсмических воздействий для максимального расчетного землетрясения в 8 баллов по шкале МК-64 включительно. При этом собственные частоты колебаний защитной оболочки не должны попадать в запрещенный диапазон частот 23-65 Гц [2].

Таким требованиям удовлетворяют металлизированные ОВ с сердцевинкой из чистого кварца и светоотражающей оболочкой, легированной примесью фтора. В зависимости от диапазона рабочих температур в качестве защитной оболочки волокон могут использоваться, как температуростойкие полимеры, так и металлы (таблица 1).

Цель статьи – влияние температуры на термомеханические напряжения в кварцевых оптических волокнах с металлической защитной оболочкой для датчиков гермозоны АЭС.

Таблица 1 - Основные характеристики температуростойких оптических волокон

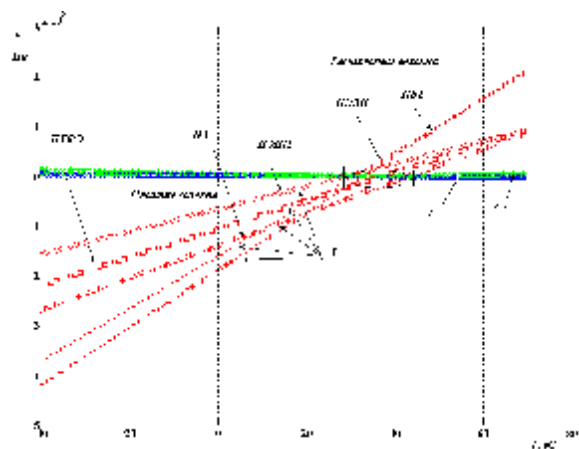
Сердцевина	WF – чистый плавный кварц (низкое содержание гидроксильной группы OH-) UV – чистый плавный кварц (высокое содержание OH- 1200-1700 ppm)
Числовая апертура	NA=0.22 ±0.02
Светоотражающая оболочка	Кварц, легированный примесями фтора
Первичное защитное покрытие	Силиконовое покрытие (диапазон рабочих температур от -40°C до 180°C) Полиамидное покрытие (диапазон рабочих температур от -190°C до 385°C)
Защитная оболочка	1. Нейлон (диапазон рабочих температур от -40°C до 100°C) 2. Тефлон (политетрафторэтилен) (диапазон рабочих температур от -40°C до 150°C) 3. Полиамид П6 – П12 (диапазон рабочих температур -40°C до 100°C) 4. Акрилат (диапазон рабочих температур от -40°C до 85°C) 5. Алюминий (диапазон рабочих температур -70°C до 400°C) 6. Медь (диапазон рабочих температур -70°C до 600°C) 8. Кадмий (диапазон рабочих температур -70°C до 700°C)

Металлические защитные покрытия. Кварцевые оптические волокна с герметичным металлическим покрытием обладают всеми преимуществами стандартных оптических волокон. Преимуществом металлических защитных покрытий является повышенная механическая прочность и большое сопротивление "усталости", жаростойкость (таблица 2). Передаточные характеристики соответствуют аналогичным диапазонам стандартных оптических волокон в диапазоне длин волн от 200 до 2400 нм, в зависимости от выбора сердцевинки волокна, работающего в УФ ($\lambda < 480$ нм) или ИК ($\lambda > 780$ нм) диапазонах. Отличительной особенностью металлизированных волокон является работоспособность в коррозионных средах, которые реагируют с обычными полимерными покрытиями, а также: широкий температурный диапазон от -70 °C до 700 °C; высокая лучевая прочность; улучшенное охлаждение волокна в связи с теплопроводящим металлическим покрытием; высокая механическая прочность и гибкость по сравнению с волокнами с полимерным покрытием; высокая радиационная устойчивость; возможность использования в вакууме и агрессивных средах [3, 4].

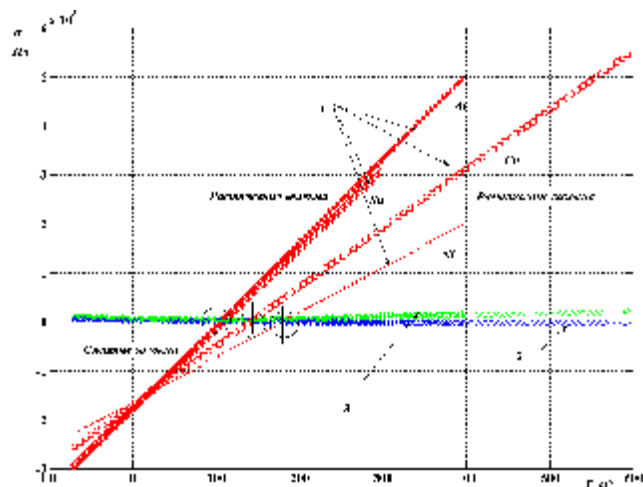
Таблица 2 - Механические и тепловые свойства материалов при нормальных условиях

Материал	Плотность, γ , 10^3 кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	ТКЛР, α , 10^{-6} 1/°K
Кварцевое стекло	2,2	72,5	0,55
Полибутилентерефталат	1,31	1,6	150
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	0,92	0,2-0,3	100 - 250
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	0,95	1,0	100 - 250
Поливинилхлоридный пластикат	1,3	0,5	150
Полиамид	1,06	1,7	78
Поликарбонат	1,20	2,3	65
Политетрафторэтилен (фторопласт или тефлон)	2,2	0,8	100
Медь мягкая	8,89	123	17
Медь твердая	8,89	135	17
Алюминий мягкий	2,7	68	23,8
Алюминий твердый	2,7	72	23,8
Олово	7,3	55	23
Никель	8,85	205	13,3
Серебро мягкое	10,5	76	19,7

Помимо преимуществ наблюдается и ряд существенных недостатков металлизированных волокон. Экспериментально показано, что нанесение дополнительной металлической оболочки может приводить к существенному росту потерь излучения. Также в процессе нанесения металлического покрытия возрастает вероятность появления большого числа микроизгибов из-за относительно высокого модуля упругости и достаточной толщины покрытия. Такое покрытие вследствие усадки после нанесения, вызванной разницей в температурных коэффициентах линейного расширения материалов волокна и покрытия или релаксационными процессами, вызывает микроизгибы волокна и, как следствие, избыточные оптические потери. Поэтому процесс изготовления металлизированных волокон очень сложный и требует особого контроля и внимания [5].



а)



б)

Рис.2 - Зависимость термомеханических напряжений в оптическом волокне на основе кварца при разных материалах защитного покрытия: 1 -термомеханические напряжения в самом волокне; 2 – термомеханические напряжения в защитном покрытии; 3 – общее напряжение в конструкции

Расчет термомеханических напряжений в ОВ с металлическими защитными покрытиями. Расчет термомеханических напряжений выполнен для двух случаев: 1) при применении в качестве защитных покрытий

традиционных полимерных материалов (рис.2а); 2) при применении металлических покрытий (рис.2б). В обоих случаях в качестве материала первичного полимерного покрытия использовался двухслойный лак: внутренний слой, прилегающий к волокну, взят с малым значением модуля Юнга (упругости)- $E=10\text{ МПа}$, а второй – с высоким – $E=2,5\text{ ГПа}$. Выполнение первичного покрытия в виде двух концентрических слоев с разными механическими свойствами обеспечивает уменьшение термомеханических напряжений в самом волокне [7].

Выводы. Применение металлических защитных покрытий приводит к расширению диапазона работы оптического волокна в зоне термомеханических сжатий. Для волокон с полимерными защитными покрытиями растяжение начинается в диапазоне температур $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ПЭНП)– $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ПА), а при применении металлических – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для алюминия) – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для никеля). Прочность кварцевых волокон на сжатие на порядок выше, чем на растяжение. Это значит, что в волокне процесс роста микротрещин Гриффиттса замедлен. В то же время, герметичные металлические покрытия, в отличие от полимерных, являются рентгеноконтрастными, допускают стерилизацию и обеспечивают неизменность оптических и механических характеристик оптического волокна при длительном воздействии неблагоприятных факторов внешней среды: влажности, температуры, радиации. Однако сложность технологии нанесения таких покрытий ограничивает возможность изготовления и применения. Это специальные ОВ, которые могут использовать в гермозонах АЭС.

Список литературы: 1. Волков С.В. Распределенные люминесцентные сенсоры гамма-излучения на основе кварцевых стекол / С.В.Волков, Т.П. Янукович; под ред. проф. С.А. Козлова // «Оптика-2003»: труды III –й Международной конференции молодых ученых и специалистов. - СПб: СПбГУ ИТМО. - 2003.- 377 с. 2. Костоков Н.С., Холодный С.Д. Герметичные кабельные вводы для АЭС / Н.С. Костоков, С.Д. Холодный.- М.: Наука. - 2004.- 236 с. 3. Оптические волокна типа кварц/кварц металл [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.optofiber.ru> 4. Оптическое кварцевое волокно со ступенчатым профилем и фторсодержащей оболочкой в металлическом покрытии [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.fiberlab.ru> 5. Шевандин В.С. Кварцевые волоконные световоды с особыми оптическими и механическими свойствами / В.С. Шевандин [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.fiberlab.ru>. 6. Морозова Е.В. Действие облучения на материалы конструктивных элементов волоконно-оптических кабелей / Е.В. Морозова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. - N34. - С.40 - 48. 7. Беспрозванных А.В. Влияние примесей на радиационно-наведенные потери в оптических волокнах / А.В.Беспрозванных, Б.Г.Набока, Е.В.Морозова // Вестник НТУ «ХПИ».- 2006. -№ 7. - С. 53-58. 7. Беспрозванных А.В. Термомеханические напряжения в оптических волокнах с плотным вторичным покрытием / А.В. Беспрозванных, И.В. Морозов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. -№ 7. - С. 53-58.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В статье представлены современные проблемы энергоэффективности с точки зрения политической, экономической, экологической, социальной, финансовой сфер.

In the article the modern problems of energoefficiency are represented from point of political one, economic, ecological, social, financial spheres.

Современные проблемы энергоэффективности в Украине лежат в нескольких плоскостях: политической, экономической, экологической, социальной и финансовой.

Политический аспект характеризуется отсутствием единой энергетической политики в государстве, что, прежде всего, связано с отсутствием управления энергетикой в целом и организацией управления последней с учетом перспективного взаимного влияния действий направленных на энергосбережение в разных отраслях народного хозяйства.

Экономический аспект связан, прежде всего, с отсутствием единой экономической политики и стратегии развития экономики государства. Анализ стратегии развития энергетики до 2030 года показывает, что в этом документе так и не представлена стратегия развития направлений энергетики, а лишь дано представление о прогнозах развития отдельных направлений. Кроме того, для устойчивого развития экономики государства необходимо вкладывать в развитие энергетики в год:

- не менее 4-5% ВВП,
- обеспечивать снижение энергоемкости производства на 1-2% ,
- не допускать изношенность основных фондов более 45%,
- обеспечить вложение средств на разведку источников энергии в размере 1-2% ВВП,
- обеспечить диверсификацию поставок энергоресурсов.

Ни один из перечисленных факторов на сегодняшний день не выполняется.

Экологический аспект характеризуется, прежде всего, снижением нагрузки на окружающую среду за счет рационального использования органических видов топлива.

Социальный аспект – это обеспечение потребителей необходимым количеством конечных энергоресурсов соответствующего качества и по доступной цене.

Финансовые аспекты – это, прежде всего, нестабильность финансовой политики и системы налогообложения, а также не привлекательная кредитная политика.

Управление энергетическими потоками на основе оптимизации совокупных затрат на энергию с обеспечением перечисленных выше аспектов и есть основная задача энергоменеджмента.

В зависимости от иерархического уровня, энергоменеджмент подразделяется на: государственное управление, региональное и/или отраслевое, местное и уровень субъекта хозяйствования.

Следует отметить, что в настоящее время на всех уровнях уже хорошо освоен раздел энергоменеджмента - энергосбережение. В тоже время начиная с 1998 года не освоен раздел учета и контроля за потреблением энергоресурсов, организация энергоаудита и постановка энергоменеджмента на всех уровнях, включая субъекты хозяйствования. Последнее свидетельствует о недостаточности обучения в этом направлении, как в сфере государственного управления, так и на уровне отдельных субъектов хозяйствования.

Мотивация – является одним из наиболее действенных механизмов в направлении энергосбережения и полностью соответствует требованиям Закона Украины «Про энергосбереження». Отсутствие использования метода мотивации является ярким примером неисполнения законодательной базы. Можно привести еще ряд примеров неисполнения законодательной база и ряда подзаконных актов, например, не укомплектованность приборами учета, обязательное повышение квалификации в области энергоэффективности и ряд других.

Практически не на одном из предприятий, несмотря на наличие систем АСКУЭ не организована постановка энергоменеджмента, что приводит к несвоевременным и зачастую неэффективным принятием технических решений направленных на экономии затрат на энергоносители.

Вопросы, связанные с энергоэффективностью по-прежнему возлагаются на главного энергетика предприятия, хотя основными потребителями энергоресурсов являются производственные подразделения.

В бюджетной сфере и жилищно-коммунальном хозяйстве вопросы энергоменеджмента полностью отсутствуют. Предприятия поставщики коммунальных услуг, внедряя энергосберегающие мероприятия при этом не учитывают, что конечный потребитель является их инвестором и, в конечном счете придет время, когда он начнет спрашивать о потраченных средствах, если не почувствует положительных изменений как в качестве и стабильности услуг, так и снижении тарифных ставок.

Если говорить об энергоэффективности в теплоснабжении, то самая большая экономия затрат первичных энергоносителей будет от снижения потерь и, следовательно, в конечном счете за счет снижения производства тепловой энергии. А это не выгодно, в первую очередь, теплогенерирующим предприятиям. Аналогичная ситуация и в других сферах энергоснабжения.

Таким образом, только при организации энергоменеджмента на всех иерархических уровнях управления государством можно достичь максимального эффекта минимизации затрат первичных энергоносителей, что собственно и есть основная задача энергоэффективности.

На сегодняшний день, основываясь на одном из важнейших критериев состояния экономики государства – энергоёмкости, можно показать, что при нынешнем потреблении энергоресурсов у нас не может быть высокого уровня жизни.

Если учесть, что энергоёмкость валового национального продукта Украины вдвое выше средне мирового значения (0,4 кг. у.т./\$ США) и составляет 0,89 кг. у.т./\$ США, население 46 млн. человек, а совокупное потребление первичных энергоресурсов составляет:

- Собственная добыча угля – 80 млн т. в год или в пересчете на условное топливо – 68,2 млн т. у.т
- Собственная добыча природного газа – 20 млрд. м³ в год или 23,2 млн т. у.т.
- Производство электроэнергии атомными станциями (с учетом потерь, т.е. фактическое потребление) 76 млрд кВт.ч в год или 27,512 млн т. у.т.

Таким образом, совокупное потребление энергоресурсов составляет:

$$68,2 + 23,2 + 27,512 = 118,912 \text{ млн т. у.т.}$$

Из выражения энергоёмкости после подстановки получим:

$$E = \frac{A}{\text{ВВП}} \cdot 0,89 = \frac{118,2 \cdot 10^9}{\text{ВВП}}$$

$$\text{ВВП} = \frac{118,2 \cdot 10^9}{0,89} = 1336089887 \text{ 64,0 \$ США}$$

Разделив на численность населения в Украине, мы получим значение среднего годового дохода на душу населения, равного - 2904,54 \$ США, что очень далеко от условий жизни в развитых странах.

Выводы. Отсюда следует, что Украине нужна сбалансированная энергетическая политика и эффективное использование энергоресурсов. При этом не менее чем вдвое снизить энергоёмкость ВВП. Это возможно только при вовлечении нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов, использовании ВЭР, разработке конкретной стратегии развития энергетики, изменений в налоговой и законодательной политике, привлечении к ответственности руководителей всех уровней за нерациональное использование энергоресурсов, обеспечении единой цены на каждый вид энергоносителей в соответствии с их тепловым эквивалентом вне зависимости от статуса потребителя. Так же необходима государственная политика, направленная на создание материальной заинтересованности всех участников процесса от добычи до потребления энергии к повышению эффективности ее использования.

