

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

---

# **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

**ПЯТАЯ РЕГИОНАЛЬНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ**

**ЭНЕРГИЯ-2010**  
**ИВАНОВО, 21 апреля 2010 г.**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ТОМ III**

---

ИВАНОВО

ИГЭУ

2010

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА:** Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – Т. 3. – 236 с.

Помещенные в сборник тезисы докладов студентов и аспирантов электроэнергетического факультета Ивановского государственного энергетического университета отражают основные направления научной деятельности кафедр в области электроэнергетики и высшего профессионального образования.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами электроэнергетики.

Тексты тезисов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена.

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель оргкомитета:** проректор по научной работе, д.т.н., проф. **В.В. ТЮТИКОВ**.

**Члены оргкомитета:** декан электроэнергетического факультета, профессор **А.Ф. СОРОКИН**, зав. кафедрой «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», д.т.н., профессор **В.А. ШУИН**, зав. кафедрой «Теоретические основы электротехники и электротехнологий», д.т.н., профессор **В.А. МАРТЫНОВ**, зав. кафедрой «Электрические станции и диагностика электрооборудования», д.т.н., профессор **А.Н. НАЗАРЫЧЕВ**, зав. кафедрой «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика», к.т.н., доцент **В.Ф. ВОРОБЬЕВ**, зав. кафедрой «Электрические системы», к.т.н., доцент **А.Ю. МУРЗИН**, заместитель декана электроэнергетического факультета по научной работе к.т.н., доцент **А.В. МАКАРОВ**.

## СЕКЦИЯ 11

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель – д.т.н., профессор **Слышалов В.К.**

Секретарь – ассистент **Полкошников Д.А.**

*Г.В. Чекан, асп.; рук. В.К. Слышалов, д.т.н., проф.*

### РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДСТАНЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ АВР

В настоящее время актуальна проблема оценки надежности различных элементов электрических сетей. Наиболее важную роль здесь играют подстанции для потребителей первой категории: они могут являться как элементами городских распределительных сетей, так и элементами сетей промышленных предприятий. Для этих подстанций характерно наличие на них не менее двух трансформаторов и системы автоматического включения резерва.

Из вышесказанного следует, что расчет показателей надежности таких подстанций особенно актуален. Для этого предлагается использование инженерной методики расчета показателей надежности, на основе теории марковских процессов [1].

Преимуществами предложенной методики являются:

- большая универсальность и реализация на ЭВМ;
- возможность расчета динамики процесса изменения показателей надежности во времени;
- наглядность графа состояний моделируемой системы;

Для определения показателей надежности был рассмотрен вариант обслуживания, наиболее приближенный к действительности, когда работает одна ремонтная бригада.

Система электроснабжения обобщенной подстанции, питающей потребителей первой категории, может находиться в одном из 6 состояний (рис. 1):

- (1) оба блока трансформаторов работают;
- (2) авария одного, другой работает;
- (3) плановый ремонт одного, другой работает;
- (4) плановый ремонт одного, отказ другого;
- (5) оба в аварийном состоянии;

(6) отказ системы АВР при работе только одного блока трансформаторов.

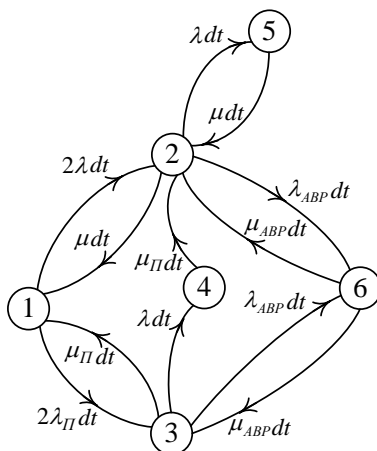


Рис. 1. Граф переходов и состояний для обобщенной подстанции

Интенсивности отказов ( $\lambda$ ) и восстановлений ( $\mu$ ) были взяты приближенно по [2], за отсутствием более актуальных данных.

Данному графу соответствует система дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= -(2\lambda + 2\lambda_{\Pi})P^{(1)}(t) + \mu P^{(2)}(t) + \mu_{\Pi}P^{(3)}(t), \\ \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= 2\lambda P^{(1)}(t) - (\mu + \lambda + \lambda_{ABP})P^{(2)}(t) + \mu_{\Pi}P^{(4)}(t) + \\ &+ \mu P^{(5)}(t) + \mu_{ABP}P^{(6)}(t), \\ \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= 2\lambda_{\Pi}P^{(1)}(t) - (\mu_{\Pi} + \lambda + \lambda_{ABP})P^{(3)}(t) + \mu_{ABP}P^{(6)}(t), \\ \frac{dP^{(4)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(3)}(t) - \mu_{\Pi}P^{(4)}(t), \\ \frac{dP^{(5)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(2)}(t) - \mu P^{(5)}(t), \\ \frac{dP^{(6)}(t)}{dt} &= \lambda_{ABP}P^{(2)}(t) + \lambda_{ABP}P^{(3)}(t) - 2\mu_{ABP}P^{(6)}(t). \end{aligned} \right\} (1)$$

Работоспособными являются состояния 1, 2, и 3; тогда коэффициент готовности можно определить, решая систему уравнений (1):

$$K_G = P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)}.$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- предложена достоверная математическая модель для определения показателей надежности подстанций, питающих потребителей 1 – 2 категории.
- разработанную математическую модель можно использовать для автоматизированного расчета показателей надежности.

#### Библиографический список

1. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ, 2006. – 704 с.
2. **Электротехнический** справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова [и др.]. – 9-е изд. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.

*Ю.В. Кандалов, асп.; рук. В.К. Слышалов, д.т.н., проф.*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТРУБОРОВОД – ЗЕМЛЯ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ТОКЕ

Приведенная на рис. 1 схема трубопровода, в электрическом отношении характерна тем, что участки длины  $\ell_c$  разделены на  $n$  ( $n \gg 2$ ) меньших участков опорами трубопровода, установленными с учетом топографических особенностей местности, т.е. неравномерно. Длины этих участков  $\ell_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) в сумме дают расстояние  $\ell_c$  между компенсаторами. Крепление трубопровода к стойкам осуществляется металлическими (стальными) хомутами, которые могут использоваться в двух вариантах: с изолирующей втулкой на трубе и без нее, т.е. при отсутствии или наличии электрического контакта между трубой и стойкой, следовательно в режимах изоляции от «земли» и заземления.

Таким образом, должны быть рассмотрена модель трубопровода, состоящего из последовательно соединенных отдельных участков, имеющих сосредоточенные поперечные утечки за счет заземлителей опор (рис. 1), т.е. в форме электрической цепи, образованной каскадно соединенными четырехполюсниками, каждый из которых соответствует отдельному участку длины  $\ell_k$ .

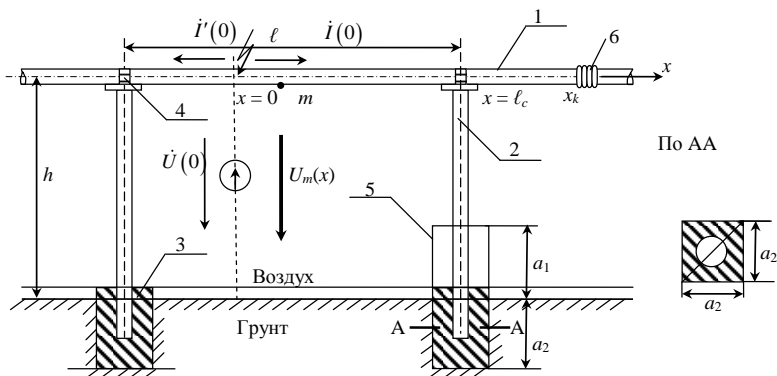


Рис. 1. Геометрические характеристики участка трубопровода: 1 – трубопровод  $\varnothing 273 \times 6,0$ ; 2 – стойка  $\varnothing 159 \times 4,5$ ; 3 – бетонный фундамент стойки (заземлитель); 4 – монтажный хомут; 6 – компенсатор; пунктирный контур 5 иллюстрирует способ применения метода изображений при расчете сопротивления заземлителя

В этом случае каждая из опор (стоек) трубопровода, число которых на участке длины  $\ell_c$  полагаем равным  $n \sim 10$  при расстоянии между ними  $\ell_k \left( \sum_k \ell_k = \ell_c \right)$  заземлена (1) через сопротивление  $r_{zk}$ . Эту ситуацию поясняет рис. 2.

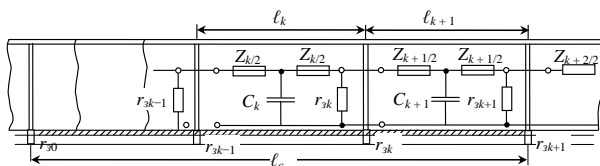


Рис. 2. Цепная схема замещения трубопровода

Каждый из участков длины  $\ell_k$  представлен на электрической схеме замещения Т-образным четырехполюсником с параметрами

$$\frac{\underline{Z}_k}{2} = \frac{(r_{0ЭФ} + j\omega L_{0ЭФ}) \cdot \ell_k}{2}, \quad \underline{Y}_k = j\omega C_k \ell_k. \quad (1)$$

Все четырехполюсники симметричные и соединены каскадно, т.е. также образуют симметричный четырехполюсник. Нагрузкой каждого из них является сопротивление заземления стойки  $r_z$ . Здесь необходимо заметить следующее: все эти сопротивления не могут быть одинаковыми в

силу их зависимости от множества различных факторов (удельного сопротивления грунта, качества изготовления и монтажа заземлителя и т.д.), поэтому расчетное значение  $r_{зк}$  считаем зависящим от номера стойки  $k$  и равным некоторому значению, которое определяется средним сопротивлением грунта  $\rho_{ГК}$  на участке

$$r_{з1} \neq r_{з2} \neq \dots \neq r_{зк} \neq \dots \neq r_{зн} . \quad (2)$$

Для описания четырехполюсника воспользуемся уравнениями в форме А [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Схема соединения элементов четырехполюсника приведена на рис. 2 и в обобщенном изображении имеет вид см. рис. 3.

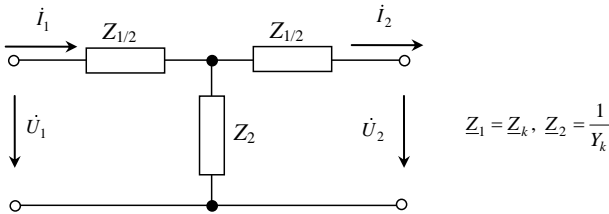


Рис. 3. Схема замещения четырехполюсника, соответствующая участку трубопровода длины  $\ell_k$ .

Коэффициенты  $A, B, C, D$  уравнений (3) вычисляются через сопротивления  $\underline{z}_1, \underline{z}_2$  по выражениям (табл. 14 – 1, [2]):

$$A = 1 + \frac{\underline{z}_1}{2\underline{z}_2} ; B = \underline{z}_1 \left( 1 + \frac{\underline{z}_1}{4\underline{z}_2} \right) ; C = \frac{1}{\underline{z}_2} ; D = A \quad (4)$$

Вторичные параметры четырехполюсника – характеристическое сопротивление  $\underline{Z}_c$  и постоянная передачи  $g$  связывают с его коэффициентами формулы:

$$\underline{Z}_c = z_c e^{jv} = \sqrt{B/c} ; g = a + jb = \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \ln \left( A + \sqrt{BC} \right), \quad (5)$$

где  $a$  – собственный коэффициент затухания;  $b$  – собственный коэффициент фазы четырехполюсника.

Напомним, что постоянная  $g$  определяется в режиме согласования. Входное сопротивление четырехполюсника

$$\underline{Z}_{ex} = \frac{A\underline{z}_2 + B}{C\underline{z}_2 + A},$$

где  $\underline{z}_2$  – сопротивление нагрузки.

Можно показать [5], что уравнения (3) для симметричного четырехполюсника преобразуются к форме

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_2 chg + \dot{I}_2 \underline{z}_c shg; \\ \dot{I}_1 &= U_2 \frac{shg}{\underline{z}_c} + \dot{I}_2 chg, \end{aligned} \right\} \begin{aligned} A &= D = chg, \\ B &= \underline{Z}_c shg, \quad C = \frac{shg}{\underline{Z}_c}. \end{aligned} \quad (6)$$

В данной модели выполняется условие (2), а все величины в уравнениях (6) зависят от номера участка  $k$ . Следовательно, имеем  $n$  пар уравнений типа (6) для величин  $\dot{U}_{1k}$ ,  $\dot{U}_{2k}$ ,  $g_k$  и т.д. При каскадном соединении  $n$  четырехполюсников схема замещения для модели трубопровода имеет вид:

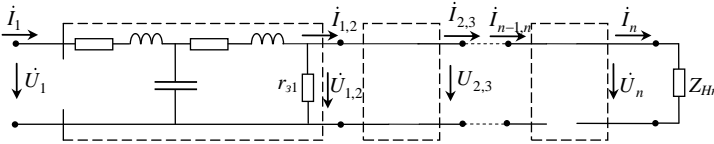


Рис. 4. Схема каскадного соединения  $n$  четырехполюсников

В этой схеме нагрузкой каждого Т-образного четырехполюсника, кроме  $n$ -го, является эквивалентное сопротивление параллельно соединенных сопротивлений  $r_3$  – собственного и  $\underline{z}_{ex}$  – последующей цепи. Для  $i$ -го четырехполюсника, например, получаем

$$\underline{Z}_{ni} = \frac{r_{3i} \cdot \underline{Z}_{exi+1}}{r_{3i} + \underline{Z}_{exi+1}}, \quad (7)$$

где  $r_{3i} + \underline{Z}_{exi+1}$  – входное сопротивление цепи, состоящей из  $i + 1$ ,  $i + 2$ , ..., и т.д. до  $n$ -го четырехполюсника.

Таким образом, начав расчет с  $n$ -го четырехполюсника, нагрузкой которого является сопротивление заземления  $r_{3n}$ , и определив его входное сопротивление по формуле, получаемой из (6):



$$\underline{Z}_{\text{вх}n} = \underline{Z}_c \frac{r_{3n} + \underline{Z}_c \operatorname{th} g_n}{r_{3n} \operatorname{th} g_n + \underline{Z}_c}, \quad (8)$$

выполняем расчет по (7) для четырехполюсника номера  $n - 1$  и т.д. до определения  $Z_{n1}$  и  $Z_{\text{вх}1}$ . Аналогичным образом для любого четырехполюсника при определении  $Z_{\text{вх}i}$  в (8) взамен  $r_{3n}$  следует подставить  $Z_{ni}$ .

Дальнейший расчет идет по уравнениям (3) или (8), в которых по заданному значению  $\dot{U}_1$  определяется  $\dot{I}_1$  (или наоборот), затем находятся значения  $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ .

Описанная методика несколько громоздка и поэтому оказывается целесообразным выполнить предварительное преобразование исходных симметричных Т-образных четырехполюсников в несимметричные объединив их с сопротивлением  $r_3$ . Для этого к симметричному четырехполюснику каскадно подключается одноэлементный четырехполюсник с параллельной ветвью [3], схема и уравнения которого даны на рис. 5.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2', \quad A = 1, \quad B = 0; \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_1 + \partial\dot{I}_2, \quad C = 1/r_3, \quad D = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

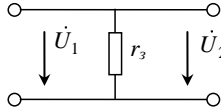


Рис. 5. Схема и уравнения одноэлементного четырехполюсника

При каскадном соединении следует перемножить матрицы уравнений (3) или (9)

$$\begin{aligned} \left\| \begin{matrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{matrix} \right\| &= \left\| \begin{matrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 1/r_p & 1 \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} A_1 + \frac{B_1}{r_p} & B_1 \\ C_1 + \frac{D_1}{r_p} & D_1 \end{matrix} \right\|. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения, соответствующего (10) четырехполюсника, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \left( A_1 + \frac{B_1}{r_3} \right) \dot{U}_2 + B_1 \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \left( C_1 + \frac{D_1}{r_3} \right) \dot{U}_2 + D_1 \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (11)$$

должно быть записаны для каждого из  $n$  четырехполюсников. В цепной схеме замещения (рис. 4) при этом исключаются все ветви с элементами  $r_{zk}$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) и она приобретает вид:

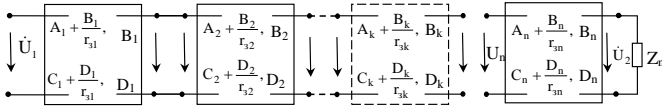


Рис. 6.

Целью дальнейших преобразований является получение коэффициентов эквивалентного цепи (рис. 6) четырехполюсника и определение сопротивлений  $Z_{c2}$ ,  $Z_{c2}$  и постоянной передачи  $g$ .