Также необходимо пересмотреть систему тарифообразования, исключив из тарифа потери и переложив их на производителя или передающую организацию при одновременном включении в тариф инвестиционной составляющей. При этом поставщик должен отчитываться перед инвестором за потраченную инвестиционную

составляющую, а в случае коммунального предприятия, когда инвестором оказывается население, информировать в средствах массовой информации.

Б.Г. НАБОКА, д-р.техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
А.П. ГОКОВ, аспирант, НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО СИЛОВЫХ ЛИНИЙ В ОБРАЗЦЕ КАБЕЛЯ АВВГ

Зроблено аналіз впливу частоти та форми зондуючого електричного поля на розподіл його силових ліній для зразка кабелю АВВГ.

The analyze of influence of electrical field force frequency and shape on distribution of it's force lines for sample of cable type of AVVG has been made.

Введение. Диагностика состояния кабельных изделий, на сегодняшний день, является очень актуальной задачей. Вместе с тем эта задача является более многогранной, чем кажется на первый взгляд. Так, показателями качества изделий являются не только состояние изоляции жил кабелей, но и состояние внешней оболочки кабеля, наличие загрязнения под внешней оболочкой, между жилами кабелей и многое другое.

В последнее время, многие авторы уделяют огромное внимание вопросу распределения силовых линий зондирующего электрического поля. Было построено ряд моделей, объясняющих механизмы, происходящие в пределах кабеля. Так в [1] показано, что электромагнитное поле может выходить даже за пределы экранирующих оболочек кабеля. Однако на сегодняшний день нет единой четкой модели распределения силовых линий зондирующего электрического поля.

Цель работы – исследование влияния частоты и формы зондирующего электрического поля образца кабеля АВВГ на распределение его силовых линий в пространстве.

Объект исследования – зондирующее электрическое поле.

Модель исследования – система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), описывающих распределение силовых линий зондирующего электрического поля в пространстве. В модели учитывались: точки на границе жил проводников и их изоляции, поверхности изоляции фаз, внутренняя и внешняя поверхности оболочки.

Как известно [2], на границе раздела двух сред происходит преломление векторов напряженности электрического поля. Для удобства расчетов, вектора раскладывают на две составляющих: тангенциальную – направленную вдоль границы раздела сред и нормальную – перпендикулярную границе раздела. Причем эти составляющие вектора напряженности ведут себя по-разному в точке преломления. Тангенциальная

составляющая при переходе из одной среды в другую не изменяет своего численного значения. Что же касается нормальной составляющей, то закон ее изменения можно выразить следующим соотношением:

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}, \quad (1)$$

где E_{1n} , E_{2n} – соответственно нормальные составляющие напряженности электрического поля в первой и второй средах, ϵ_1 , ϵ_2 – соответственно диэлектрические проницаемости сред 1 и 2.

Таким образом, очевидно, что изменение величины напряженности электрического поля при переходе из одной среды в другую происходит только за счет ее нормальной составляющей.

На постоянном токе соотношение (1) выглядит следующим образом:

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{g_2}{g_1}, \quad (2)$$

где γ_1 , γ_2 – соответствующие проводимости сред 1 и 2.

Численно соотношения (1) и (2) различны. Если отношения диэлектрических проницаемостей находится в пределах десятка единиц, то отношения проводимостей сред проводника и изоляции, по крайней мере, на порядок выше.

Были проведены исследования распределения напряженности электрического поля для дипольного и квадрупольного случаев, было оценено влияние увлажнения внешней оболочки кабеля на распределение силовых линий зондирующего электрического поля. Для случая постоянного тока были сняты кривые восстанавливающегося напряжения образца кабеля АВВГ 4×16-0,4 кВ в исходном состоянии и после увлажнения поверхности защитной оболочки. Результаты исследований отображены на рис. 1-6.

Как видно из рис. 1, наибольшая интенсивность силовых линий электрического поля наблюдается в зоне, которая расположена на поверхности изоляции жил в промежутке напротив жил, которые находятся под разными потенциалами. Повышение напряженности электрического поля обнаруживается также на поверхности оболочки поясной изоляции напротив всех жил кабеля. Таким образом, концентрация силовых линий магнитного поля повышается в зонах в середине кабеля между жилами с разным потенциалом и снаружи – напротив жил кабеля.

Как видно из рис. 2, наибольшая интенсивность силовых линий электрического поля расположена на поверхности изоляции жил, которая обращена к центру кабеля. Повышение напряженности электрического поля обнаруживается также на поверхности оболочки поясной изоляции напротив всех жил кабеля.

Из рис. 1 и 2 видно, что в случае квадрупольного распределения потенциала по жилам кабеля наибольшая концентрация силовых линий электрического поля наблюдается в середине кабеля. В случае дипольного

распределения потенциала повышение концентрации силовых линий электрического поля смещается ближе к внешней оболочке кабеля. Приведенные данные хорошо коррелируют с результатами, полученными в [3].

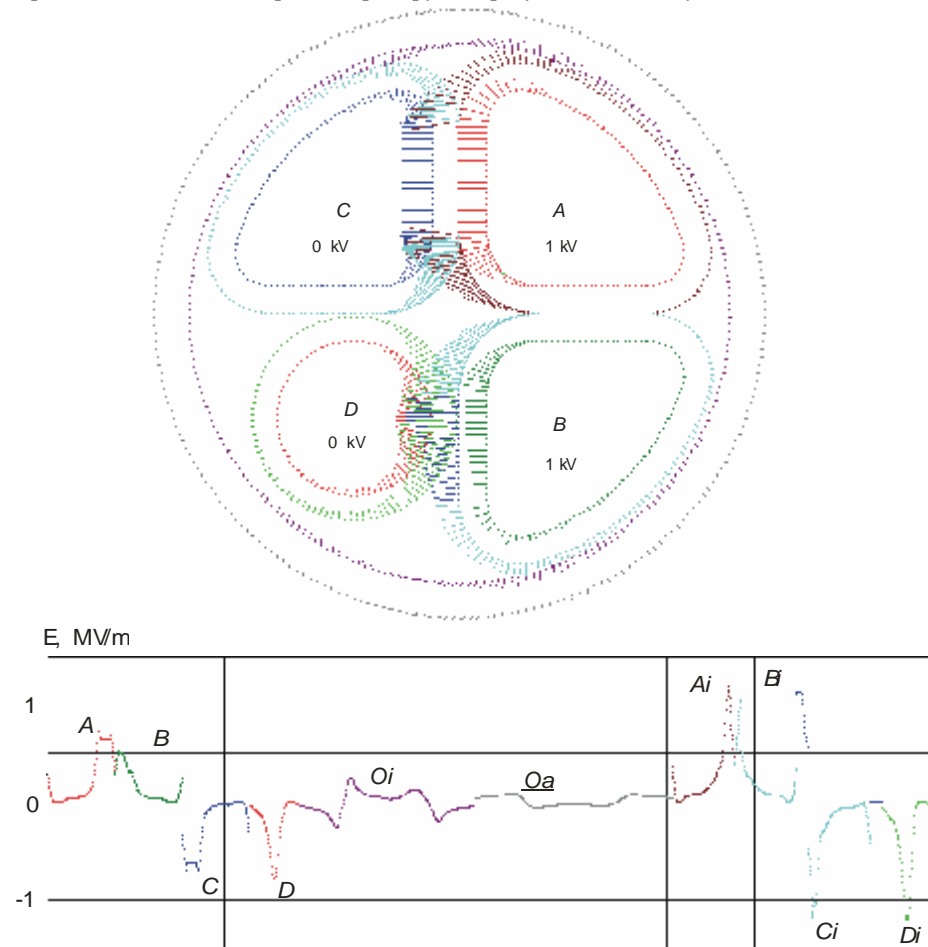


Рис 1 - Дипольное распределение потенциала.
Порядок расположения узлов: фазы A, B, C, D; затем внутренняя и внешняя поверхности оболочки; затем поверхности изоляции фаз

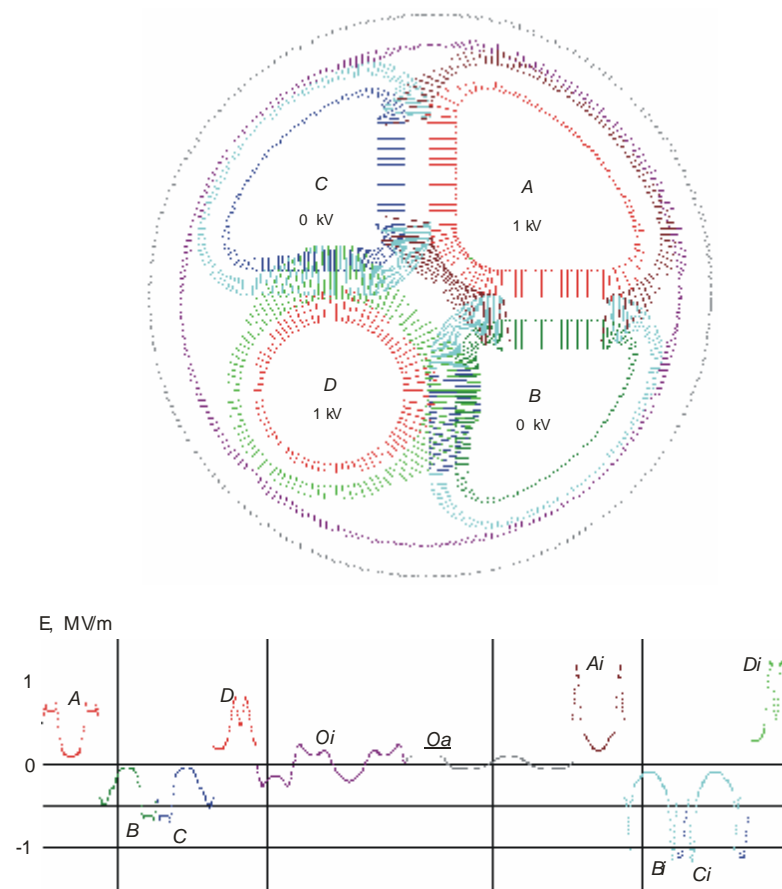


Рис 2 - Квадрупольное распределение потенциала.
Порядок расположения узлов: фазы A, B, C, D; затем внутренняя и внешняя поверхности оболочки; затем поверхности изоляции фаз

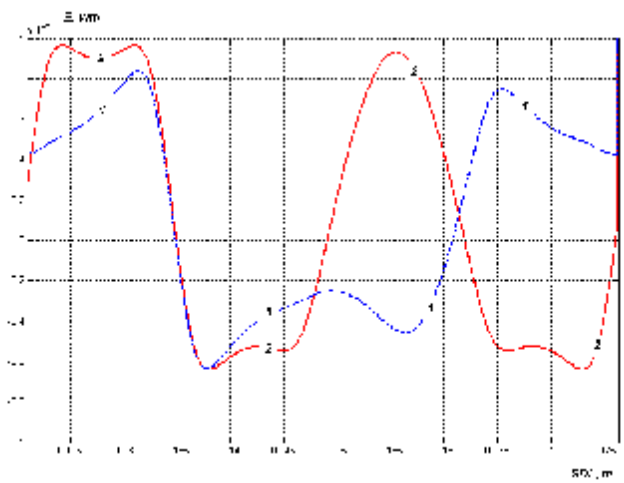
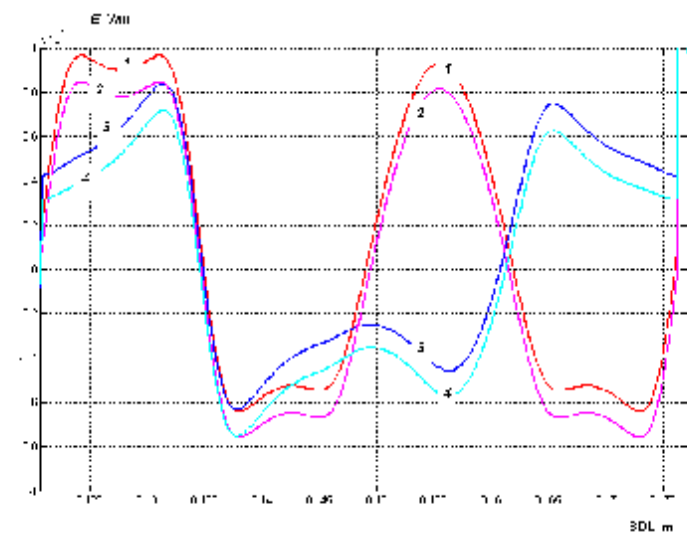
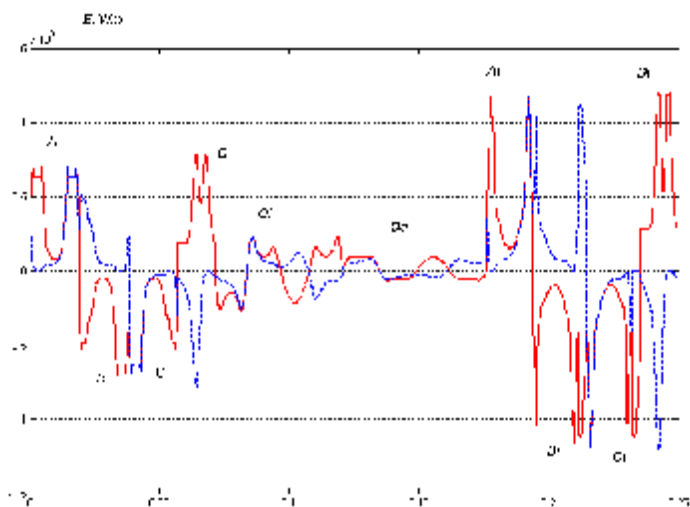


Рис 3 - Распределение напряженности поля на поверхности оболочки кабеля АПВГ 3×25+1×16 при дипольном (1) и квадрупольном (2) распределении потенциала:
 $Q_a = 1.59E-0007$ $Q_b = -1.27E-0007$ $Q_c = -1.27E-0007$ $Q_d = 1.23E-0007$
 $Q_a + Q_d = 28,2 \cdot 10^{-8}$ Кл/м; $Q_b + Q_c = -25,4 \cdot 10^{-8}$ Кл/м.
 $Q_a = 8.36E-0008$ $Q_b = 5.691E-0008$ $Q_c = -8.32E-0008$ $Q_d = -6.37E-0008$
 $Q_a + Q_b = 14 \cdot 10^{-8}$ Кл/м; $Q_c + Q_d = -14,7 \cdot 10^{-8}$ Кл/м

Рис.4 - Распределение нормальной составляющей напряженности поля на поверхности оболочки кабеля АПВГ 3×25+1×16 при квадрупольном (1,2) и дипольном (3,4) распределении потенциала. Несимметричное (1,3) и симметричное (2,4) распределение потенциала: 1000 В и 0 В ; +500 В и -500 В

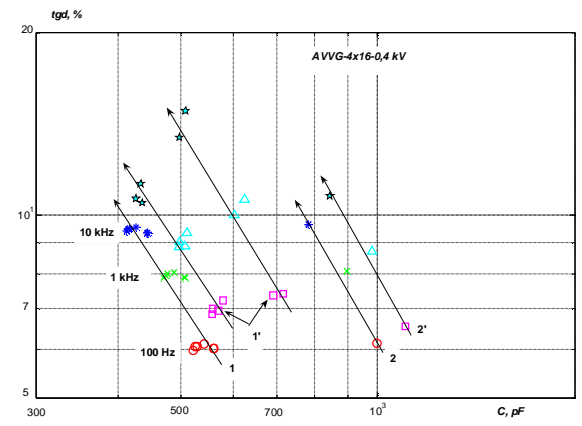


Рис.5 - Совокупные параметры (C и tgδ) промежутков кабеля АВВГ 4×16-0,4 кВ в исходном состоянии (1, 2) и после увлажнения защитной оболочки (1', 2'): 1 – «жила – против трех остальных»; 2 – «две жилы – против двух других» (перекрестная схема обследования)

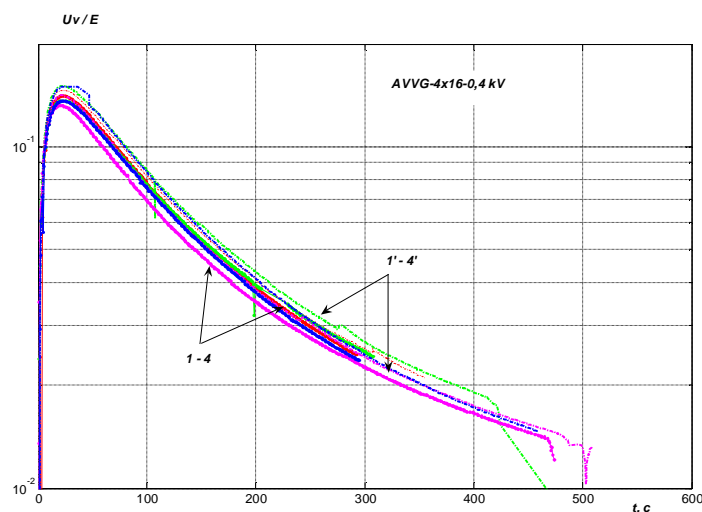


Рис.6 - Кривые восстанавливающегося напряжения образца кабеля АВВГ 4×16-0,4 кВ в исходном состоянии (1 – 4) и после увлажнения поверхности защитной оболочки (1' - 4')

Рис. 3 и 4 отображают распределение напряженности электрического поля по поверхности оболочек кабеля. Как видно из рисунков, наибольшая величина напряженности электрического поля при квадрупольном распределении потенциала наблюдается на обращенной к центру стороне оболочки жил кабеля. При дипольном распределении потенциала максимум напряженности электрического поля смещается ближе к внешней оболочке кабеля.