Первая из этих задач решается путем поперечного перемножения матриц коэффициентов соседних двухполюсников, как это было сделано выше (10). Через коэффициенты этого четырехполюсника  $A, B, C, D$  вычисляются искомые параметры. Формулы для вычисления приводим без пояснений из [2].

$$\left. \begin{aligned} Z_{c1} &= \sqrt{AB/CD} = \sqrt{Z_{1k} Z_{1x}}; \\ Z_{c2} &= \sqrt{DB/CA} = \sqrt{Z_{2k} Z_{2x}}; \\ g &= \ln(\sqrt{AD} + \sqrt{BC}); \quad chg = \sqrt{AD}; \\ thg &= \sqrt{Z_{1k} Z_{1x}} = \sqrt{Z_{2k} Z_{2x}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Обратные отношения

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}}} chg; \quad B = \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} chg; \\ C &= \frac{shg}{\sqrt{Z_{c1} \cdot Z_{c2}}}; \quad D = \sqrt{\frac{Z_{c2}}{Z_{c1}}} chg; \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотренная модель позволяет оценить изменения синусоидального тока и напряжения в пределах участка трубопровода  $l_c = \sum_{k=1}^n l_k$  с учетом конкретных характеристик отдельных участков  $l_k$ : их длин, удельного сопротивления грунта, сопротивления заземления опор, высоты трубопровода над землей и т.д.

## Вывод

Предлагаемая модель, в форме цепи несимметричных четырехполюсников, для расчета распределений тока и напряжения по длине трубопровода и методы ее реализации позволяют получить указанное распределение с учетом всех влияющих факторов:

- длины участков трубопровода между опорами;
- величин сопротивлений заземления отдельных опор;
- изменение удельного сопротивления грунта по трассе трубопровода;
- изменений высоты опор по трассе.

Расчет изменений тока и напряжения на участке трубопровода между сильфонными компенсаторами  $\ell_c \sim 100$  м, показал, что в режиме электрической изоляции промежуточных опор ток и напряжение практически неизменны т.е. трубопровод аналогичен воздушной линии электропередачи.

## Библиографический список

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: учеб. для вузов. – Изд. 4-е, переработанное. – М., Энергия, 1975. – 752 с.
2. Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов; под общ. ред. К.М. Поливанова; в 3 т. Т. 2. – М., Энергия, 1972. – 200 с.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. – М., Энергия, 1970. – 592 с.

*Ю.В. Кандалов, асп.; рук. В.К. Слышалов, д.т.н., проф.*

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ТРУБОПРОВОДНОГО ТИПА

**Расчет продольных параметров.** Основной задачей исследования, является определение удельных значений активного сопротивления и индуктивности как функций частоты тока  $r_0(\omega)$ ,  $L_0(\omega)$  на основе расчета электромагнитного поля трубопровода в режиме протекания синусоидального тока.

Эту задачу решаем для общего случая, полагая, что трубопровод заполнен незаряженным несовершенным диэлектриком, поток которого не создает тока переноса [1], т.е., показанный на рис. 1 ток  $\dot{I}_z$  является током проводимости, обусловленным составляющей электрического поля  $E_{xz}$  и электрическими параметрами жидкости.

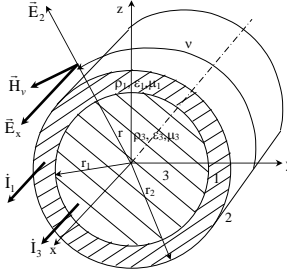


Рис. 1. Координатная система и основные характеристики трубопровода

В случае, когда трубопроводный объект является газопроводом, а  $\rho_3 \rightarrow \infty$  получаем следующие выражения для комплексного сопротивления трубопровода на единицу длины:

$$\begin{aligned} \lim_{\rho_3 \rightarrow \infty} \zeta &= -\frac{J_0'(k_1 r_1)}{H_0^{(1)'}(k_1 r_1)} = -\frac{J_1(k_1 r_1)}{H_1^{(1)'}(k_1 r_1)}; \\ \underline{z}_0 = r_0 + jx_0 &= \frac{k_1 \rho_1}{2\pi r_2} \cdot \frac{J_0(k_1 \rho_1) H_1^{(1)}(k_1 r_1) - H_0^{(1)}(k_1 r_2) J_1(k_1 r_1)}{J_1(k_1 \rho_2) H_1^{(1)}(k_1 r_1) - H_1'(k_1 r_2) J_1(k_1 r_1)} = \\ &= \frac{k_1 \rho_1}{2\pi r_2} \cdot \frac{J_0(k_1 r_2) - \frac{J_1(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_1)} H_0^{(1)}(k_1 r_2)}{J_1(k_1 r_2) - \frac{J_1(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_1)} H_1'(k_1 r_2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Дальнейшие преобразования (1) проведем следующим образом:

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{-j \frac{\omega \mu_{1a}}{\rho_1}} = \chi_1 \sqrt{-j} = \chi_1 e^{j \frac{3\pi}{4}}, \quad k_1 \rho_1 = \sqrt{\omega \mu_{1a} \rho_1} \cdot e^{j \frac{3\pi}{4}}, \quad \chi_1 = \sqrt{\frac{\omega \mu_{1a}}{\rho_1}}, \\ k_1 \rho_1 \chi_1 &= \sqrt{\omega \mu_{1a} \rho_1} \cdot e^{j \frac{3\pi}{4}} \cdot \sqrt{\frac{\omega \mu_{1a}}{\rho_1}} = j \omega \mu_{1a} e^{j \pi/4}. \end{aligned}$$

Учитывая, что входящие в (1) функции комплексного аргумента  $\chi_1 r_{1(r)} j \sqrt{j} = x_{1(2)} j \sqrt{j}$  являются функциями Кельвина [5], получаемое из (1) выражение для определения комплексного сопротивления трубы  $\underline{z}_0 = r_0(\omega) + jx_0(\omega) = r_0(\omega) + j\omega L_0(\omega)$ , имеет вид:

$$\underline{z}_0 = \frac{j\omega\mu_a}{2\pi r_2 \chi_1} \cdot \frac{(ber_0 H_1 r_2 + jbei_0 H_1 r_2) - T(her_0 H_1 r_2 + jhei_0 H_1 r_2)}{(ber'_0 H_1 r_2 + jbei'_0 H_1 r_2) - T(her'_0 H_1 r_2 + jhei'_0 H_1 r_2)}, \quad (2)$$

где

$$T = \frac{J_1(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_2)} = \frac{ber'_0 H_1 r_1 + jbei'_0 H_1 r_1}{her'_0 H_1 r_1 + jhei'_0 H_1 r_1}. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) без затруднений преобразуется в аналогичные формулы, содержащие в справочнике по расчету [6]. По этим формулам и таблицам [5] для трубы и стойки  $\varnothing 273 \times 6,0$  и стойки  $\varnothing 159 \times 4,5$  при частоте 50 Гц получены следующие значения комплексных сопротивлений:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{0mp} &= \sqrt{2} \cdot 1,632 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j45^\circ} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; r_{0mp} = 1,632 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; \\ L_{0mp} &= 0,52 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}; \underline{z}_{0cm} = \sqrt{2} \cdot 2,794 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j45^\circ} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; \\ r_{0cm} &= 2,794 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; L_{0cm} = 0,88 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}. \end{aligned}$$

Начальные точки характеристик  $r_0(\omega)$ ,  $x_0(\omega)$  для газовой трубы  $\varnothing 273 \times 6,0$  и стойки  $\varnothing 159 \times 4,5$  материал трубы и стойки – сталь:  $\rho_1 = 10^7$  ом·м,  $\mu_1 = 1000$  соответствуют сопротивлению  $r_0(0)$  и внутренней индуктивности  $L_0(\omega)$ , вычисляемым по формулам для постоянного тока:

$$\begin{aligned} r_0(0) &= \frac{\rho_1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} L_0(0) = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \left[ \frac{r_1^4}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2^2 - 3r_1^2}{4(r_2^2 - r_1^2)} \right]; \quad (4) \\ r_{0mp}(0) &= 19,795 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; L_{0mp}(0) = 2,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}; \\ r_{0cm}(0) &= 41,07 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ОМ}}{\text{М}}; L_{0cm}(0) = 4,17 \cdot 10^{-6} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}. \end{aligned}$$

Общий вид характеристик  $r_0(\omega)$  и  $x_0(\omega)$  приближенно соответствует аналитическим зависимостям:

$$r_0(\omega) = r_0(0) + k_2 \sqrt{\omega}; \quad x_0(\omega) = x_x \sqrt{\omega} \quad (5)$$

Следует заметить, что, как было установлено при решении задачи об электромагнитном поле и характеристик протяженного заземлителя, про-

ложенного в грунте параллельно поверхности раздела воздух-грунт [4], аналогичные зависимости имеют место и для составляющих волнового сопротивления этого заземлителя. Все сказанное относится и к параметрам стойки.

**Расчет поперечных параметров.** Этими параметрами являются распределения емкости трубопровода, суммарное активное сопротивление заземлителя и стойки плюс индуктивность последней, сказанное поясняет рис. 2.

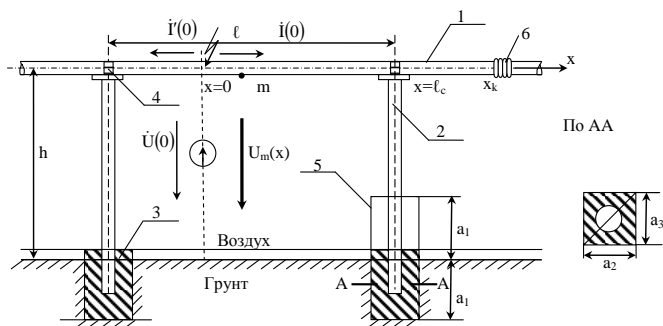


Рис. 2. Геометрические характеристики участка трубопровода: 1 – трубопровод  $\varnothing 273 \times 6,0$ ; 2 – стойка  $\varnothing 159 \times 4,5$ ; 3 – бетонный фундамент стойки (заземлитель); 4 – монтажный хомут; 6 – компенсатор, пунктирный контур; 5 иллюстрирует способ применения метода изображений при расчете сопротивления заземлителя

Относительно конструкции заземлителя необходимо заметить следующее: помимо основного конструктивно-механического назначения, он является элементом формирующим электрическое поле стойки как в бетоне, так и в грунте. Электрическое сопротивление реального грунта, точнее его верхнего слоя, в котором и работает заземлитель, находится в диапазоне  $100 < \rho_{\Gamma} < 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [7], удельное сопротивление бетона имеет порядок десятков Ом·м:  $\rho_{\text{Б}} \leq n10$  ( $n = 1, 2, \dots < 10$ ) Ом·м, поэтому при оценочном расчете сопротивления заземлителя  $r_z$ , допустимо принять  $\rho_{\text{Б}} \leq \rho_{\Gamma}$ , что эквивалентно замене бетонного параллелепипеда металлическим с последующим использованием в расчете данных справочника по расчету емкостей [8] и метода аналогий [9]. Расчет выполняем для  $\rho_{\Gamma} = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (слегка влажный песок при температуре выше  $0^{\circ} \text{C}$  [7]) и  $\rho_{\text{Б}} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; геометрические размеры стойки и ее фундамента (заземлитель):  $a_1 = 0,85 \text{ м}$ ,  $a_2 = a_3 = 0,25 \text{ м}$ , стойка  $\varnothing 159 \times 4,5$  (сталь).

Второй вариант оценочного расчета соответствует условию  $\rho_{\text{Б}} \approx \rho_{\text{с}}$ , реализующемуся на практике при прокладке трубопровода в болотистой местности, для грунтов которой имеем значения  $\rho_{\Gamma}$  в диапазоне  $10 - 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

(сильноувлажненный песок, суглинок, глина, торф) [7]. В этом случае допустимо рассматривать как заземлитель часть стойки, погруженную в грунт и закрепленную в нем с помощью бетонного фундамента с  $\rho_B \approx \rho_2$ .

Выполненные расчеты позволяют принять для слабоувлажненных грунтов с удельными сопротивлениями в диапазоне  $100 < \rho_T < 500$  Ом·м ориентировочное значение сопротивления заземления для промежуточной опоры трубопровода  $r_3 \approx 200$  Ом; для грунтов болотистых местностей ( $\rho_T \approx 50$  Ом·м) ориентировочное значение  $r_3 \approx 10$  Ом.

Для определения удельной емкости трубопровода относительно земли учтем, что  $\ell \gg h$ , и на этом основании воспользуемся для расчета формулой [9] справедливой для плоскопараллельного поля:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left[ \frac{h}{r_{2T}} + \sqrt{\left( \frac{h}{r_{2T}} \right)^2 - 1} \right]} \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_{2T}}}. \quad (6)$$

Расчет по ней дает при  $h = 2,5$  м,  $r_{2T} = 0,137$  м следующее значение  $C_0 = 15,44 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Максимальная напряженность в этом поле будет в точке  $m$  трубопровода. При напряжении на трубопроводе в этом сечении  $U_m$  ее значения находится по известной формуле [10]

$$E_m = \frac{U_m}{\ln \frac{2h}{r_T}} \left( \frac{1}{r_T - a} + \frac{1}{2h - r_T - a} \right), \quad (7)$$

где  $a = \sqrt{h^2 - r_T^2}$ .

Далее выполним расчет добавок к продольным параметрам полученным ранее  $r_0$ ,  $L_0$ . Они обусловлены влиянием «земли», т.е. соответствует воздействию поперечных к трубопроводу компонент электромагнитного поля. Согласно [2, 3] при учете «земли» во всех расчетах волновых процессов в протяженных объектах должны использоваться эффективные параметры:

$$\left. \begin{aligned} r_{0\rightarrow\phi} &= r_0 - \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \operatorname{Im} F_{11}, \\ L_{0\rightarrow\phi} &= L_0 + \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2h_1}{r_T} + \operatorname{Re} F_{11} \right), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где Im, Re, как это принято, обозначают операции вычисления мнимой и вещественных частей от функции  $F_{11}$ , которая является в данном случае собственным интегралом Карсона и учитывает влияние грунта [3]. Интегралы Карсона табулированы и даны в таблицах [11]. Аналитическое вычисление этих интегралов возможно при  $2h^* \ll 1$  и выполняется по формуле

$$F_{11} = \left( -0,0772 - \ln \frac{(2h^*)}{2} + \frac{2 \cos \psi}{3} (2h^*) \cos \nu \right) - j \left( \psi - \frac{2 \sin \psi}{3} (2h^*) \cos \nu \right), \quad (9)$$

где  $\psi = \arg \sqrt{j \frac{\omega \mu_0}{\rho_\Gamma}} = \frac{\pi}{4}$ ;  $\nu = 0$ ;  $h^* = h / \ell_{\text{баз}}$ ;  $\nu^* = \nu / \nu_{\text{баз}}$ ;  $\ell_{\text{баз}} = \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\omega \mu_0}}$ .

В разбираемой задаче, т.е. при  $\omega = 314$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и значениях  $\rho_{\Gamma 1} = 500$  Ом·м и  $\rho_{\Gamma 2} = 50$  Ом·м для  $F_{11}$  получаем значения  
 при  $\rho_\Gamma = 500$  Ом·м  $F_{11} = 4,544 - j0,7798$ ;  
 при  $\rho_\Gamma = 50$  Ом·м  $F_{11} = 3,0671 - j0,7647$ .

Соответствующие значения  $r_{0\text{эф}}$ , и  $L_{0\text{эф}}$  находим по формулам (8):  
 при  $\rho_\Gamma = 500$  Ом·м имеем

$$r_{0\text{эф}} = 2,1217 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}, \quad L_{0\text{эф}} = 2,148 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}};$$

при  $\rho_\Gamma = 50$  Ом·м имеем

$$r_{0\text{эф}} = 2,112 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}, \quad L_{0\text{эф}} = 1,853 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Таким образом, при учете поля в грунте получаем значения параметров превосходящие сопротивление и индуктивность трубы примерно на 25 %.

## Выводы

1. Параметры заземлителей трубопроводного типа наземной прокладки при синусоидальном токе во многом аналогичны таким же в воздушных линиях электропередачи. Однако имеются и существенные различия обусловленные следующими факторами:



- различие в материалах и конструкциях трубопроводов и проводов ВЛЭП, в силу чего существенно различаются их продольные параметры (индуктивности и активные сопротивления);

- близость трубопроводов к земле и, соответственно, увеличение емкости и влияние электромагнитных процессов в грунте на продольные параметры трубопровода.

Поэтому методика расчета электромагнитных параметров трубопроводов требует специальной, целенаправленной разработки, хотя и допускает включения в себя отдельных элементов методических разработок по расчету параметров ВЛЭП.

2. Некоторая неопределенность в задаваемых значениях удельного сопротивления грунта и бетонного фундамента не имеет решающего значения при расчете параметров предлагаемых моделей.

3. Влияние электромагнитного поля в грунте на вычисляемые значения продольных параметров ( $r_0$  и  $L_0$ ) трубопровода следует признать существенным и оценить  $\sim$  в 25 %.