Рис. 5 – это экспериментальные данные измерения емкости жил и тангенса угла диэлектрических потерь при сухой и увлажненной оболочке для двух различных схем измерений: при дипольном распределении потенциала-1 и при квадрупольном распределении потенциала- 2. Как видно из рисунка, влияние состояния поверхности оболочки на результат измерения параметров кабеля при квадрупольном распределении силовых линий поля значительно ниже, чем при дипольном распределении. Это объясняется тем, что при дипольном распределении потенциала повышение концентрации силовых линий электрического поля смещается ближе к внешней оболочке кабеля. Вследствие чего, большее число силовых линий замыкается по внешней оболочке кабеля, и, в случае ее увлажнения, измеренное значение тангенса угла диэлектрических потерь повышается. Полученные данные хорошо согласуются с результатами, приведенными в [4].

На рис. 6 приведены кривые восстанавливающегося напряжения образца кабеля. Как видно из рисунка, влияние увлажнения поверхности защитной оболочки образца кабеля практически не влияет на кривые восстанавливающегося напряжения. Таким образом, можно сделать вывод, что при снижении частоты зондирующего электрического поля снижается влияние состояния внешней поверхности оболочки кабеля на результаты измерения его электрических характеристик.

Выводы:

1. При дипольном распределении потенциала большее количество силовых линий зондирующего электрического поля выходит за пределы оболочки кабеля, чем при квадрупольном, что приводит к повышению влияния состояния поверхности изоляции кабеля на результаты измерения характеристик кабеля.

2. При квадрупольном распределении потенциала большее количество силовых линий зондирующего электрического поля концентрируется под оболочкой кабеля, чем при дипольном распределении, что приводит к снижению влияния состояния поверхности изоляции кабеля на результаты измерения характеристик кабеля.

3. Повышение частоты изменения зондирующего электрического поля, способствует увеличению влияния загрязнения поверхности оболочки кабеля на измерение его электрических параметров.

Список литературы: 1. *Papazyan R.* Wave propagation on power cables with special regard to metallic screen design / *R. Papazyan, P. Pettersson, D. Pommerenke* // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2007. - Vol.14. - N2. 2. *Набока Б.Г.* Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: Учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей / *Б.Г. Набока.* - Киев: УСДО, 1995-120 с.; 3. *Набока Б.Г.* Определение параметров многоэлементных схем замещения сетевых кабелей / *Б.Г. Набока, А.В. Беспрзванных, А.С. Штангей* // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2003. - №9. - т.4. - С.114; 4. *Набока Б.Г., Гокос А.П.* Влияние состояния поверхности оболочек кабелей АВВГ на параметры изоляционных промежутков / *Б.Г. Набока, А.П. Гокос* // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2006. - №34. - С.145

Поступила в редколлегию 03.09.10

И.В. НИЖЕВСКИЙ, инженер СКБ «Электрощит»
В.И. ГУЛЬ, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"
В.И. НИЖЕВСКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

**РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛОВ НА КАЖДОМ ИЗ ОТДЕЛЬНЫХ
 ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Показано застосування нового способу вимірювання опору розтіканню складного ЗУ. За наслідками вимірювань запропонований розрахунок розподілу потенціалів в системі заземляючих пристроїв, що взаємно впливають один на одного. Показана необхідність таких розрахунків в умовах щільної забудови території.

Application of new method of measuring of resistance spreading of difficult is rotined grounding device. On results measurings the calculation of distributing of potentials is offered in the system of one another having effect of earthings devices. The necessity of such calculations is confirmed in the conditions of dense land development.

Несмотря на значительные успехи в области проектирования, расчета и измерения параметров заземляющих устройств (ЗУ) различной сложности, исследования продолжаютс. Это связано с необходимостью дальнейшего снижения электротравматизма и снижения риска отказов схем релейной защиты и автоматики по причине ЗУ (недопустимое повышение потенциала на ЗУ). Кроме того, важно также знать, какой потенциал может появиться на взаимовлияющих, но не связанных между собой металлических ЗУ.

Методы измерения сопротивления растеканию ЗУ постоянно совершенствуются с целью повышения точности измерения. Этому посвящены патенты, монографии и статьи, например [1-3]. Новый способ измерения представлен патентом [4]. Отличительной особенностью нового способа измерения является то, что он не требует отыскания места нулевого потенциала, что очень важно особенно в случае плотной застройки территории.

Рассмотрим реализацию данного способа для случая, показанного на рис. 1.

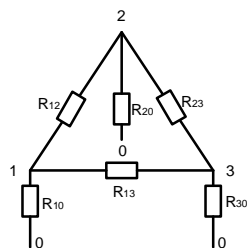


Рис. 1 - Схема замещения для трех взаимовлияющих (R_{12} , R_{23} , R_{13}) элементов заземления (R_{10} , R_{20} , R_{30})

Опыт 1. Источник (E , $Z_{и}$) подключается к точкам 1 и 2 (φ_{12} и I_{12} измеряются для определения $R_{вх(1-2)}$).

Аналогично измеряются $R_{вх(1-3)}$ и $R_{вх(2-3)}$.

Опыт 2. Перемычка соединяет точки 1 и 2, и после подключения источника измеряется $R_{вх}$ ($R_{12} \rightarrow 0$, точки 1 и 2 имеют один потенциал) между точкой 1 (или, что тоже, 2) и точкой 3: $R_{вх(1,2-3)}$.

Аналогично измеряются $R_{вх(1,3-2)}$ и $R_{вх(2,3-1)}$.

По итогам опытов 1 и 2 известны левые части шести уравнений с шестью неизвестными, составляющими схему замещения (см. рис. 1).

Решение системы методом градиентного спуска в оболочке *Excel* по сути метода является удовлетворительно приближенным, что подтверждают поверочные расчеты.

Расшифровка значений параметров (сопротивлений) схемы замещения (рис. 1) позволяет решить следующие задачи.

Задача А. Предполагается использовать элемент R_{10} (или R_{20} , R_{30}) как заземлитель, т.е. в точку 1 (или 2, 3) от некоторого источника $I(E, Z_{и})$ вводится ток I_{10} (или I_{20} , I_{30}), как показано на рис. 2.

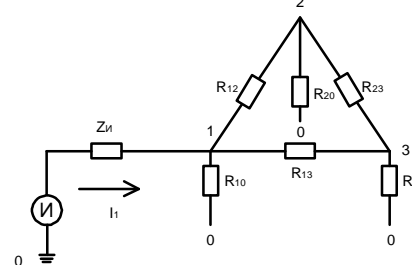


Рис. 2 - Использование элемента 1 как заземлителя для внешнего источника $I(E, Z_{и})$

Элементы R_{20} , R_{23} и R_{30} образуют треугольник с общей точкой 0, который известным способом преобразуется в звезду (рис. 3)

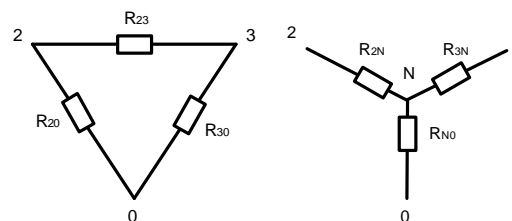


Рис. 3 - Преобразование треугольника в звезду

Очевидно, параллельное соединение последовательных цепочек определяет подключение R_{N0} параллельно R_{10} и имеем искомое сопротивление $R_{экв1}$ заземления для точки 1: $(R_{12}+R_{2N})\parallel(R_{13}+R_{3N})=R_{эквM}$; $(R_{эквM} + R_{N0}) \parallel R_{10} \rightarrow R_{экв1}$. Аналогично находим $R_{экв2}$ или $R_{экв3}$.

Задача Б. Точка 1 (или 2, 3) используется как точка заземлителя и подключение источника $\mathcal{E}(E, Z_{и})$ создает на этом заземлителе потенциал φ_1 . Взаимные сопротивления вместе с собственными сопротивлениями (см. рис. 2) определяют появление потенциалов в точках 2 (φ_2) и 3 (φ_3).

Преобразуем треугольник взаимных сопротивлений в звезду с центром в точке P (рис.4), соответственно имеем R_{1P} , R_{2P} и R_{3P} .

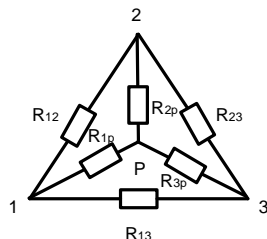


Рис. 4 - Преобразование треугольника в звезду

К вершинам звезды (точки 1, 2 и 3) исходно подключены R_{10} , R_{20} и R_{30} . При потенциале φ_1 в точке 1 схема замещения получает вид (рис. 5):

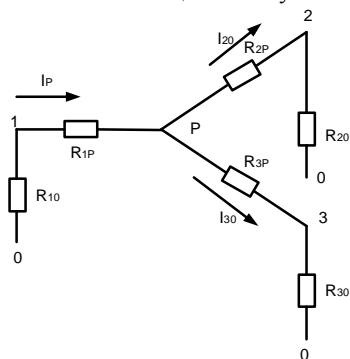


Рис. 5 - Схема замещения

Согласно рис. 5 определяем ток

$$I_P = j_1 / R_{1P} + (R_{2P} + R_{20}) \parallel (R_{3P} + R_{30})$$

и падение напряжения $\Delta U_{1P} = I_P \cdot R_{1P}$. Соответственно, ток в элементе R_{20} составляет $I_{20} = \frac{j_1 - \Delta U_{1P}}{R_{2P} + R_{20}}$ и потенциал $\varphi_2 = I_{20} \cdot R_{20}$.

Аналогично найдем ток $I_{30} = \frac{j_1 - \Delta U_{1P}}{R_{3P} + R_{30}}$ и потенциал $\varphi_3 = I_{30} \cdot R_{30}$.

Вывод. В статье показано применение нового способа измерения сопротивления растеканию сложного ЗУ. По результатам измерений предложен расчет распределения потенциалов в системе взаимодействующих заземляющих устройств. Показана необходимость таких расчетов в условиях плотной застройки территории, когда есть три заземлителя, а реально предполагаемое взаимодействие делает проблематичным корректное отыскание точки нулевого потенциала. Отметим, что даже использование такой точки для одного из заземлителей по традиционной методике не дает представления о взаимодействии заземлителей, тогда как предложенный метод снимает это ограничение.

Список литературы: 1. Бургсдорф В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В.Бургсдорф, А.И.Якобс.- М.: Энергоатомиздат, 1987. - 400 с. 2. Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы. - М.: Изд-во ВИНТИ, 1966. - С. 65-184. 3. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я.Рябкова. - М.: Энергия, 1978. - 224 с. 4. Пат. 19760 Украина, МПК G01R 27/20. Спосіб вимірювання опору розтіканню окремих взаємозв'язаних заземлювачів / В.І. Ніжевський, І.В. Ніжевський, В.І. Гуль, О.І. Ганус – u200608963; заявлено 11.08.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12. – 8 с.



Нижевский Илья Викторович защитил диплом инженера в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" по специальности электрические системы и сети в 2007 г. Научные интересы связаны с проблемами молниезащиты, заземляющих устройств, перенапряжений в электрических сетях и координации изоляции.



Гуль Виктор Иванович профессор кафедры "Передача электрической энергии" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Научные интересы связаны с проблемами молниезащиты, заземляющих устройств, перенапряжений в электрических сетях и координации изоляции.



Нижневский Виктор Ильич доцент кафедры "Передача электрической энергии" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Научные интересы связаны с проблемами молниезащиты, заземляющих устройств, перенапряжений в электрических сетях и координации изоляции.

Поступила в редколлегию 09.03.2010

УДК 621.924

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

Δ СИММЕТРИЗАТОР - КОМПЕНСАТОР ФРИЗЕ

У роботі запропонований алгоритм розрахунку параметрів V-компенсатора з LC-елементами неактивного (реактивного та незбалансованого) струму для незбалансованих три-провідних навантажень. Запропонований алгоритм реалізований як програма у середі MicroCad. Проведено чисельне моделювання.

In work the algorithm of calculation of parameters - compensates with the elements of nonactive (reactive and unbalanced) current for the unbalanced tri-providnih loading is offered. The offered algorithm is realized as a program in an environment MicroCad. The numeral design is conducted.

Даже в синусоидальном режиме подключение несимметричных нагрузок без компенсирующих устройств (КУ) приводит к появлению токов обратной последовательности, дополнительным потерям, пульсации мгновенной мощности и несимметрии напряжения – ухудшению качества энергии [1]. Существует три подхода к разработке КУ: а.) метод компенсации неактивного тока Fryze [2]; б.) метод уравнивания режима (устранения пульсирующей компоненты мгновенной мощности) [3] и в.) симметризация тока источника в точке подключения нагрузки [4].

При несимметричном напряжении метод уравнивания режима не устраняет дополнительные потери от реактивного тока (коэффициент мощности не достигает единицы), а метод Fryze, полностью устраняет дополнительные потери, сохраняет пульсации от несимметрии напряжения [5]. При симметричном напряжении устранение дополнительных потерь приводит к симметризации тока (устранению тока обратной и нулевой последовательности) и к уравниванию режима. Тем самым, при симметричном напряжении метод Fryze обобщает и метод уравнивания и метод симметризации тока.