#### Библиографический список

1. Слышалов В.К. Закономерности индукционного заряжения потоков технологических жидкостей // *Электромеханика. Известия ВУЗов.* – 1998. – № 6. – С. 8 – 14.
2. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.И. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
3. Модели волновых процессов в воздушных линиях 6 – 10 кВ для решения задачи определения места однофазного замыкания на землю / В.К. Слышалов [и др.] // *Вестник ИГЭУ.* – 2004. – Вып. 6. – С. 47 – 63.
4. Слышалов В.К., Киселева Ю.А. Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух – грунт // *Вестник ИГЭУ.* – 2005. – Вып. 1. – С. 57 – 62.
5. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф.Леш. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 стр.
6. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – 3-е изд. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 488 с.
7. Р.Н. Карякин. Заземляющие устройства электроустановок: справ. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1998. – 374 с.
8. Ю.Я. Иосель, Э.С. Коганов, М.Г. Струнский. Расчет электрической емкости. – 2-е изд. – Л.: Энергоиздат. Ленинград. отд-ние, 1981. – 288 с.
9. Теоретические основы электротехники. Т. II. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля; под ред. П.А. Ионкина: учеб. для электротехн. вузов. – М., Высшая школа, 1976. – 380 с.
10. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учеб. для студ. вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
11. Иерельман Л.С. Таблицы интегралов Карсона для использования в расчетах волновых процессов в линиях с учетом земли // *Известия НИИ постоянного тока.* – 1965. – № 11 – С. 342 – 360.

*Я.А. Беликова, студ.; рук. В.П. Голов, к.т.н., доцент,  
А.А. Мартиросян, к.т.н., ст. преподаватель*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ С ТРЕХФАЗНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЕМКОСТЬЮ УПК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для изучения вопросов анализа устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) (рис. 1) ранее была сформирована полная математическая модель, записанная в осях  $d-q$ , жестко связанных с ротором генератора, а вычислительные эксперименты проводились с использованием программного методического комплекса МИК-АЛ [1]. Однако полученные ранее результаты справедливы только для симметричных режимов. Для рассмотрения несимметричных режимов, а также для исследования влияния законов регулирования УПК на устойчивость ЭЭС в многомашинной системе возникла необходимость использования других средств моделирования.

Целью исследований являлось оценка возможности применения пакета Matlab (Simulink, SimPowerSystems) для моделирования электроэнергетических систем с регулируемым УПК. В качестве объекта моделирования рассматривалась схема электроэнергетической системы (рис. 1), состоящей из электростанции связанной линией электропередачи с мощной системой. Линия электропередачи имеет регулируемое УПК.

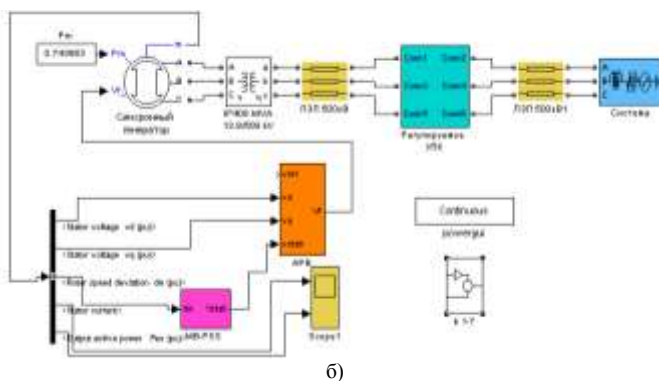
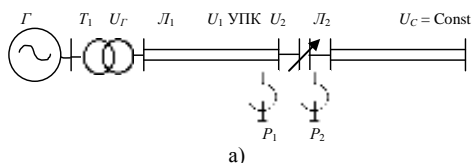


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система (а) и модель электроэнергетической системы (б)

Основной проблемой является моделирование регулируемого УПК зависимость сопротивления, которого представлена следующим выражением (1), такой компонент в пакете Matlab отсутствует.

$$X_{УПК} = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 \cdot I)}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток линии;  $K_1, K_2$  – коэффициенты, характеризующие зависимость  $X_{УПК}(I)$ , определение которых является первоочередной задачей при проведении расчетов. Предлагаемая модель регулируемой емкости представлена на рис. 2.

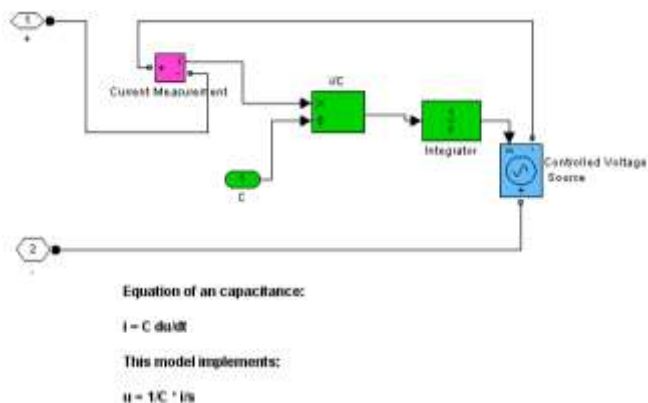


Рис. 2. Модель регулируемой емкости

Результаты расчета установившихся режимов сравнивались с результатами математического моделирования средствами других программных пакетов (МИК, программы расчета установившихся режимов). Сравнение результатов подтвердило и достоверность модели созданного средствами пакета Matlab и возможность использования ее для исследования устойчивости ЭЭС с регулируемым УПК при несимметричных режимах, а также для исследования влияния законов регулирования УПК на устойчивость ЭЭС в многомашинной системе.

#### Библиографический список

1. Голов В.П., Мартиросян А.А. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 5.
2. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink / И.В. Черных. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru>.

*Д.А. Полкошников, асп.; рук. В.К. Слышалов, д.т.н., проф.*

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНА ОДНОЖИЛЬНОГО СИЛОВОГО КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ КАБЕЛЯ

Существует несколько способов заземления металлических экранов однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Выделяют три основных способа заземления:

- заземление с одной стороны (рис. 1);
- заземление с двух сторон (рис. 2);
- заземление с транспозицией экранов (рис. 3).

При этом заземление может быть глухим и резистивным.

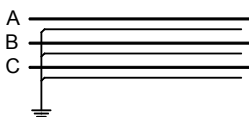


Рис. 1. Заземление экрана кабеля с одной стороны

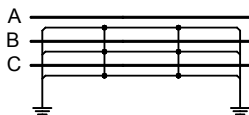


Рис. 2. Заземление экрана кабеля с двух сторон

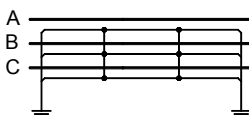


Рис. 3. Заземление экрана кабеля с применением транспозиции

В [1] говорится, что способ заземления экрана кабеля влияет на

- величину тока в экране в нормальных и аварийных режимах и при неправильном заземлении экрана может привести к повреждению кабеля;

- электрические потери в экране кабеля, а значит, на его тепловой режим и пропускную способность;

- величину напряжения на экране в нормальных и аварийных режимах (при его разземлении), т.е. на надежность работы кабеля и безопасность его обслуживания;

- основные электрические параметры кабеля (активное и индуктивное сопротивление).

На данный момент выделяют еще один способ заземления жил кабеля. Он заключается в соединении экранов кабеля всех трех жил между собой на каждой строительной длине кабеля с использованием специальных муфт (рис. 4). Это приводит к образованию параллельных ветвей и растеканию токов КЗ через экраны жил не затронутых повреждением, что снижает термическую нагрузку экрана замкнутого на жилу.

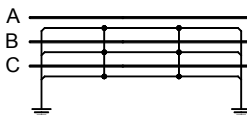


Рис. 4. Заземление экрана кабеля с объединением экранов на каждой строительной длине

Изначально данный вид кабелей конструировался для работы именно с резистивным заземлением металлического экрана, однако такой вид заземления не распространен в нашей стране. В инструкции к кабелям [2] не уточняется, какой именно тип заземления (глухое или резистивное) должен применяться.

Таким образом, расчет электрического и теплового поля кабеля необходимо вести с учетом используемого способа заземления металлических экранов.

#### Библиографический список

1. **Дмитриев М.В.**, Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6 – 500 кВ. Расчет заземления экранов // *Новости электротехники*.
2. **Инструкция** по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ. – RUKAB/ID 23-2-019 (ABB Москабель).

*П.А. Кулыгин, студ.; рук. М.И. Соколов, к.т.н., доцент*

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АДАПТАЦИИ DOS-ПРОГРАММ ПОД СОВРЕМЕННЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

В ходе первой стадии работы был разработан метод для устранения типовых проблем, возникающих при эксплуатации некоторых устаревших программных комплексов (DOS-программ), активно используемых в учебном процессе (SSS, RRS, MUSTANG, Мик-Ал) и делающих невозможным полноценное использование данных программ на большинстве современных персональных компьютеров [1]. Однако, ручная адап-

тация всех используемых на кафедре DOS-программ в рамках данной работы представляется неосуществимой задачей, попытка алгоритмизации и распространения метода также успеха не принесла, кроме того, в ходе использования в учебном процессе, адаптация программ неоднократно нарушалась (чаще всего ввиду неосторожных действий пользователей).

Поэтому нами разработан алгоритм и на его основе создан программный продукт для возможно более полной автоматизации разработанного метода адаптации. Этот продукт позволяет любому пользователю, даже совершенно не имеющему специальных знаний, очень легко адаптировать абсолютно любую, требующуюся ему для работы, DOS-программу, сделав возможным ее запуск и полноценную работу с ней на большинстве современных ПК. При этом, одним из наиболее значительных требований являлась крайняя простота работы с таким адаптатором (автоматизация всех действий, не требующих каких-либо специальных знаний и навыков работы с ПК, наличие интуитивно понятного – однонопочного – интерфейса и т.п.), а также дружелюбность пользовательского интерфейса, мощность, универсальность, надежность, безопасность и легальность продукта.

Нами был разработан алгоритм данного программного продукта, приведенный в упрощенном виде на рис. 1.

Разработанный алгоритм имеет блочную структуру, что открывает большие возможности для перспективной доработки и увеличения возможностей разрабатываемого продукта. Все блоки объединены в едином инсталляторе, написанном на C++ и откомпилированном в IDE MVC++ 2005 с использованием только типовых конструкций. Везде, где это возможно технически, команды адаптации реализуются не на этапе исполнения программного продукта, а на этапе запуска адаптированной программы (то есть представляются в создаваемом bat-файле в виде стандартных команд). Такое решение несколько уменьшает скорость запуска адаптированной программы, но зато делает алгоритм работы более наглядным и открытым.

На настоящий момент разработанный программный продукт может автоматически адаптировать указанную пользователем DOS-программу, автоматически применяя необходимые настройки и автоматически создавая bat-файл, а на выходе создавать на рабочем столе ярлык для запуска уже адаптированной конечной DOS-программы. Также продукт способен отменить теоретически возможную «неудачную» адаптацию и вернуть все настройки запуска к первоначальному виду.

Разработанный программный продукт удовлетворяет всем поставленным требованиям. Алгоритм и его техническая реализация имеют следующие основные преимущества:

1. Предельная простота для конечного пользователя (достаточно лишь в стандартном современном интерфейсе выбрать адаптированную программу и нажать кнопку, причем пользователь может не знать, где находится адаптированная программа – достаточно указания ее ярлыка).

2. Практически абсолютная безопасность для ОС (в ходе работы продукта не изменяется глобально ни один внешний системный или программный файл и ни одна настройка).

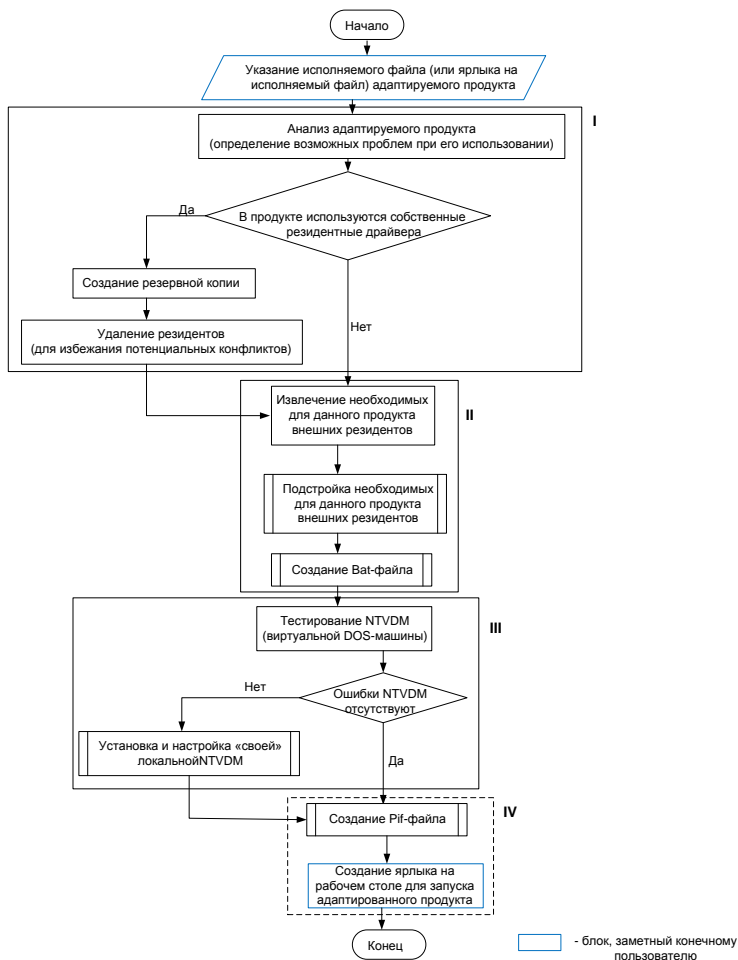


Рис. 1. Автоматизация метода переноса

3. Универсальность – автоматическое устранение большинства типовых и ряда специализированных проблем совместимости для любой используемой DOS-программы, при этом от конечного пользователя не требуется никаких дополнительных настроек.

4. Широкая переносимость, т. е. разработанный продукт использует только стандартные функции и алгоритмы, а поэтому без проблем работает на любой ОС линейки Win2000; привязка к системным файлам и внутренней структуре ОС отсутствует.

5. Возможность сравнительно легкого совершенствования разработанного продукта (увеличения его «мощности» путем добавления новых возможностей, а благодаря модульному алгоритму можно сравнительно легко и быстро включить в «адаптатор» средства для решения пока еще не рассмотренных проблем совместимости).

Таким образом, разработанный программный продукт для автоматизированной адаптации позволяет даже абсолютно неподготовленному пользователю, с весьма высокой долей вероятности адаптировать любую требующуюся ему DOS-программу для работы на современном компьютере с любой ОС Windows старше Windows 2000. Дальнейшее совершенствование разработанного продукта, если и требуется, то предполагает собой лишь сравнительно простое наращивание его «мощности», то есть увеличения числа специализированных проблем совместимости, распознаваемых и решаемых «адаптатором».

#### **Библиографический список**

1. **Кулыгин П.А.**, Соколов М.И. Адаптация программных комплексов МИК-АЛ, SSS, Mustang для современных операционных систем // Электроэнергетика: мат-лы региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009.

*И.А. Москвин, асп.; рук. В.К. Слышалов, д.т.н., проф.*

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМАШИННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОСТЕЙШЕМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ**

Если возникает необходимость рассмотреть крупную и сложную энергосистему с большим количеством машин, линий и нагрузок и проанализировать ее реакцию на какое-либо возмущение, то на первый взгляд такая попытка может оказаться безнадежной. Однако постоянные времени протекания различных процессов могут быть существенно раз-



личными, что позволяет выделить определенные элементы, в наибольшей степени влияющие на эти процессы. В математическую модель электроэнергетической системы (ЭЭС) должны быть включены те элементы, которыми определяется ускорение (или торможение) роторов синхронных машин. Сложность модели зависит от вида переходного процесса и исследуемой системы. Вообще говоря, в модели должны найти отражение параметры элементов системы, которые влияют на электрические и механические моменты машин, а именно:

- параметры электрической сети до переходного процесса, в процессе и после него;
- нагрузки и их характеристики;
- параметры синхронных машин;
- параметры систем возбуждения синхронных машин;
- параметры турбин и их автоматических регуляторов частоты вращения;
- параметры других важных элементов электростанций, влияющих на величину механического момента турбины;
- параметры других дополнительных систем регулирования, таких, как, например, регуляторы перетока по межсистемным связям, необходимые при математическом описании системы.

Таким образом, для исследования устойчивости энергосистемы необходимо знать начальные условия до возникновения переходного процесса и иметь математическое описание основных ее элементов, определяющих реакцию синхронных машин на возникшее возмущение. Число элементов, учитываемых при анализе устойчивости, и сложность их математического описания зависят от многих факторов. Однако, как правило, для описания различных элементов используются дифференциальные уравнения. Методы исследования устойчивости энергосистемы зависят от вида этих дифференциальных уравнений.

**Исходный установившийся режим.** Составляется схема замещения ЭЭС с представлением синхронных генераторов переходными параметрами ( $E'$ ,  $X'_d$ ), а нагрузок – постоянными сопротивлениями  $\underline{Z}_y$ . Все параметры определяются в относительных единицах при базисной мощности выбранной произвольно. В частности для нагрузок:

$$\underline{Z}_y = \frac{P_n \cdot U_n^2}{P_n^2 + Q_n^2} + j \cdot \frac{Q_n \cdot U_n^2}{P_n^2 + Q_n^2}, \quad (1),$$

где все величины в о.е.