В синусоидальном режиме при симметричном напряжении одной из первых схем симметризации для трехпроводной системы была схема Steinmetz [6]. Изящество схемы симметризации Steinmetz (ССШ) одноплечевой нагрузки $Y_{AB}^* = G$, когда она дополняется до D-нагрузки реактивными элементами $Y_{CB}^* = jG/\sqrt{3}$, $Y_{CA}^* = -jG/\sqrt{3}$ на протяжении более века вызывает неослабевающий интерес [1-4, 7-8]. Нагрузка ССШ со стороны источника «видна» как чисто активная сбалансированная нагрузка. ССШ устраняет дополнительные потери от реактивного и несбалансированного тока, полностью убирает пульсации мгновенной мощности и обеспечивает единичный коэффициент мощности (КМ) (измененная полная мощность равна активной мощности) и является частным случаем применения метода

Fryze. Метод Fryze позволяет обеспечить единичный КМ при любой нагрузке и любом напряжении. Проблема заключается в его реализации с помощью реактивных элементов [9-10].

Подключая свое оборудование, потребитель естественно рассчитывает на симметричное напряжение и нуждается в простых и понятных формулах для расчета реактивных элементов КУ. К сожалению приведенные в [1] формулы не очень приспособлены для инженерных расчетов. В [4] рассмотрен метод симметризации. Однако в соответствующих формулах ([4], формула (11)) допущена досадная небрежность. Отсутствие вывода этих формул не позволяет их правильно восстановить и ими воспользоваться. Покажем, как в рамках метода Fryze получить простые формулы для расчета реактивных элементов Δ -компенсатора при симметричном напряжении.

Разложение fryze при несимметричном синусоидальном напряжении.

В синусоидальном режиме трехфазные токи и напряжения в трёхпроводном сечении $\langle a, b, c \rangle$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \Re e [U e^{j\omega t}], \quad i(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \Re e [I e^{j\omega t}]. \quad (1)$$

полностью определены трехмерными векторами фазоров (3D-комплексами) напряжения и тока ($T_w=2p$)

$$U = \begin{bmatrix} \mathcal{U}_a \\ \mathcal{U}_b \\ \mathcal{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a e^{j\varphi_a} \\ U_b e^{j\varphi_b} \\ U_c e^{j\varphi_c} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} \mathcal{I}_a \\ \mathcal{I}_b \\ \mathcal{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a e^{j\varphi_a} \\ I_b e^{j\varphi_b} \\ I_c e^{j\varphi_c} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для вектора полного тока справедливо ортогональное разложение Fryze [11]

$$I = I_{aF} + \underbrace{(I - I_{aF})}_{I_F}, \quad I_F = I - I_{aF}. \quad (3)$$

3D-комплексы активного [9-11] и неактивного токов Fryze [12]

$$I_{aF} = \frac{P}{|U|^2} U, \quad I_F = \frac{-jQ}{|U|^2} U + \frac{D \times U^*}{|U|^2} \quad (4)$$

определены через 3D-комплексы токов и напряжений. Здесь P и Q - активная и реактивная мощность (реальная и мнимая части комплексной мощности)

$$\mathcal{S} = U \cdot I^* = \mathcal{U}_a I_a^* + \mathcal{U}_b I_b^* + \mathcal{U}_c I_c^*, \quad \mathcal{S} = P + jQ; \quad (5)$$

$D = U \times I$ – векторное произведение 3D-комплексов напряжения и токов (вектор мощности небаланса нагрузки [13]); $U^* = (U_a^*, U_b^*, U_c^*)^*$ и

$I^* = (I_a^*, I_b^*, I_c^*)^*$ - комплексно сопряженный (КС) вектор напряжения и тока.

• – знак операции транспонирования. Действующие величины тока и напряжения равны нормам 3D-комплексов

$$I = |I| = \sqrt{|\mathcal{I}_a|^2 + |\mathcal{I}_b|^2 + |\mathcal{I}_c|^2}, \quad U = |U| = \sqrt{|\mathcal{U}_a|^2 + |\mathcal{U}_b|^2 + |\mathcal{U}_c|^2} \quad (6)$$

При этом активный ток Fryze поставляет ту же активную мощность, что и полный ток

$$P = \Re e (U \cdot I^*) = \Re e (U \cdot I_{aF}^*).$$

Для действующих величин справедливы равенства

$$I^2 = I_{aF}^2 + I_F^2, \quad U^2 I_F^2 = Q^2 + D_u^2. \quad (7)$$

Тем самым устранение неактивного тока Fryze из цепей источника равносильно компенсации реактивной и несбалансированной мощности. Из (7) следует уравнение мощности [13]

$$S_B^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (8)$$

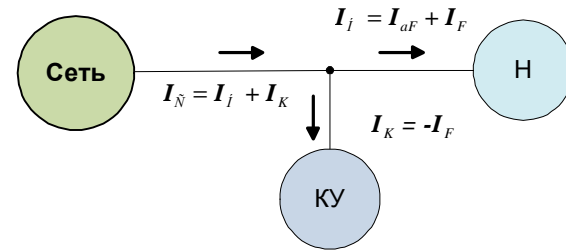


Рис.1 - Подключение несбалансированной нагрузки (Н) с компенсирующим устройством (КУ)

где $S_B = I \cdot U$ - кажущая мощность (по Buchholz [14]);

$D_u = |D| = |U \times I|$ мощность небаланса (норма вектора мощности).

Коэффициент мощности

$$I^2 = I_p^2 = \frac{P^2}{S_B^2} = \frac{I_{aF}^2}{I_{aF}^2 + I_F^2} \quad (9)$$

равен единице только, если активный ток равен полному току нагрузки. Это достигается, если для тока компенсатора выполнено $I_K = -I_F$ (см. Рис.1.).

Энергетические процессы в трехфазной трехпроводной системе.

Рассмотрим трехфазную трехпроводную систему с нагрузкой типа треугольник (D -нагрузкой)

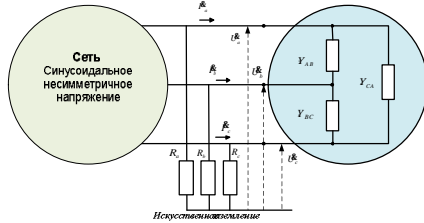


Рис. 2 - Трехфазная система ($R_a = R_b = R_c$) с межфазными комплексными

проводимостями Y_{AB}, Y_{BC}, Y_{CA} .

3D-комплексы линейных токов и фазных (узловых) напряжений (2) связаны векторно-матричным равенством

$$I = YU \tag{10}$$

с матрицей узловых проводимостей D - нагрузки

$$Y = \begin{matrix} \text{й} & & & & \text{п} \\ \text{к} & Y_{AB} + Y_{CA} & -Y_{AB} & -Y_{CA} & \text{б} \\ \text{к} & -Y_{AB} & Y_{AB} + Y_{CB} & -Y_{CB} & \text{б} \\ \text{к} & -Y_{CA} & -Y_{CB} & Y_{CA} + Y_{CB} & \text{б} \\ \text{л} & & & & \text{б} \end{matrix} \tag{11}$$

Матрица узловых проводимостей (11)

$$Y = M Y_V M^* \tag{12}$$

получается из диагональной матрицы межфазных комплексных проводимостей

$$Y_V = \text{diag}[Y_{AB}, Y_{BC}, Y_{CA}] \tag{13}$$

с помощью матрицы инцидентности D нагрузки

$$M = \begin{matrix} \text{й} & 1 & 0 & -1 \\ \text{к} & & & & \text{б} \\ \text{к} & -1 & 1 & 0 & \text{б} \\ \text{к} & 0 & -1 & 1 & \text{б} \\ \text{л} & & & & \text{б} \end{matrix}$$

и матрицы M^* , транспонированной к M .

Для трехпроводной системы любой 3D-комплекс $F = (F_a, F_b, F_c)$, характеризующий энергетические процессы в ней, ортогонален орту $e_0 = (1,1,1)/\sqrt{3}$ нулевой последовательности, так как он удовлетворяет условию

$$F_0 = (F, e_0) = F \cdot e_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (F_a + F_b + F_c) = 0. \tag{14}$$

Соответствующий энергетический процесс $f(t) = \sqrt{2} \Re [F e^{j\omega t}]$ не содержит нулевую компоненту (двумерен). Для вектора линейных токов I это условие обеспечивается первым законом Кирхгофа. Для 3D- комплекса узловых напряжений условие (14) обеспечивается либо измерением относительно искусственной точки заземления (artificial point [11], см. Рис.2), либо с помощью процедуры $U^0 = U - U_0^0 e_0$, где $U_0^0 = (U_a + U_b + U_c)/3$ [5].

Любой 3D-комплекс удовлетворяющий условию (15), однозначно раскладывается по ортам [15]

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ a^* \\ a \end{pmatrix}, \quad e_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^* \end{pmatrix} \tag{15}$$

прямой и обратной последовательностей ($a = e^{j2\pi/3}, a^2 = a^*, aa^* = 1$). Таким образом

$$(F, e_0) = 0 \Rightarrow F = F_1 e_1 + F_2 e_2 \tag{16}$$

Так как орты (15) ортогональны и нормированы

$$(e_k, e_l) = e_k^* (e_l) = \begin{cases} 1, & k=l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \quad (k, l = 1, 2),$$

то коэффициенты разложения (16) вычисляются согласно [15]

$$F_k = (F, e_k) = F \cdot e_k^* \quad (k=1, 2). \tag{17}$$

Вектор тока (10) в трехпроводном сечении $\langle a, b, c \rangle$ в точке подключения нагрузки

$$I = YU = M Y_V M^* U \quad (18)$$

рассматриваемой системы однозначно раскладывается по ортам прямой и обратной последовательностей согласно (16)

$$I = I_1 e_1 + I_2 e_2. \quad (19)$$

Величины прямой и обратной последовательности тока равны скалярному произведению вектора тока и соответствующего орта согласно (17)

$$I_1 = (I, e_1) = I^* e_1^* = I^* e_2, \quad I_2 = (I, e_2) = I^* e_2^* = I^* e_1. \quad (20)$$

Через комплексные действующие величины токов в фазах (2) выражаются как

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_a + I_b a + I_c a^*), \quad I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_a + I_b a^* + I_c a). \quad (21)$$

Из (18) и (20) следует, что величины тока прямой и обратной последовательности равны

$$I_1 = I^* e_2 = (M Y_V M^* U)^* e_2 = U^* M Y_V M^* e_2, \quad (22)$$

$$I_2 = I^* e_1 = (M Y_V M^* U)^* e_1 = U^* M Y_V M^* e_1. \quad (23)$$

Симметризация тока и компенсация фазы.

Если напряжение симметрично прямой последовательности

$$U = U_1 = U_1^* e_1, \quad (24)$$

то из (22)-(23) следует

$$I_1 = U_1^* e_1^* M Y_V M^* e_2, \quad I_2 = U_1^* e_1^* M Y_V M^* e_1. \quad (25)$$

Прямыми вычислениями и проверяется, что

$$M^* e_1 = \sqrt{3} e^{-jp/6} e_1, \quad M^* e_2 = \sqrt{3} e^{-jp/6} e_2. \quad (26)$$

Это позволят получить соотношения

$$I_1 = U_1^* (e_1^* M) Y_V (M^* e_2) = 3 \frac{e^{-jp/6}}{\sqrt{3}} Y_{12} U_1^* e_1, \quad (27)$$

$$I_2 = U_1^* (e_1^* M) Y_V (M^* e_1) = 3 \frac{e^{-jp/6}}{\sqrt{3}} Y_{21} U_1^* e_1 \quad (28)$$

и вычислить проводимости прямой и обратной последовательности.

$$Y_1^* = e_1^* Y_V e_2 = Y_{AB}^* + Y_{BC}^* + Y_{CA}^*, \quad (29)$$

$$Y_2^* = e^{jp/3} 3(e_1^* Y_V e_1) = e^{jp/3} Y_{AB}^* - Y_{BC}^* + e^{-jp/3} Y_{CA}^*. \quad (30)$$

Тем самым при симметричном напряжении имеем

$$I_1^* = Y_1^* U_1^* \quad I_2^* = Y_2^* U_1^*. \quad (31)$$

Представим проводимости (29) и (30) как

$$Y_1^* = G_1 + jB_1, \quad Y_2^* = G_2 + jB_2. \quad (33)$$

Где величины

$$G_1 = G_{AB} + G_{BC} + G_{CA}. \quad (34)$$

$$G_2 = e^{jp/3} G_{AB} - G_{BC} + e^{-jp/3} G_{CA} \quad (35)$$

обусловленные активными элементами Δ -нагрузки (13). Величины

$$B_1 = B_{AB} + B_{BC} + B_{CA}, \quad (36)$$

$$B_2 = e^{jp/3} B_{AB} - B_{BC} + e^{-jp/3} B_{CA}. \quad (37)$$

обусловленные реактивными элементами Δ -нагрузки (13).

Если Δ -нагрузка чисто реактивная, то $G_1 = G_2 = 0$ и

$$I_1^* = jB_1 U_1^*, \quad I_2^* = jB_2 U_1^*. \quad (38)$$

Если напряжение симметрично, то комплексная и активная мощность равна

$$S = U^* I^* = |U_1^*|^2 (G_1 + jB_1), \quad P = \Re e(S) = |U_1^*|^2 G_1. \quad (39)$$

Тем самым активный ток Fryze равен

$$I_{af} = \frac{P}{|U_1^*|^2} U = G_1 U_1 = G_1 U_1^* e_1 \quad (40)$$

и разложение Fryze для полного тока имеет вид

$$I = I_a e_1 + \frac{I_a}{\sqrt{3}} \frac{e_2 + e_3}{2}, \quad (41)$$

где $I_a = G_1 U_1^*$, $I_r = jB_1 U_1^*$ - комплексные величины активного и реактивного

тока.

Таким образом, при симметричном напряжении метод Fryze дает метод симметризации токов. Неактивный ток Fryze

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_r e_1 + \mathbf{I}_2 e_2 \quad (42)$$

должен быть полностью скомпенсирован током ! – компенсатора

$$\mathbf{I}_K = \mathbf{I}_K^{(1)} e_1 + \mathbf{I}_K^{(2)} e_2. \quad (43)$$

Так как такой ! – компенсатор должен быть реализован только на реактивных элементах, то из (38) следует

$$\mathbf{I}_K^{(1)} = jB_K^{(1)} \mathcal{U}_1, \quad \mathbf{I}_K^{(2)} = jB_K^{(2)} \mathcal{U}_1. \quad (44)$$

Для полной компенсации неактивного тока необходимо чтобы сумма тока компенсатора и неактивного тока Fryze была равна нулю

$$\mathbf{I}_K = -\mathbf{I}_F. \quad (45)$$

Условие согласно (45) дает

$$jB_K^{(1)} = -jB_1, \quad jB_K^{(2)} = -(\mathcal{G}_2 + j\mathcal{B}_2).$$

и приводит к системе уравнений для определения симметричных координат реактивных проводимостей D – компенсатора по симметричным координатам проводимостей нагрузки

$$\begin{cases} \mathcal{B}_K^{(1)} = -\mathcal{B}_1 \\ \mathcal{B}_K^{(2)} = -j\mathcal{G}_2 + \mathcal{B}_2 \end{cases}, \quad (46)$$

Чтобы найти межфазные реактивные проводимости КУ, введем вектор межфазных проводимостей нагрузки и D – компенсатора

$$\mathbf{y} = \mathbf{g} + j\mathbf{b} = \begin{pmatrix} G_{AB} \\ G_{BC} \\ G_{CA} \end{pmatrix} + j \begin{pmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}_K = \begin{pmatrix} B_{AB}^k \\ B_{BC}^k \\ B_{CA}^k \end{pmatrix} \quad (47)$$

Тогда из (33)–(36) для симметричных проводимостей нагрузки и компенсатора имеем

$$G_1 = \sqrt{3} \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_0, \quad \mathcal{G}_2 = e^{jp/3} \sqrt{3} \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_2; \quad (48.a)$$

$$B_1 = \sqrt{3} \mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_0, \quad \mathcal{B}_2 = e^{jp/3} \sqrt{3} \mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_2; \quad (48.b)$$

$$B_K^{(1)} = \sqrt{3} \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_0, \quad B_K^{(2)} = e^{jp/3} \sqrt{3} \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_2. \quad (48.b)$$