Режим схемы ЭЭС (рис. 1) определяется величинами ЭДС генераторов и углами этих ЭДС.

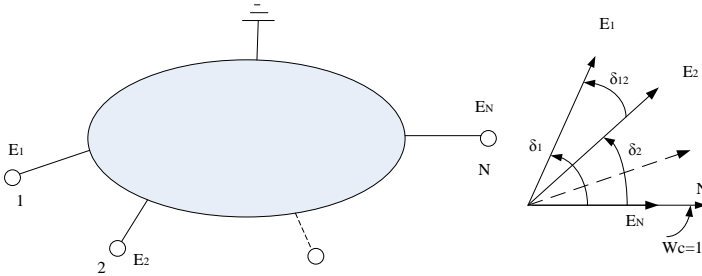


Рис. 1. Схема замещения ЭЭС с  $N$  генераторами

Можно подобрать значения  $E_i$ ,  $\delta_i$  для всех генераторов, чтобы получить заданные напряжения на шинах генераторов и их мощности. При этом угол ЭДС для одного из генераторов ( $N$ ) принять  $\delta_N = 0$  и считать  $E_N$  осью отсчета других углов. В силу электромагнитной инерции переходных ЭДС и механической инерции роторов машин, полученные в результате расчета установившегося режима  $E_{i0}$ ,  $\delta_{i0}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) можно взять в качестве начальных значений, которые не изменяются скачками при переходном процессе. Необходимы также исходные значения мощностей генераторов  $P_{i0}$ .

**Расчет собственных и взаимных проводимостей схемы замещения ЭЭС.** Относительно узлов с ЭДС необходимо получить собственные и взаимные проводимости  $y_{ij}$  с их дополнительными углами  $\alpha_{ij}$ . Эти числа будут исходными данными при расчете переходного режима. Узловые проводимости необходимо иметь для каждого схемного состояния ЭЭС, например, для исходного нормального режима, аварийного, послеаварийного. Количество расчетов можно сократить за счет свойства взаимности  $y_{ij} = y_{ji}$ ,  $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$ . Необходимо обратить внимание на то, что при расчете собственной проводимости  $y_{ii}$ ,  $\alpha_{ii}$  ветвь, связанная с узлом  $i$ , должна иметь положительное направление от узла  $i$  в схему. При расчете взаимной проводимости  $y_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  ветвь, связанная с узлом  $j$ , должна иметь положительное направление из схемы к узлу  $j$ , а ветвь, связанная с узлом  $i$ , должна иметь положительное направление от узла  $i$  в схему.

**Переходный режим.** Для каждого  $i$ -го генератора ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) следует определить постоянную инерции агрегата  $T_{J(\delta)i}$  в секундах и коэффициент демпфирования  $D_{(\delta)i}$  в о.е., приведенные к общей базисной мощности:

$$T_{J(\delta)i} = T_{J(n)i} \cdot \frac{S_{ni}}{S_6}, \quad (2)$$

$$D_{(\delta)i} = D_{(n)i} \cdot \frac{S_{ni}}{S_{\bar{\delta}}}, \quad (3)$$

где  $S_{ni}$ ,  $S_{\bar{\delta}}$  – номинальная и базисная мощности;  $T_{J(\delta)i}$ ,  $D_{(\delta)i}$  – величины, приведенные к номинальной мощности агрегата (обычно известные).

Угловые скорости роторов  $\omega_i$  будем выражать в о.е. Эти же скорости будут иметь и векторы ЭДС  $E_i$ . Наряду с этими векторами (рис. 1) введем синхронно вращающуюся ось  $N$ , которая исходно будет совпадать с векторами одной из ЭДС, например  $E_N$ . Однако в переходном процессе  $E_N$  будет идти со своей скоростью  $\omega_N$ , а ось  $N$  с неизменной синхронной скоростью  $\omega_c = 1$ . Поэтому эти векторы разойдутся.

Итак, задаем  $\omega_c = 1$  и записываем систему уравнений переходного режима для каждого  $i$ -го генератора.

$$\begin{cases} \frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{T_{J(\delta)i}} \cdot \left[ \frac{P_{Ti}}{\omega_i} - \frac{P_i}{\omega_i} - D_{(\delta)i} \cdot S_i \right], & (4) \\ \frac{d\delta_i}{dt} = 360 \cdot f_n \cdot S_i. & (5) \end{cases}$$

Это уравнения движения ротора, где  $S_i$  – скольжение, о.е.;  $T_{J(\delta)i}$  – постоянная инерции, с;  $P_{Ti}$  – мощность турбины, о.е.;  $P_i$  – электромагнитная мощность, о.е.;  $D_{(\delta)i}$  – коэффициент демпфирования, о.е.;  $\omega_i$  – угловая скорость ротора, о.е.;  $\delta_i$  – угол положения ротора и ЭДС, эл. град.;  $t$  – время, с;  $f_n$  – номинальная частота, соответствующая синхронной скорости, Гц.

Начальные значения переменных  $S_{i0} = 0$ ,  $\delta_{i0}$  для решения берутся из исходного установившегося режима ЭЭС. Угловая скорость ротора определяется как:

$$\omega_i = S_i + \omega_c, \quad (6)$$

Регулятор скорости турбины в простейшем представлении можно описать уравнениями:

$$\begin{cases} P_{Ti} = P_{T0i} + \square P_{Ti}, & (7) \\ \frac{d\square P_{Ti}}{dt} = \frac{1}{T_{pci}} \cdot \left[ -\frac{1}{\sigma} \cdot S_i - \square P_{Ti} \right], & (8) \end{cases}$$

где  $T_{pci}$  – постоянная времени регулятора, с;  $\sigma$  – статизм регулирования, о.е.;  $P_{T0i}$  – начальное значение мощности турбины, определяется из исходного режима  $P_{T0i} = P_{0i}$ , о.е.

Дифференциальное уравнение решается при нулевом начальном значении переменной  $\Delta P_{T0i} = 0$ . Электромагнитная мощность определяется угловыми характеристиками:

$$P_i = E_i^2 \cdot y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq i}}^N E_i \cdot E_S \cdot y_{is} \cdot \sin(\delta_{iS} - \alpha_{iS}), \quad (9)$$

где все углы выражены в градусах, а все остальные величины – в о.е. При этом

$$\delta_{iS} = \delta_i - \delta_S, \quad (10)$$

а ЭДС  $E_i = \omega_i \cdot E_{i0}$ ,  $E_S = \omega_S \cdot E_{S0}$ , (11) вычисляются по параметрам исходного режима  $E_{i0}$ ,  $E_{S0}$ .

Таким образом, имеем восемь переменных  $S_i$ ,  $P_{Ti}$ ,  $P_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_{iS}$ ,  $\Delta P_{Ti}$ ,  $E_i$  и восемь уравнений: (4) – (11). Об устойчивости можно судить по характеру кривых  $\delta_{iS}(t)$  ( $\delta_{iS} < 360^\circ$  – сохранение динамической устойчивости).

#### Библиографический список

1. **Братолобов А.А.**, Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е. Применение ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем: Учебное пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 108 с.
2. **Братолобов А.А.** Расчетные параметры синхронных машин. – Иваново, 2008. – 116 с.
3. **Андерсон П.**, Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость: пер. с англ.; под общ. ред. Я.Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.

*М.В. Гаврилова, студ.; М.В. Макарина, к.т.н., доцент*

### УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В условиях эксплуатации должен осуществляться систематический контроль показателей качества электрической энергии (ПКЭЭ) и приниматься меры по приведению параметров к допустимым нормам в соответствии с ГОСТ 13109-97 [1].

Решение проблемы качества электроэнергии должно заключаться в создании системы управления качеством электроэнергии. Система постоянного мониторинга показателей качества электроэнергии показана на диаграмме рис. 1 [3].

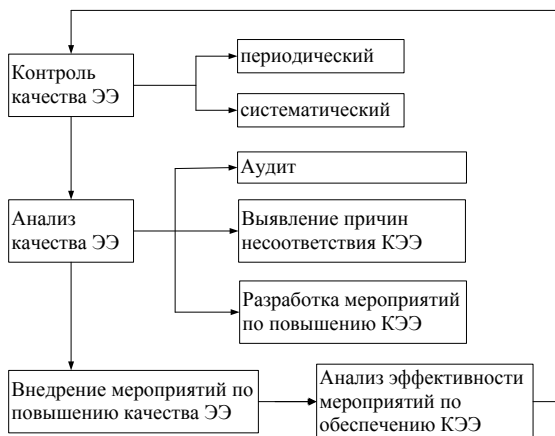


Рис. 1. Управление качеством электроэнергии

Внедрение системы постоянного мониторинга показателей качества электроэнергии является актуальной задачей по пути реализации сертификации КЭЭ. Проведен анализ существующих средств контроля качества электроэнергии.