Подстановка соотношений (48) в систему (46) дает систему уравнения для векторов (47) межфазных проводимостей

$$\begin{cases} \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_0 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_0 \\ \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_2 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_2 + j\mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_2 \end{cases} \quad (49)$$

Чтобы однозначно определить вектор $\mathbf{b}_K = (B_{AB}^k \ B_{BC}^k \ B_{CA}^k)$ межфазных проводимостей D – компенсатора необходимо еще одно уравнение для симметричной составляющей $\mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_1$. Так как $(\mathbf{e}_2)^* = \mathbf{e}_1 = (1 \ \mathbf{a} \ \mathbf{a}^*)^* / \sqrt{3}$, то применяя операцию комплексного сопряжения ко второму уравнению (49), получим

$$\mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_1 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_1 - j\mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_1. \quad (50)$$

Таким образом, имеем систему уравнений для нахождения вектора межфазных проводимостей D – компенсатора

$$\begin{cases} \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_0 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_0 \\ \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_2 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_2 + j\mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{b}_K \cdot \mathbf{e}_1 = -\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}_1 - j\mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_1 \end{cases} \quad (51)$$

Систему (51) можно записать в следующем виде

$$\mathbf{b}_K \cdot [\mathbf{e}_0 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_1] = -\mathbf{b} \cdot [\mathbf{e}_0 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_1] + j\mathbf{g} \cdot [0 \ \mathbf{e}_2 \ -\mathbf{e}_1]. \quad (52)$$

Здесь

$$[\mathbf{e}_0 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_1] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^* \\ 1 & \mathbf{a}^* & \mathbf{a} \end{bmatrix} = \mathbf{F} \quad (53)$$

– модифицированная матрица Fortescue [5], которая задает переход от фазовых координат к симметричным. Такая матрица унитарна (множитель существует $1/\sqrt{3}$). Так она симметрична, то обратная матрица равна сопряженной матрице

$$F^{-1} = F^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^* & a \\ 1 & a & a^* \end{bmatrix} \quad (54)$$

Матрица $F^{-1} = [e_0 \ e_1 \ e_2]$ определяет обратный переход от симметричных к фазовым координатам. Полученное уравнение (52) справа умножим на обратную матрицу F^{-1} . Получим

$$\mathbf{b}_k^* = -\mathbf{b}^* + j\mathbf{g}^* [0 \ e_2 \ -e_1] F^{-1}. \quad (55)$$

Так как

$$[0 \ e_2 \ -e_1] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 0 & a & -a^* \\ 0 & a^* & -a \end{bmatrix}, \quad [0 \ e_2 \ -e_1] F^{-1} = \frac{-j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (56)$$

то имеем

$$\mathbf{b}_k^* = -\mathbf{b}^* + \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{g}^* \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (57)$$

Транспонируем (57) окончательно получим

$$\mathbf{b}_k = -\mathbf{b} + \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{g}. \quad (58)$$

В явном виде для реактивных проводимостей Δ -КУ имеем

$$\begin{pmatrix} B_{AB}^k \\ B_{BC}^k \\ B_{CA}^k \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} G_{CA} - G_{BC} \\ G_{AB} - G_{CA} \\ G_{BC} - G_{AB} \end{pmatrix}. \quad (59)$$

Таким образом, даже если нагрузка имеет индуктивный характер, для компенсации несимметрии активных элементов потребуются реакторы.

В частности для схемы Steinmetz получим

$$\begin{pmatrix} B_{AB}^k \\ B_{BC}^k \\ B_{CA}^k \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 \\ G_{AB} \\ G_{BC} - G_{CA} \end{pmatrix}$$

*είι ι ἀνάοεϋ
οάοεο εάι ύ ό
ϋεάι άι ό ι ά*

В компактном виде формулу (59) можно представить в векторном виде

$$\mathbf{b}_k = -\mathbf{b} + \mathbf{e}_0 \times \mathbf{g} \quad (60)$$

$\mathbf{e}_0 \times \mathbf{g}$ -векторное произведение векторов \mathbf{e}_0 и \mathbf{g} . Полученные формула (59) или (60) пригодна для расчета реактивных элементов Δ -компенсатора, обеспечивающего единичный коэффициент мощности при присоединение к сети с симметричным напряжением произвольной несимметричной Δ -нагрузки.

Числовое моделирование.

В рассматриваемых ниже примерах все величины приведены в относительных единицах $|U|=1$. Моделирование проводилось в среде MatCad. Напряжение в сечении $\langle a, b, \tilde{n} \rangle$ симметрично. D- нагрузка задана межфазными проводимостями $Y_{AB}^k, Y_{BC}^k, Y_{CA}^k$ (Таблица 1).

Таблица 1 - Параметры D- нагрузки

№ Примера	Y_{AB}^k	Y_{BC}^k	Y_{CA}^k
а	1	0	0
б	$1 - j4$	0	0
в	$0.2 - j0.1$	$0.7 - j0.3$	$0.1 - j0.2$

Во всех трех примерах нагрузка выбрана так, что обеспечивается передача энергии с одинаковой активной мощностью $P = 1.0$ о.е. Межфазные реактивные проводимости $B_{AB}^k, B_{BC}^k, B_{CA}^k$ D- компенсатора, рассчитанные согласно (59), приведены в Табл.2. Параметры режимов сведены в Табл. 3.

Таблица 2 - Параметры D- компенсатора

№ Примера	jB_{AB}^k	jB_{BC}^k	jB_{CA}^k
а	0	$j0.577$	$-j0.577$
б	$j4$	$j0.577$	$-j0.577$
в	$-j0.246$	$j0.358$	$j0.489$

Таблица 3. -Результаты моделирования

№	До компенсации			После компенсации	
	l_p	$ I ^2$	M_a	$ I_a ^2$	M_{af}
а	0.731	2	1	1	0
б	0.177	34	4.123	1	0
в	0.741	1.821	0.678	1	0

Здесь M_a и M_{af} -комплексная амплитуда мощности пульсаций (переменной составляющей двойной частоты мгновенной мощности) полного тока до и после компенсации [5]. На Рис.3 приведены результаты моделирования.

а) Одноплечевая активная нагрузка до симметризации имеет КМ $l_p = 0.707$..

б) Одноплечевая нагрузка (индуктор), включена между фазами А и В .

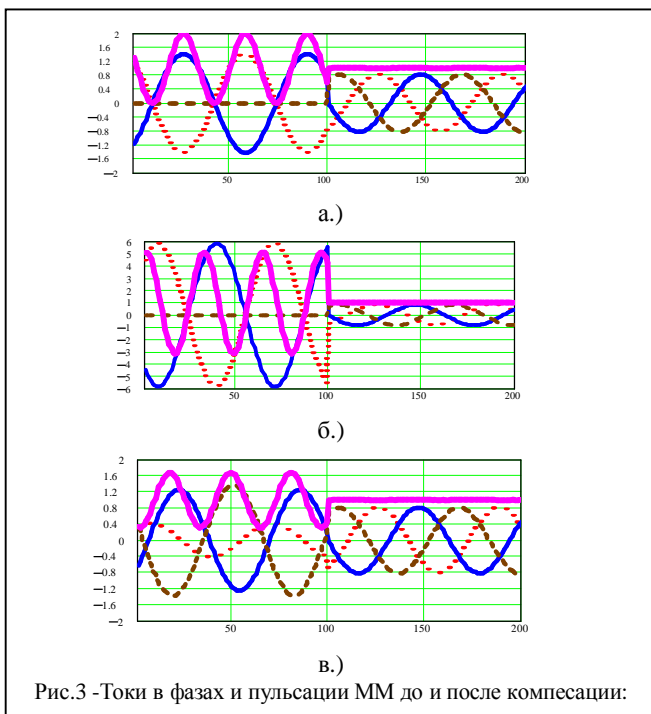


Рис.3 -Токи в фазах и пульсации ММ до и после компенсаии:

Коэффициент мощности индуктора $\cos j_{AB} = G_{AB} / \sqrt{G_{AB}^2 + B_{AB}^2} = 0.243$. (Коэффициент мощности подключаемой схемы как трехфазной нагрузки, вычисленный согласно (14) $l_p = 0.177$.) в) Три однофазные активно-индуктивные нагрузки (до компенсации $\cos j_{BC} = 0.919$, $\cos j_{AC} = 0.447$) включены в три плеча и образуют неуровненную трехфазную нагрузку.

Закючение. Предлагаемый Δ -компенсатор I_0 позволяет: M_{af} полностью устранить пульсации ММ $M_a = 0$ и дополнительные потери от неактивного тока $I_F = 0$; 2) сделать коэффициент мощности равным единице $l_p = 1$; 3) полные потери на $0,1 \text{ Ом}$ уменьшить в $|I|^2 / |I_{af}|^2$ раз. Установка таких КУ позволит потребителю не платить за неактивную (реактивную + небаланса) мощность и избежать дополнительных потерь в сети поставщика. Более того, улучшив качество своего потребления, потребитель вполне обосновано может выдвигать требования к улучшению качества поставки.

Список литературы: 1. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов.- Киев: Наукова думка, 1985 2. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current / S. Fryze // Przeglad Elektrotechniczny. - 1931. - No. 7-8. 3. Мулях А.Н, Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А.Н.Мулях, А.К.Шидловский, А.Г.Кузнецов.- Киев: Наукова думка, 1973 4. Hanzelka Z. Mitigation of voltage unbalance. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.leonardo-energy.org/chapter-5-mitigation-voltage-unbalance> 5. Сиротин Ю. А. Качество энергоснабжения и энергопотребления в разбалансированной трехфазной системе /Ю.А. Сиротин // Электрика. - 2009. - №6. - С. 22-27; 2009. - №7. С. 15-21. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.nait.ru/journals> 6. Steinmetz C. P. Lectures on Electrical Engineering. New York: Dover, 1897. 7. Sainz L., Pedra J., Caro M. Steinmetz circuit influence on the electric system harmonic response / L.Sainz, J.Pedra, M. Caro // IEEE Trans. Pow. Del. - 2005. - Vol. 20. - No. 2. - P.1143- 1150 8. Todeschini G. A Poynting Vector Approach to the Study of the Steinmetz Compensator / G. Todeschini, A. E. Emanuel, A. Ferrero, A. P. Morando A Poynting // IEEE Trans. Pow. Deliv. - 2007. - Vol. 22. - No. 3. - P. 1830- 1830 9. Czamecki L. S. Reactive and unbalanced currents compensation in three-phase asymmetrical circuits under nonsinusoidal conditions / L. S. Czamecki // IEEE Trans. Instrum. Meas. - 1989. - Vol. 38. - No 3. - P. 754-759/ 10. Czamecki L. S. Adaptive Balancing Compensator / L. S. Czamecki, M. H. Shih, G. Chen // IEEE Trans. Pow. Deliv. Vol. - 1995/10/ - No. 3. - P. 1663-1669. 11. Czamecki L. S. Powers of asymmetrically supplied loads in terms of the CPC power theory / L. S. Czamecki // Electrical Power Quality and Utilization Journal. - 2007. -Vol. XIII. - No. 1. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.lsczar.info/papers.htm> 12. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие трехфазного тока интерфейса "поставщик-потребитель" / Сиротин Ю. А. // Электрика. - 2008. - № 10. - С. 16-22. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.kudriabi.ru> 13. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю.А. Сиротин // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. VI МНТК. EPQ-2008: Сб. трудов. Мариуполь: Изд. ПГТУ, 2008. 14. Buchholz F. Die Drehstrom-Scheinleistung bei ungleichmepiger Belastung drei Zweige / F. Buchholz // Licht und Kraft - 1922. 34. No. 2. - 4. P.29-11. 15. Сиротин Ю. А.О. Мощность разбаланса и пульсации мгновенной мощности при симметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Электрика. - 2009. - № 11. - С. 22-27. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.nait.ru/journals>

Л.А. ШЕБЕНЮК, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХП»
С.Ю. АНТОНЕЦЬ, ЗАТ «Завод Південкабель»

СТАТИСТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОВІДНИКА НА НАПРУГУ ПРОБОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬПРОВОДУ

Виконан анализ результатів контролю параметрів мідного провідника на напруження пробою емальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.

The analysis of datas of monitoring of the technological standard parameters of in enameled wire insulated articles.

Постановка проблеми. Впровадження нових електротехнічних матеріалів є одним з найефективніших методів підвищення надійності електротехнічного обладнання, в тім числі і електричних машин, надійність яких визначається, в першу чергу, надійністю виткової ізоляції. Саме для підвищення надійності цієї ізоляції на заводі "Південкабель" впроваджено виробництво емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі поліімідних співполімерів з температурним індексом 200 °С. В процесі впровадження нової продукції виникла необхідність вдосконалення системи контролю її якості з врахуванням як особливостей технологічного процесу так і специфіки властивостей двошарової поліімідної ізоляції. Експериментальне визначення пробивної напруги є одним з традиційних методів випробувань емальдроту, при яких значення параметру, що визначається, співставляють з встановленою нормативною межею (найменше з п'яти значень для даної котушки не менше заданого мінімального: $\inf(U_{np}) \geq U_{min}$). Випробування для визначення U_{np} є руйнівними, а отже вибірковими, їх результати не дають інформації про статистичну достовірність виконання вказаної нерівності. Для забезпечення сучасних вимог до електричної міцності емальдроту високої нагрівостійкості, до яких відноситься, в першу чергу, емальдріт з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів, необхідне дослідження статистичних характеристик розсіяння значень U_{np} (далі U) впродовж неперервного технологічного циклу, який на сучасних швидкісних емальагрегатах включає виготовлення багатьох десятків котушок.

Аналіз літератури. Сучасну статистичну шкалу рівня однорідності для різних виробників масової продукції пропонує так звана концепція "Шість сігм" ("6s") [1,2], в якій критерієм досягнутого рівня якості продукції є її однорідність. В концепції "6s" використовують класичний математичний апарат оцінювання середньоквадратичного відхилення s параметра, що контролюється і нормальний розподіл цього параметра[3].

Випробування на визначення напруги пробою (breakdown voltage) емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліамідних співполімерів в європейській лабораторії [4] свідчить про те, що однією з основних причин нестабільності U є стан мідного провідника перед емальюванням. Зокрема овальність провідника та дефекти його поверхні. В [5,6] показано експериментально, що впродовж неперервного технологічного циклу середньоквадратичне відхилення $s[U]$ може змінюватися в рази, зумовлюючи вихід за допустиму межу за відомим правилом «трьох сігм».

Ціль роботи. Експериментальне дослідження впродовж неперервного технологічного циклу впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги пробою ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм.

Одержані результати. Вплив мідного провідника на U ілюструє рис.1. Значення напруги пробою U для котушок емальдроту впродовж неперервного технологічного циклу характеризуються суттєвим розсіянням. У відносних одиницях це ілюструє рисунок 2, для якого вибраний технологічний цикл, що в ньому близько 5% котушок мали значення $\inf(U) < U_{min}$, де U_{min} - прийнята технологічна границя. Дані рис.1 свідчать про те, що в той час як діаметральна товщина емалі t має очевидний періодичний характер, на напругу пробою суттєво впливають інші фактори.

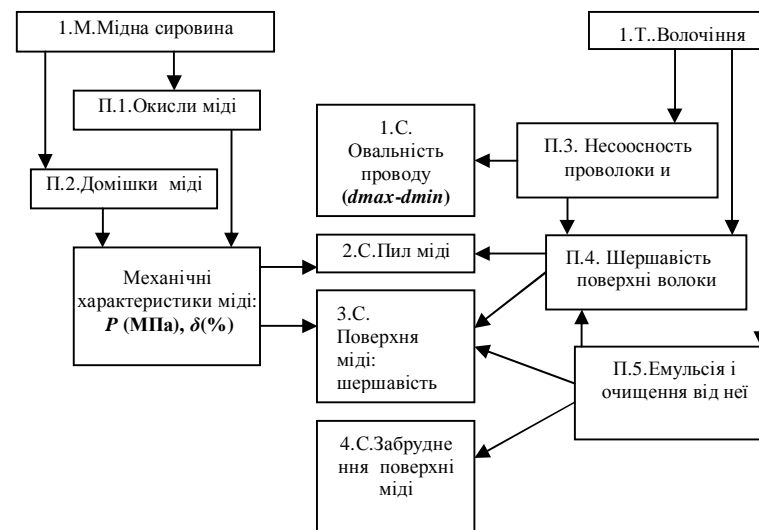


Рис. 1- Фактори впливу мідного провідника на U емальдроту

Експериментальні дослідження електричної міцності двохшарової поліімідної ізоляції емальдроту в діапазоні номінальних діаметрів від 0.1 мм до 0.63 мм свідчать, що середня напруга пробою емальізоляції U характеризується суттєвою кореляцією з відносним видовженням дроту при розриві δ . Це ілюструє рисунок 3,

Для діаметрів у нижній частині дослідженого діапазону значне зменшення пластичності (на 40 % і більше) завжди супроводжувалось суттєвим зменшенням товщини ізоляції (більш ніж 13 %) і помітною дестабілізацією процесу емалювання (див. табл.1).

Аналіз кореляційних зв'язків напруги пробою емальізоляції U , відносного видовження дроту при розриві δ , і діаметральної товщини ізоляції t характеризує таблиця 2. Ці дані свідчать, що **в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам**, основними чинниками впливу на величину напруги пробою емальізоляції є:

- відносно видовженням при розриві δ , (позитивна кореляція: $Kor[M[\delta], M[U]] = 0,806$;

- середньоквадратичне відхилення діаметра мідного провідника dp (від'ємна кореляція: $Kor[\sigma[dp], M[U]] = -0,762$.

Основні традиційні вимірювані показники, за якими виконано аналіз стабільності технологічного процесу: діаметр провідника dp і емальдроту di (рис.1), напруга пробою U (мінімальна і середня), механічна міцність емалі N (мінімальна і середня), відносно видовження дроту при розриві δ .

Висновки цього аналізу наступні: за умови відповідності всіх характеристик дроту технічним вимогам, на механічну міцність емалі N (мінімальну і середню) найбільший.

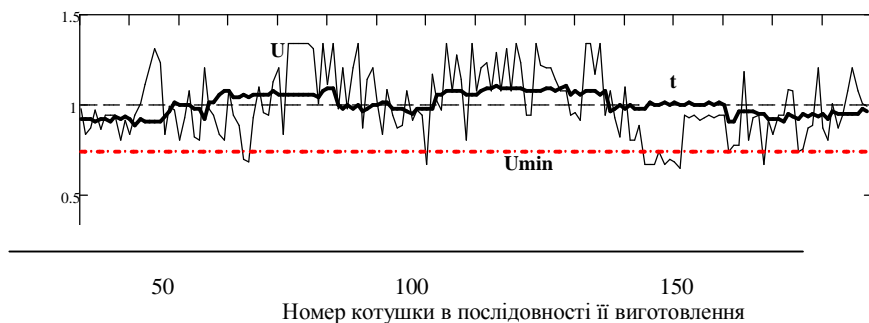


Рис. 2 – Результати вимірювання напруги пробою U і діаметральної товщини ізоляції t для емальдроту діаметром 0,560 мм

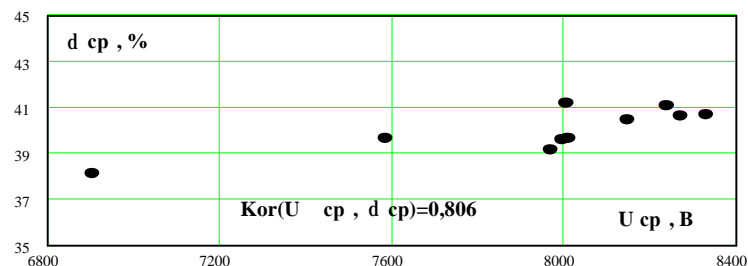


Рис. 3- Кореляція напруги пробою U і відносного видовження при розриві δ для емальдроту діаметром 0,560 мм

Таблиця 1 - Товщини емальізоляції котушок із зменшеною пластичністю міді для діаметру 0,10 мм

№ котушки	Відносно видовження при розриві δ , %	Діаметральна товщина ізоляції, t , мкм	№ № котушок із зменшеною на ≈ 13 % товщиною ізоляції, t , мкм
Середнє для всіх	27,017	23,0	-
0	16 (- 40 %)	22	№№: 1 – 10: $t = 20$ мкм
79	16 (- 40 %)	21	№№: 80 – 90: $t = 20$ мкм
222	15 (- 44 %)	18	№№: 223 – 235: $t = 20$ мкм

Вплив зумовлює нестабільність діаметра мідного провідника dp ; вплив на механічну міцність діаметра мідного провідника dp і товщини t емальізоляції відповідає принципу суперпозиції, тобто відповідний контроль може бути організований за їх сумою: $di = dp + t$; збільшення dp , і t зумовлює нерівномірність шару емалі і, як наслідок, збільшення середньоквадратичного відхилення механічної міцності емалі $\sigma[Nm]$; чим більше відносно видовження дроту при розриві δ , тим вища механічна міцність, але одночасно більше її розсіяння.

Дослідження поверхні мідного провідника емальдроту свідчить про наявність нерівностей двох типів: повздовжніх бороздок (поперечний розмір від 10 мкм до 40 мкм) і мікрораковин. Кількість мікрораковин на одиницю поверхні провідника, їх розмір і глибина збільшуються із зменшенням пластичності міді. При цьому змінюється і форма мікрораковин.

Таблиця 2 - Коефіцієнти кореляції $\text{Corr}[X, Y]$ між середніми $M[X]$, $M[Y]$ і середньоквадратичними $\sigma[X]$, $\sigma[Y]$ значеннями характеристик емальдроту діаметром 0,630 мм

Характеристика X		Характеристика Y	
		Коефіцієнти кореляції $\text{Corr}[X, Y]$	
		$M[U]$, U- напруга пробою, В	$\sigma[U]$, U- напруга пробою, В
Діаметр проволочи, dp , мм	$M[dp]$	-0,438	-0,533
	$\sigma[dp]$	-0,762	-0,423
Діаметр ізолюваного проводу, di , мм	$M[di]$	-0,128	-0,314
	$\sigma[di]$	-0,002	-0,114
Товщина ізоляції, мкм $t = (di - dp) \cdot 10^3$	$M[t]$	0,226	0,107
	$\sigma[t]$	-0,233	-0,211
Відносне видовження при розриві δ %	$M[\delta]$	0,806	0,563
	$\sigma[\delta]$	0,318	0,151

Поява мікрораковин на поверхні металу при волочінні є характерним явищем. Порівняння їх кількості, розмірів і форми для мідного, алюмінієвого і сталевго дроту свідчить про те, що саме пластичність металу є визначальним фактором утворення таких дефектів поверхні провідника.

Ці дефекти утворюються за рахунок деформацій зсуву у поверхневому шарі металу, який є найбільш нагартованим, а отже найменш пластичним. Результати контрольного випробування на відносне видовження дроту при розриві лише частково відображають зростання твердості металу на поверхні дроту. Саме тому зв'язок напруги пробою емальізоляції U з відносним видовженням дроту при розриві \square наведений на рисунку 2, опосередковано свідчить про значний вплив пластичності металу на напругу пробою.

В цілому одержані дані свідчать, що пріоритетною задачею технологічного контролю виготовлення дроту ПЭЭИДХ2-200 є забезпечення стабільності характеристик мідного провідника.

У двошаровій ізоляції емальдроту, яка складається з шарів з різними діелектричними властивостями, окрім типових видів поляризації при випробуваннях постійною високою напругою на прохід, виникає міграційна

поляризація, яка супроводжується накопиченням об'ємних зарядів в ізоляції, що суттєво впливає на розподіл електричного поля в ізоляції. Розподіл поля встановлюється відповідно діелектричних проникностей шарів ізоляції: $e_1 E_1(0) = e_2 E_2(0)$. З часом виникає накопичування зарядів на межі розділу шарів та встановлюється стаціонарний стан. Тривалість цих переходних процесів визначає час релаксації t . Для ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0.10 мм до 0.63 мм, де питомі провідності шарів мають різні значення час релаксації досягає кількох секунд.

Тому, кількість слабких місць, які фіксуються при випробуваннях високою напругою на прохід (при швидкостях емальювання більше 100 м/хв.) відображає не тільки наявність механічних неоднорідностей в ізоляції, але й прямо пов'язана з електричними властивостями двошарової емальізоляції. Відповідно, для компенсації струму поляризації необхідне застосування зарядного електрода достатньої довжини [7]. Тому виокремлення впливу характеристик мідного провідника є специфічно актуальною задачею організації технологічного контролю саме цього виду кабельної продукції.

Висновки. 1. Показано, що пластичність міді є важливою складовою забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і що її пластичність суттєво впливає на величину і стабільність напруги пробою дроту ($\text{Corr}(U, \delta) = -0,734$ на рис.2 для 30 котушок по 2000 м проводу в кожній).

2. Результати і технологічні параметри традиційних неруйнівних випробувань емальізоляції високою напругою на прохід для двошарової поліімідної ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ прямо пов'язані з електричними властивостями цієї емаль ізоляції. Тому виокремлення впливу характеристик мідного провідника є специфічно актуальною задачею організації поточного технологічного контролю саме цього виду кабельної продукції.

Список літератури: 1. Harrold D. Designing for Six Sigma Capability / D.Harrold // Control Engineering/ - 1999. -P.62-70. 2. Адлер Ю.П., ШлепБ.Л. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. Методы менеджмента качества. Октябрь 2000.-С. 15 – 23. 3. Walton M. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming / M.Walton/ - NY 10016, Copyright 1986/ - P.262. 4. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. –classified - 2007. – p.18. 5. Гурин А.Г. Исследование электрической и механической прочности изоляции эмальпроводов / А.Г. Гурин, Ю.А. Антонец, Л.А. Щербенюк, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХП». –2004. – № 7. – С.111– 115. 6. Антонец Ю.А. Контроль технологического процесса изготовления эмальпровода / Ю.А. Антонец, Л.А. Щербенюк, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХП». - 2005. – Вип.42.– С. 43 – 46. 7. Гурин А.Г., Голик О.В. Способ определения дефектности двошаровой изоляции эмальдроту. Декларационный патент на полезную модель. G01N 27/00.

Надійшла до редакції 03.09. 2010

Ю.Н. ШУМИЛОВ, д-р. техн. наук., проф., ГП «НИИВН» (Славянск)
М.Ю. ШУМИЛОВ, ГП «НИИВН» (Славянск)

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ РЕЗИН АДДИТИВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ В КОНСТРУКЦИЯХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

У статті науково обґрунтована можливість застосування гум адитивної вулканізації для виготовлення суцільнолитих захисних оболонок високовольтних полімерних ізоляторів.

In the article the scientifically grounded possibility of application of additive vulcanization rubbers for making of the solid-cast shields of high-voltages polymeric insulators.

Кремнийорганическая защитная оболочка высоковольтного полимерного изолятора является основным элементом конструкции, обеспечивающим высокую электрическую прочность при комплексном воздействии эксплуатационных факторов и сильного электрического поля.

В полимерных изоляторах первого поколения применялась так называемая «шашлычная» конструкция кремнийорганической защитной оболочки, рис. 1.



Рис. 1 - «Шашлычная» конструкция полимерного изолятора

Сборка такой оболочки проводилась вручную путем монтажа на стеклопластиковый стержень отдельно отпрессованных резиновых ребер. Для обеспечения герметичности получаемой таким образом защитной оболочки и повышения электрической прочности изолятора используют промежуточное связующее вещество – кремнийорганический герметик холодной вулканизации. После окончания сборки защитной оболочки изоляторы устанавливают вертикально и выдерживают при температуре цеха 18-21 °С не менее 5 суток до следующей технологической операции.

Для изготовления защитной кремнийорганической оболочки в полимерных изоляторах первого поколения применяются резины пероксидной вулканизации на основе каучука СКТН. Реакция вулканизации приведена на рис. 2. Наиболее распространенным перекисным вулканизирующим агентом, применяемым в упомянутых резинах является перекись 2.4 – дихлорбензоила.

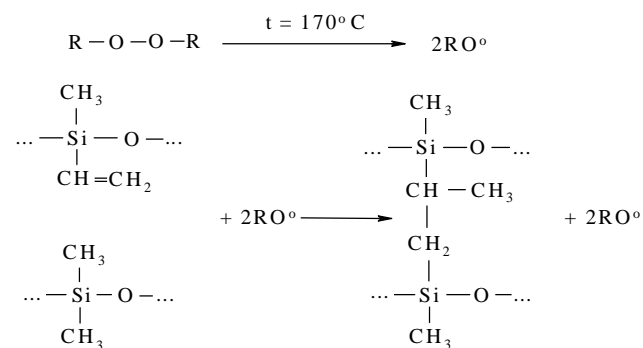


Рис. 2 - Схема вулканизации каучука СКТВ

Недостатками данной технологии является:

- необходимость проведения 2-й стадии вулканизации резины при 200 °С в среде циркулирующего горячего воздуха в течение 10 часов;
- большие трудозатраты на сборку изоляционного элемента изолятора;
- возможность появления щелей между ребрами при использовании герметика низкого качества или в результате плохой промазки герметиком при сборке.

Использование принципиально новой технологии литья цельной защитной оболочки непосредственно на стеклопластиковый стержень дало возможность решить указанные проблемы. Однако такая технология повышает требования к технологичности резин и соответственно усложняет технологическое оборудование – требуется применение литьевого инжекционного пресса.

Эти проблемы решены на принципиально новой основе - использовании цельнолитой технологии литья защитной оболочки на стержень (рис. 3) и применения новых резин аддитивной сшивки с низкой температурой вулканизации.



Рис. 3 - Цельнолитая конструкция полимерного изолятора

В процессе совместной работы с сотрудниками известной фирмы Dow Corning была выбрана, недавно разработанная, твердая резиновая смесь

каталитической вулканизации, содержащая в качестве основы полидиметилвинилсилоксановый каучук (компонент А) с добавками метилгидросилоксанов (компонент В) и платинового катализатора (комплексное соединение хлорплатиновой кислоты). В этой смеси вулканизация каучука осуществляется по реакции гидросилилирования, при которой на винильную группу компонента А воздействуют гидридные группы компонента В при температуре 100 – 120 °С (рис. 4).

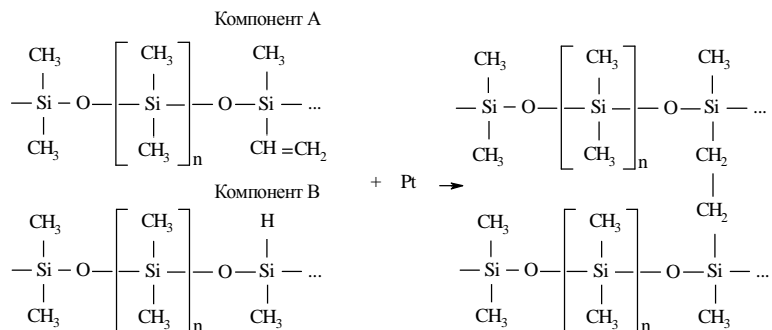


Рис. 4 - Схема вулканизации аддитивных кремнийорганических резин.

Преимуществом этого метода является отсутствие при вулканизации побочных реакций и продуктов распада перекисей, а платиновый катализатор, оставаясь в резине в малом количестве не влияет на свойства вулканизата. Кроме этого, катализируемый платиной процесс сшивания протекает без выделения запаха, смеси лучше формируются и имеют высокие электро-физические характеристики. Вулканизаты имеют низкую остаточную деформацию при сжатии, менее 4 %. Низкая температура вулканизации резины не вызывает растрескивания стеклопластикового стержня при вулканизации оболочки.

Однако при отработке технологии литья цельнолитой оболочки столкнулись с рядом проблем – пористость резины при недовулканизации (рис. 5), разнотолщинность (эксцентриситет) цельнолитой оболочки (рис. 6). Проблема «эксцентриситета» была решена путем применения специальных технологических упоров в прессформе, отводящихся на последних секундах впрыска резины (рис. 7).



Рис. 5 - Пористость резины в слое, примыкающем к стеклопластиковому стержню

Рис. 6 - Разнотолщинность (эксцентриситет) цельнолитой кремнийорганической оболочки полимерного изолятора



Рис. 7- Нижняя половина литьевой формы для литья кремнийорганических оболочек линейных изоляторов с тремя технологическими упорами

Высокая адгезионная прочность соединения силиконовой оболочки к стеклопластиковому стержню достигалась нанесением на поверхность стержня тонкого слоя грунтовки «праймера» представляющего раствор органо-функционального силана в жидком растворителе. Применяемый праймер содержал в структуре функциональные группы двух типов: алкоксигруппы для для связи со стекловолокном и винильные группы для реакции с гидридными группами резиновой смеси (рис. 8).

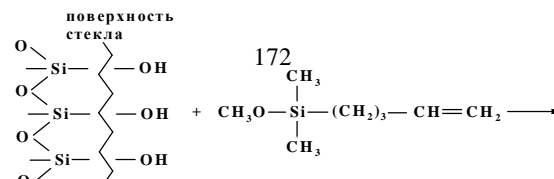


Рис. 8 - Схема химической связи силанов с поверхностью стекла.

Обеспечение технологической стабильности адгезионной связи резины с поверхностью стеклопластикового стержня достигалось путём тщательной изоляции платинового катализатора от следов аминного ускорителя в эпоксидной связке, выступающего на поверхность стеклопластика при вулканизации оболочки. При избытке ускорителя или недоотверждении стеклопластика, выступающие на поверхность следы аминного ускорителя блокируют платиновый катализатор, затрудняя сшивку между функциональными группами резиновой смеси и праймера; этим объясняется возникновение нестабильности адгезионной прочности при массовом производстве изоляторов и снижение электрической прочности.

Для проверки пригодности цельнолитой защитной оболочки, изготовленной из кремнийорганической резины аддитивной вулканизации в конструкциях высоковольтных полимерных изоляторов была составлена программа исследовательских испытаний, отражающая воздействие на изолятор основных эксплуатационных факторов (рис.9).

Исследования выполнялись на изоляторах 3,3 – 750 кВ, изготовленных по разработанной при выполнении работы технологии и на новой производственной линии. Адгезия защитной оболочки к металлу, определяемая методом отрыва, превышала нормативный показатель более чем в два раза после кипячения. Изоляторы после климатических испытаний, включающих резкий сброс нагрузки при температуре -25 С, термомеханические испытания под нагрузкой при -60 С - +50 С, кипячения 42 час. в 0,1% растворе NaCl выдержали с большим запасом контрольные испытания импульсным напряжением с крутым фронтом волны, испытания напряжением промышленной частоты величиной $0,9U_{ср}$ в течение 30 мин. без нагрева и изменения тока утечки а также другие виды контрольных испытаний.



Рис. 9 - Схема комплексных испытаний опытных образцов цельнолитых полимерных изоляторов.

Таким образом, гипотеза об эффективности использования кремнийорганических резин аддитивной каталитической вулканизации для изготовления полимерных изоляторов с цельнолитой защитной оболочкой была полностью подтверждена, а результаты исследований использованы при разработке новых конструкций полимерных изоляторов и технологии их производства.

Выводы. 1. Применение резин каталитической (аддитивной) вулканизации и использования технологии инъекционного литья под давлением, позволило изготавливать изоляторы с цельнолитой защитной

оболочкой длиной от 0,3 м до 3,5 м без стыков между ребрами с повышенной адгезионной и электрической прочностью. 2. Применение резин аддитивной вулканизации за счет пониженной температуры молекулярной сшивки позволило также устранить термо-растрескивание стеклопластика, вызывающее снижение его электрической прочности. 3. При исследовании формирования границы раздела между резиной и поверхностью стеклопластика при наложении защитной оболочки выявлена роль следов аминного ускорителя в стеклопластике, влияющего на прочность и стабильность адгезионной связи между ними. 4. Использование результатов исследований позволило разработать конструкции изоляторов 3,3 – 750 кВ с цельнолитыми оболочками с повышенными влагозащитными свойствами и электрической прочностью при комплексном воздействии эксплуатационных факторов. Конструкции изоляторов на напряжение 3,3 – 750 кВ с цельнолитыми оболочками из резины аддитивной вулканизации успешно выдержали приемочные и сертификационные испытания, при этом запас электрической прочности по отношению к нормативным показателям для изоляторов 3,3 – 750 кВ составил 1,1 – 1,5, а по механической прочности 1,15 – 1,9. 5. Применение резин каталитической вулканизации и применение технологии инъекционного впрыска позволило также увеличить производительность труда, улучшить санитарно-гигиенические условия и стабильность производства. 6. На базе разработанной технологии на предприятии «ЕС Полимер» введена в эксплуатацию новая производственная линия для изготовления полимерных изоляторов. Научно-производственное предприятие «ЕС Полимер», было зарегистрировано как первый в Украине производитель полимерных изоляторов с цельнолитой оболочкой с полной номенклатурой строительных длин.

Список литературы: 1. Химия и технология кремнийорганических эластомеров / под. ред. В.О. Рейхсфельда. – Л.: Химия, 1964. – 176 с. 2. Шетц М. Силиконовый каучук / М. Шетц. – Л.: Химия, 1975. – 128 с. 3. Кремнийорганическая резиновая смесь для высоковольтных изоляторов и других электротехнических изделий / Ф. М.Палютин, В. Я.Калмыкова, Г. А.Михайлова, В. А.Бабурина, В. З.Трифонов. - Материалы международной научно-технической конференции “Подвесные и опорные полимерные изоляторы: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, диагностика” (Санкт-Петербург, 4 – 9 октября 2004 г.). – Санкт-Петербург.: ПЭИПК, 2004. – с. 130 – 134. 4. Одностадийные силоксановые резиновые смеси // Ю.Р.Колесник, О.В.Лозинская, А.В.Васильковский, В.Н.Сулима, А.А.Чохленко // Вопросы химии и химической технологии. Специальный выпуск. – 2000. – №4. – С. 55 – 56. 5. Rogal P. State-of-the Art Silicone Rubber Materials for Molding High Voltage Transmission and Distribution Insulators / P. Rogal // Applying New Technologies for Better Reliability and Lower Costs: 2001 World Insulator Congress, Shanghai, China, 2001. - P. 20 – 28. 6. Андрианов К.А. Исследование вулканизации полидиметилвинил-силоксанового каучука кремнегидридами / К. А. Андрианов, А.В. Горшков // Высокомолекулярные соединения. – 1979. – А XXI, № 6. – С. 1348 – 1354. 7. Плюдеман Э. Роль Силановых аппретов в образовании адгезионной связи на поверхности раздела / Э.Плюдеман // Композиционные материалы. - Том 6. – М.: Мир, 1978. – С. 182 – 227. 8. Silicones / В.Pachaly, F.Achenbach, C.Herzig, K.Mautner // *Greating Tomorrows Solutions: Wacker Chemie AG, Munchen, Germany, 2007.* - P. 113.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

УДК 621.314

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, старш. преподаватель, НТУ «ХПИ»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

У статті виконано аналіз впливу експлуатаційних чинників на інтенсивність старіння трансформаторних масел в баках силових високовольтних трансформаторів. Встановлено, що основними чинниками, які обумовлюють швидкість старіння масел є завантаження трансформаторів, тривалість експлуатації та якість трансформаторних масел.

In article the analysis of operational factors on intensity of ageing of transformer oils in tanks of high-voltage power transformers is executed. It is established, that by the major factors influencing for speed of ageing of oils, loading of transformers, duration of operation and quality of transformer oils are.

Постановка задачи. Трансформаторные масла являются одним из важнейших элементов изоляции силовых высоковольтных трансформаторов. Надежность трансформаторов во многом зависит от состояния масел. В процессе длительной эксплуатации под воздействием сильных электрических полей, рабочей температуры, химически агрессивных сред и других факторов происходит изменение химической структуры масел и ухудшение их изоляционных свойств. Усовершенствование методов диагностики состояния трансформаторных масел принципиально не возможно без учета закономерностей старения трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации и анализа влияния эксплуатационных факторов на скорость старения масел. В связи с этим исследование процессов старения трансформаторных масел в условиях реальных эксплуатационных воздействий в течение длительной эксплуатации является актуальной и важной задачей.

Анализ публикаций. В настоящее время кинетика старения масел достаточно подробно изучена и описана в литературе. В [1] установлено, что окисление трансформаторных масел происходит по цепному механизму, там же выделены основные участки окисления масел, проанализирован состав продуктов окисления. Влияние температуры, концентрации кислорода, напряженности электрического поля и других факторов на скорость окисления масел приведено в работах [1-3]. Однако, эти исследования выполнялись в лабораторных условиях, при строго фиксированных значениях температуры и напряженности электрического поля. Поэтому полученные результаты не могут в полной мере отражать особенности старения масел в условиях эксплуатации.

Цель статьи. В данной статье, на основе анализа результатов эксплуатационного контроля, выполнена оценка влияния эксплуатационных

факторов на интенсивность старения трансформаторных масел.

Методика решения задачи. В качестве исходных данных для выполнения анализа использовались результаты периодических испытаний состояния трансформаторных масел по 249 трансформаторам напряжением 110 кВ из 6 областей Украины. Анализу подвергались как результаты контроля физико-химических показателей масел, так и результаты хроматографического анализа растворенных в масле газов. Всего проанализированы результаты испытаний по 20 показателям, характеризующим изменение изоляционных свойств масел на промежутке до 50 лет эксплуатации. Для удобства анализа были сформированы группы показателей с одинаковой скоростью дрейфа согласно [4]. Наглядно такие группы (М1 - М6) иллюстрирует рис. 1, на котором приведены зависимости кислотного числа трансформаторных масел от длительности эксплуатации.

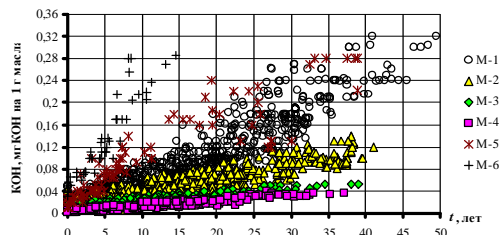


Рис. 1 - Зависимость кислотного числа трансформаторных масел от длительности эксплуатации для 6 групп трансформаторов с одинаковой скоростью старения.

На первом этапе исследований проверялось, на сколько различны скорости дрейфа кислотного числа масел между выделенными 6 группами. Поскольку предполагается, что значения показателей изменяются не только во времени, но и между группами то для проверки различий скорости старения использовалась математическая модель двухфакторного перекрестного дисперсионного анализа [5]. При этом фактор длительности эксплуатации располагался по строкам, а фактор группы по столбцам. Считается, что число наблюдений в каждой ячейке одинаково и равно m .

Если эффекты изменения уровней факторов аддитивны, т.е. разность математических ожиданий между любыми двумя уровнями одного фактора одинакова при любых уровнях другого, то модель компонент дисперсии может быть представлена в виде линейного уравнения [5]:

$$y_{ijr} = \mu + \rho_i + \gamma_j + \varepsilon_{ijr}, \quad (1)$$

где y_{ijr} – значение показателя качества масла; μ – общее среднее; ρ_i – среднее отклонение относительно μ для i -го уровня первого фактора; γ_j – среднее отклонение относительно μ для j -го уровня второго фактора; ε_{ijr} – остаточная случайная величина; i – уровень первого фактора; j – уровень второго

фактора; порядок появления одного из m_{ij} наблюдений для сочетания i -го уровня первого с j -м уровнем второго фактора.

Если эффекты не аддитивны, то необходимо ввести в модель (1) составляющую, характеризующую взаимодействие между факторами, тогда уравнение примет вид:

$$y_{ijr} = \mu + \rho_i + \gamma_j + (\rho\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijr}, \quad (2)$$

где: $(\rho\gamma)_{ij}$ – составляющая характеризующая взаимодействие между факторами;

Выражение для полной суммы квадратов отклонений от общего среднего для модели (2) имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2 = k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 \quad (3)$$

Откуда общая сумма квадратов отклонений от среднего:

$$Q_{\text{общ}} = Q_A + Q_B + Q_{AB} + Q_e \quad (4)$$

где: $Q_A = k \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений, характеризует рассеяние средних по строкам относительно общего среднего;

$Q_B = n \cdot m \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений от общего среднего между столбцами, характеризует рассеяние средних по столбцам;

$Q_{AB} = m \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений

характеризует эффект взаимного влияния; $Q_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^m (y_{ijr} - \bar{y}_{ij})^2$ – сумма

квадратов отклонений внутри серии, характеризующая рассеяние отдельных наблюдений в серии относительно среднего серии, обусловленное влиянием только случайных величин.

Проверка гипотезы о значимости влияния факторов и их взаимодействий осуществлялись с помощью критерия Фишера. Для этого сначала, были найдены оценки средних квадратов:

$$\text{Общая: } s_{\text{общ}}^2 = \frac{Q_{\text{общ}}}{n \cdot k \cdot m - 1} = \sigma_e^2 + \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{AB}^2;$$

$$\text{межстрочная: } s_A^2 = \frac{Q_A}{n - 1} = \sigma_e^2 + k \cdot m \cdot \sigma_A^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2;$$

между столбцами: $s_B^2 = \frac{Q_B}{k-1} = \sigma_\varepsilon^2 + n \cdot m \cdot \sigma_B^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2$;

взаимодействия: $s_{AB}^2 = \frac{Q_{AB}}{(n-1) \cdot (k-1)} = \sigma_\varepsilon^2 + m \cdot \sigma_{AB}^2$;

остаточную: $s_\varepsilon^2 = \frac{Q_\varepsilon}{n \cdot k \cdot (m-1)} = \sigma_\varepsilon^2$.

Значение F -критериев вычислялись как отношения соответствующих средних квадратов к остаточному среднему квадрату:

$$F_A = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_\varepsilon^2}, \quad F_B = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_\varepsilon^2}, \quad F_{AB} = \frac{\sigma_{AB}^2}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (5)$$

Гипотеза об отсутствии влияния фактора или эффекта взаимодействия не отвергалась, если расчетное значение F -критерия меньше табличного, при соответствующих значениях числа степеней свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$.

Значения сумм дисперсионного разложения, а также расчетные и критические значения F -критериев, полученные в результате дисперсионного разложения для групп кислотного числа масел приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты двухфакторного дисперсионного анализа

n	k	Суммы дисперсионного разложения					F критерии (расчетный / критический)		
		Q _{общ}	Q _A	Q _B	Q _{AB}	Q _{ост}	F _A	F _B	F _{AB}
5		0,83065	0,22317	0,43471	0,14021	0,03254	1193,08	2904,9	187,39
							2,23	2,39	1,59

Для всех анализируемых показателей качества масла, расчетные значения F -критериев значимо превышают табличные. А это значит, что скорости дрейфа показателей между группами значимо отличаются.

На основании этого можно сделать следующие выводы:

1. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_A граничных значений свидетельствует о том, что наблюдается дрейф значений показателей масел во времени, т.е. происходят процессы старения масла;

2. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_B граничных значений свидетельствует о том, что скорость дрейфа показателей масел, отличается между группами, а значит, трансформаторы в различных группах эксплуатировались в различных условиях;

3. Значимое превышение расчетными значениями критериев F_{AB} граничных значений свидетельствует о том, что эффекты изменения уровней

факторов не аддитивны, т.е. эффект от изменения уровня воздействия одного фактора приводит к изменению эффекта от уровня воздействия другого.

Анализ полученных результатов. Разная скорость старения масел между группами показателей, обусловлена в первую очередь различной загрузкой трансформаторов [6]. Однако, представляет непосредственный интерес проанализировать и влияние других факторов. Поэтому анализировалось качество заливаемого масла, длительность эксплуатации, влияние региона, влияние типа и номинальных характеристик трансформаторов на скорость старения масел. В таблице 2 приведены основные характеристики трансформаторов, которые входят в группы М-1 – М-6 для кислотного числа трансформаторных масел. Анализ данных табл. 2 позволяет сделать ряд выводов о значимости влияния следующих факторов:

Влияние качества заливаемого масла. Как видно из табл. 2 значения кислотного числа масла на момент заливки в бак трансформаторов колеблется в достаточно широком диапазоне. Наименьшие значения кислотного числа выделены в группе М-4 (ей же соответствует и наименьшая скорость окисления см. рис. 1). Максимальные значения кислотного числа наблюдались в группе М-6 (максимальная скорость окисления). Для остальных групп трансформаторов кислотное число на момент заливки имеет промежуточные значения. Влияние качества масла на скорость его старения может быть объяснено ростом числа свободных радикалов в масле с худшим качеством (в данном случае с повышенным значением кислотного числа), что и приводит к повышенной интенсивности окислительных реакций.

Влияние продолжительности эксплуатации. Группы кислотного числа с наибольшей интенсивностью окисления (М-1, М-5 и М-6) составляют в основном трансформаторы с наработкой свыше 30 лет, а группы с наименьшей интенсивностью окисления (М-3 и М-4) содержат наибольший процент трансформаторов с наработкой до 20 лет. Данное обстоятельство свидетельствует с одной стороны о влиянии загрузки трансформаторов на интенсивность окислительных процессов (поскольку температура масла будет во многом зависеть от величины нагрузочных потерь, а загрузка трансформаторов до 1990 г была значительно выше, чем после 1990 г.). С другой стороны важным фактором является также время эксплуатации, поскольку старение изоляции протекает и при низких температурах, но с меньшей интенсивностью (эффекты изменения уровней факторов не аддитивны).

Влияние региона. При анализе распределения трансформаторов из различных регионов Украины по группам нельзя не обратить внимание, на то что, группы с наибольшей интенсивностью старения (М-1, М-5 и М-6) состоят преимущественно из трансформаторов находящихся в эксплуатации в Донецкой и Луганской областях. Вероятней всего это связано с преобладанием промышленного потребителя в составе нагрузки данных

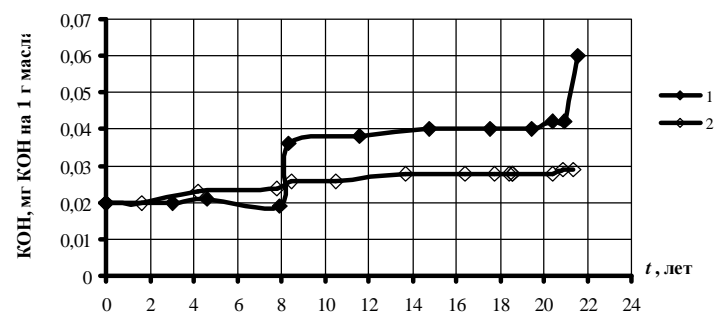
трансформаторов, а следовательно и с более жестким температурным режимом их эксплуатации.

Таблица 2 - Характеристики групп трансформаторов с одинаковой скоростью дрейфа кислотного числа

Характеристика массива	Массив данных					
	М-1	М-2	М-3	М-4	М-5	М-6
Значение показателя на момент заливки масла, мг КОН на 1 г масла						
Максимальное	0,049	0,043	0,027	0,009	0,028	0,049
Среднее	0,020	0,019	0,018	0,004	0,017	0,040
Минимальное	0,010	0,003	0,010	0,001	0,010	0,030
Среднее время выхода показателя за граничное значение, лет	18,41	30,76	-	-	7,33	4,49
Распределение трансформаторов по сроку службы, %						
до 10 лет	0	0	15	6	0	0
от 10 до 20 лет	21	35	52	63	25	0
от 20 до 30 лет	31	35	30	31	50	0
от 30 до 40 лет	35	27	3	0	0	33
более 40 лет	13	3	0	0	25	67
Распределение трансформаторов по регионам, %						
Донецкая обл.	23	16	3	6	25	33
АР Крым	0	5	9	19	0	0
Луганская обл.	49	24	3	44	75	67
Полтавская обл.	5	8	0	6	0	0
Сумская обл.	8	5	0	25	0	0
Харьковская обл.	15	42	85	0	0	0
Распределение трансформаторов по номинальным мощностям, %						
10 МВА	0	0	0	6	0	0
16 МВА	2	8	3	13	0	0
20 МВА	6	8	0	0	0	0
25 МВА	33	22	58	31	0	0
32 МВА	33	16	6	25	25	0
40 МВА	22	46	33	19	25	67
63 МВА	4	0	0	6	50	33
Распределение трансформаторов по типу исполнению, %						
ТДН	6	2	3	6	0	0
ТМН	0	0	0	6	0	0
ТДНГ	22	6	3	6	50	0
ТРДН	24	39	27	25	0	33
ТДТН	44	39	61	44	50	33
ТДТНГ	4	10	6	13	0	34
Зарубежные	0	4	0	0	0	0
Распределение трансформаторов по номинальным напряжениям, %						
110/6 кВ	27	29	21	38	0	33
110/10 кВ	8	20	12	6	0	0

110/10/6 кВ	4	4	21	0	0	0
110/35/6 кВ	43	41	40	25	75	34
110/35/10 кВ	18	6	6	31	25	33

Влияние номинальной мощности трансформаторов. Как и следовало ожидать, номинальная мощность трансформаторов не влияет на интенсивность старения масел. Значимым является не величина номинальной мощности трансформаторов, а на сколько процентов от номинальной мощности был загружен анализируемый трансформатор на всем интервале эксплуатации. Наглядно данный факт иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости кислотного числа масел от продолжительности эксплуатации для трансформаторов ПС «Алексеевская Т-1, ТРДН-25, 110/10» (кривая 1) и ПС «Московская Т-2, ТРДН-40, 110/10» (кривая 2) АК Харьковоблэнерго.



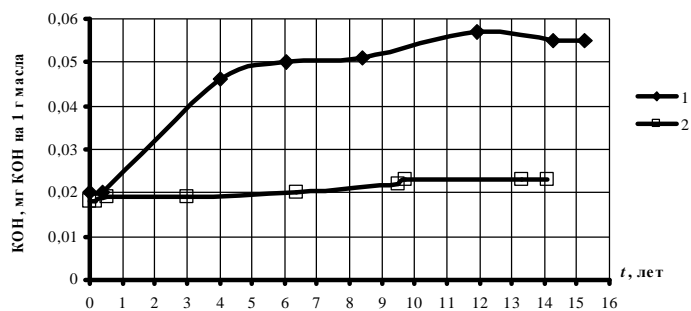
1 – трансформатор ПС «Алексеевская Т-1, ТРДН-25, 110/10»;
2 – трансформатор ПС «Московская Т-2, ТРДН-40, 110/10»;

Рис. 2 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации

Как видно из рисунка скорость старения масла в трансформаторе ПС «Алексеевская Т-1» превышает скорость старения масла в трансформаторе ПС «Московская Т-2», не смотря на то, что номинальная мощность трансформатора ПС «Московская Т-2» выше. Это обусловлено тем, что средняя нагрузка трансформатора ПС «Алексеевская Т-1» составила 35,2%, а трансформатора ПС «Московская Т-2» 16,2%.

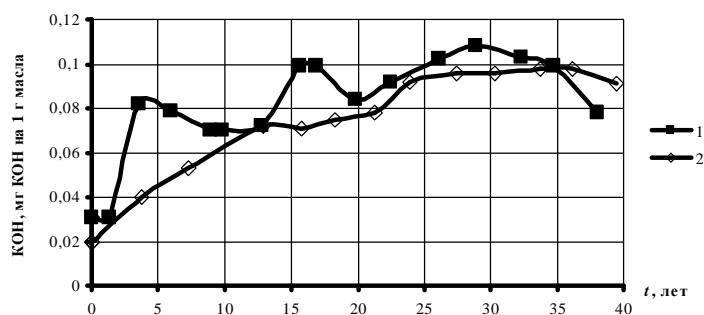
Влияние типов и номинальных напряжений трансформаторов. Анализируя данные табл. 2. легко увидеть, что ни тип трансформатора ни напряжение на обмотках СН и НН не оказывают значимого влияния на скорость старения масел. Как и в случае с номинальной мощностью трансформаторов, определяющим фактором интенсивности старения масел является его нагрузка. Однотипные трансформаторы с одинаковым значением

напряжения на сторонах СН и НН при разных значениях коэффициентов загрузки имеют различные скорости старения (см. рис. 3). Так, трансформатор АК Харьковоблэнерго ПС «Основа Т-1, имеет среднюю загрузку 39%, а «Основа Т-2» – 11%, что и обуславливает различную интенсивность окисления при одинаковых типах и номинальных напряжениях этих трансформаторов. В тоже время скорость старения масел в трансформаторах разного типа, но при одинаковой нагрузке практически одинакова (см. рис. 4). Загрузки трансформаторов АК Харьковоблэнерго ПС «Сокольники Т-1» и «Сокольники Т-2» приблизительно одинаковы 52% и 54% соответственно, что и обуславливает примерно одинаковую скорость старения при различных типах этих трансформаторов.



- 1 – трансформатор ПС «Основа Т-1, ТДТН-40, 110/35/6»;
- 2 – трансформатор ПС «Основа Т-2, ТДТН-40, 110/35/6».

Рис. 3 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации



- 1 – трансформатор ПС «Сокольники Т-1, ТДНГ-32, 110/6»;
- 2 – трансформатор ПС «Сокольники Т-2, Франция, 110/6».

Рис. 4 - Зависимость кислотного числа масел от длительности эксплуатации

Выводы. В условиях длительной эксплуатации старение трансформаторных масел в баках силовых высоковольтных трансформаторов протекает с разной скоростью. В результате скорость дрейфа показателей качества трансформаторных масел значительно отличается. Основными факторами, влияющими на скорость старения масел, являются: загрузка трансформаторов, длительность эксплуатации и качество масел. Установлено, что номинальная мощность, тип и номинальные напряжения на обмотках СН и НН трансформаторов не оказывают значимого влияния на интенсивность окислительных реакций.

Список литературы: 1. *Липштейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983 г.-296 с. 2. *Бурьянов Б.П.* Трансформаторное масло. М., Государственные энергетические издания – 1955 – 190. 3. *Штегер Г.* Электроизоляционные материалы М.: Госэнергоиздат, 1961. – 264с. 4. *Шутенко О.В.* Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний // Интеграція технологій та енергозбереження.– Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 4. – С. 42–50. 5. *Давыденко А.П.* Организация и планирование научных исследований, патентоведение: Учеб. пособие – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 320с. 6. *Шутенко О.В.* Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла / *О.В. Шутенко* // Энергетика та електрифікація. – 2008 – №8. – С. 54–59.



Шутенко Олег Владимирович закончил электроэнергетический факультет ХПИ в 1994 г. по специальности «Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника». В 2010 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Усовершенствование диагностики силовых высоковольтных трансформаторов на основе анализа закономерностей длительного старения масел». Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Поступила в редколлегию 03.09.2010

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Антонець Ю.А., Гурин А.Г., Голик О.В.</i> Суцільний контроль дефектності емалізоляції при випробуванні високою напругою на прохід.....	3
<i>Баклай Д.Н.</i> Анализ принципов построения экспертных систем для оценки состояния изоляции маслонаполненного оборудования.....	9
<i>Беспрозванных А.В.</i> Динамика частотно - временных характеристик изоляционных промежутков телефонных кабелей по результатам диэлектрической спектроскопии.....	16
<i>Беспрозванных А.В., Морозов И.А.</i> Поверхностные дефекты и способы их устранения при экструдировании полимерных оболочек волоконно-оптических кабелей.....	28
<i>Бондаренко В.Е., Аулова Н.В.</i> Анализ традиционной системы оценки состояния трансформаторных масел в баках трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 330 кВ.....	38
<i>Веприк Ю.Н.</i> Методы моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией и тенденции их развития.....	48
<i>Вороненко Д.И.</i> Информационная система поддержки принятия решения при управлении региональными энергосистемами.....	62
<i>Гайдай О.А., Лисенко Л.И.</i> Анализ методов распределения комплексных затрат в комбинированном цикле ТЭЦ.....	70
<i>Гапон Д.А.</i> Исследование точности определения частоты промышленной сети методом сканирования по АЦП.....	77
<i>Дейнеко Н.А.</i> Оцінка надійності функціонування електротехнічного устаткування об'єктів енергетики.....	81
<i>Ефимовский А.В., Владимиров Ю.В.</i> Целесообразность использования синхронного двигателя в качестве компенсатора реактивной мощности.....	87
<i>Зиков М.Б., Васильева О.В., Бойко А.М., Курченко І.С., Таран І.В.</i> Дослідження критеріїв оцінки механічних властивостей кабельних пластмас в умовах заводської лабораторії.....	94
<i>Кизилов В.У., Рудевич Н.В.</i> Підвищення точності перетворення високовольних вимірювальних трансформаторів напруги.....	99
<i>Кизилов В.У., Панченко Е.А.</i> Измерение активной мощности в энергосистеме.....	105
<i>Ким Ен Дар, Таран Н.В.Н.</i> Статистические данные по аварийности энергетического оборудования распределительных устройств 220 кВ и выше.....	109
<i>Лазуренко А.П., Черкашина Г.И.</i> Анализ характеристик электропотребления жилого дома.....	113
<i>Лактионов С.В.</i> Пороговые значения испытательных напряжений при контроле силовых кабелей высокого напряжения по характеристикам	119

частичных разрядов.....	
<i>Морозова Е.В.</i> Температуростойкие оптические волокна для применения в гермозоне АЭС.....	124
<i>Немировский И.А.</i> Современные проблемы энергоэффективности.....	130
<i>Набока Б.Г., Гоков А.П.</i> Влияние частоты и формы зондирующего электрического поля на распределение его силовых линий в образце кабеля АВВГ.....	133
<i>Нижевский И.В., Гуль В.И., Нижевский В.И.</i> Расчет потенциалов на каждом из отдельных взаимодействующих заземляющих устройств.....	141
<i>Сиротин Ю.А.</i> Δ Симметризатор - компенсатор Фризе.....	145
<i>Щебенюк Л.А., Антонець С.Ю.</i> Статичне дослідження впливу параметрів провідника на напругу пробую ізоляції емаль проводу.....	158
<i>Шумилов Ю.Н., Шумилов В.М.Ю.</i> Применение кремнийорганических резин аддитивной вулканизации в конструкциях высоковольтных полимерных изоляторов.....	164
<i>Шутенко О.В.</i> Оценка влияний условий эксплуатации на интенсивность старения трансформаторных масел	171

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»

Тематичний випуск
«Енергетика: надійність та енергоефективність»

№1 2010

Збірник наукових праць № 1, 2010 рік

Науковий редактор
А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.

Технічний редактор
Н.В. Себякіна, І.С. Варшамова

Відповідальний за випуск
В.М. Луньова

Обл. вид. № 177-10

Підп. до друку 22.11. 2010 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.14,3. Наклад 100 прим. 1-й з-д
1-100. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