Основные стационарные приборы:

- измеритель-анализатор ПКЭЭ Энергомонитор 3.2 (производство ООО «НПП Марс-Энерго»);
- прибор контроля показателей КЭЭ «Прорыв – КЭ» (ООО НПП «Прорыв-Инженеринг»);
- приборы и системы непрерывного контроля качества ЭЭ, «Ресурс ПКЭ» (НПП «Электротехника»);
- регистратор показателей качества электрической энергии «Парма РК3.01» (ООО «Парма»);
- многофункциональный счетчик электроэнергии серии Enculon КНЮМ.056 (ЗАО «ИТЦ «Континуум+»);
- анализаторы качества электроэнергии ППКЭ-1-150М («Энергоаудит-2000»).

Переносные приборы:

- анализаторы КЭЭ типа АКЭ-823 и АКЭ-824 (ЗАО «Прист»);
- анализаторы КЭЭ AR/5, AR5-L (CIRCUTOR, поставщик ООО «Вымпел»);
- анализаторы качества ЭЭ типа MI2392, MI2130, MI2292, MI2192 (фирма METREL);
- энергомонитор 3.3Т (ООО «НПП Марс-Энерго»);

- портативные анализаторы КЭЭ ANALYST 3Q (поставщик ООО НПФ «Универсал прибор», Россия);
- регистратор показателей качества ЭЭ «РК1.01» (ООО «Парма») – для проверки КЭЭ в многоквартирных домах;
- «ЭРИС-КЭ.05» (Микро) (ООО «НПФ «Энергоконтроль», МЭИ).

Современные средства измерения (СИ), представленные на отечественном рынке позволяют решать широкий круг задач, связанных с контролем и управлением качества ЭЭ в электрических сетях общего назначения. При этом все средства измерения можно объединить по функциональным возможностям в пять групп.

**К первой группе** относятся СИ, позволяющие контролировать КЭЭ в электрической сети 380/220 В отдельно в каждой фазе. К таким приборам можно отнести следующие приборы: «Парма РК 1.01», «ЭРИС-КЭ.05» (Микро). Наиболее востребованы СИ такого типа специалистами, обслуживающими системы вычислительной техники, а также бытовые потребители. Данные приборы могут быть использованы в качестве доказательной базы при разрешении конфликтов между энергосбытовыми организациями и потребителями, связанных с последствиями использования ЭЭ, не соответствующей требованиям [1]; при корректировке расчетов оплаты электроэнергии для бытовых потребителей; для мониторинга проблем с электроснабжением в отдельно взятой квартире; при внутренних проверках и выяснении виновника ухудшения качества электроэнергии в многоквартирных домах.

**Ко второй группе** относятся СИ, позволяющие контролировать КЭЭ непосредственно в электрической сети до 1 кВ и выше 1 кВ (с использованием трансформаторов напряжения). К этой группе можно отнести следующие приборы: «Парма РК3.01», ППКЭ 1-50 М, «Прорыв КЭ», «Ресурс ПКЭ». Большинство из приведенных СИ обеспечивают работу в составе АИИСКУЭ.

**К третьей группе** относятся приборы, позволяющие не только контролировать все параметры в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97, но и регистрировать дополнительные характеристики по току и мощности. В эту группу входят следующие приборы: Ресурс-UF2, ЭРИС-КЭ-02, «Энергомонитор 3.3Т». Данные приборы являются универсальными и позволяют проводить диагностический контроль предприятий производителей и потребителей электрической энергии, который необходим для анализа причин ухудшения качества ЭЭ.

**В четвертую группу** можно выделить СИ, позволяющие организовать коммерческий контроль. В результате такого контроля, если установлено в договоре электроснабжения, оценивается стоимость электро-

энергии с учетом неустойки за ее качество. К СИ такого типа относится прибор «ЭРИС-КЭ.06».

**К пятой группе** относятся специальные СИ, позволяющие проводить синхронные измерения токов и напряжений в различных точках электрической сети. К таким приборам можно отнести: «Нева ИПЭ», «Омск-М». Данные приборы представляют собой многоканальные портативные осциллографы-регистраторы, предназначенные для служб эксплуатации энергообъектов и научно-исследовательских организаций.

Представленная классификация СИ позволяет сделать следующие выводы:

- отечественная промышленность активно выпускает средства контроля, позволяющие организовать любые виды контроля КЭЭ;
- предлагаемые СИ позволяют вести как периодический, так и непрерывный контроль КЭЭ;
- дальнейшее развитие СИ должно быть направлено на создание систем, позволяющих организовать непрерывный мониторинг качества электроэнергии в электрических сетях, тем самым подготовить базу для управления качеством электроэнергии.

#### **Библиографический список**

1. **ГОСТ 13109-97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
2. **Кирева Э.А.** Установка современных анализаторов качества электрической энергии повысит надежность и экономичность систем электроснабжения // Энергоэксперт. – 2009. – № 3, № 4.
3. **За качество ответите!** // Энергоэксперт. – 2008. – № 4.
4. **Карташев И.И., Тульский В.М.** Современные средства контроля качества электроэнергии и опыт их практического применения // Энергоэксперт. – 2008. – № 4.

*А.Н. Вермаховский, Д.С. Бекасов, студенты;  
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доцент*

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

В настоящее время большинство текстильных предприятий Ивановской области работают на морально и физически устаревшем оборудовании выпуска начала 80-х годов прошлого столетия [1]. Объем выпускаемой текстильными предприятиями продукции и ее ассортимент зависят от поставок сырья и спроса на рынках сбыта. Частая смена ассортимента вызывает изменение параметров заправки технологического оборудова-

ния и его электропотребления. В ряде случаев оборудование работает в режимах не соответствующих паспортным данным. Все это ведет к нерациональному потреблению электрической энергии. Для повышения эффективности использования электрической энергии необходимо проводить работу по электросбережению. Электросбережение на текстильных предприятиях будет реальным только при правильно организованной работе по экономии электроэнергии. Основные этапы работы по электросбережению на текстильных предприятиях приведены на рис. 1.



Рис. 1. Основные этапы работы по электросбережению на текстильных предприятиях

Для правильной оценки потребления электрической энергии на текстильных предприятиях необходимо определять нормы, величина которых зависит не только от параметров заправки и ассортимента продукции, но и от технического состояния оборудования. Основные методы нормирования электропотребления на текстильных предприятиях приведены на рис. 2.

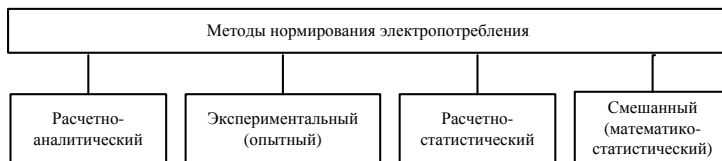


Рис. 2. Основные методы нормирования электропотребления на текстильных предприятиях

С использованием норм электропотребления рассчитываются нормализованные электробалансы дифференцированные по структурным подразделениям и статьям расхода электрической энергии текстильного предприятия (рис. 3, 4).

Составление фактических электробалансов дифференцированных по структурным подразделениям и статьям расхода электрической энергии для текстильного предприятия возможно только при наличии отлаженной



системы учета электроэнергии. Такая система учета электроэнергии должна соответствовать следующим требованиям.

1. Достаточность (оснащенность измерительными комплексами).
2. Достоверность (точность) измерительных комплексов.
3. Оперативность учета электрической энергии.

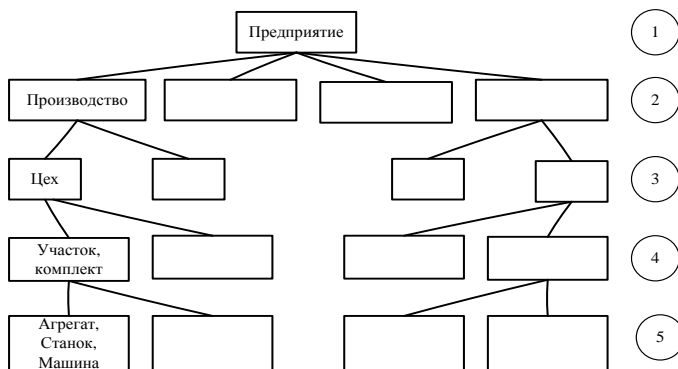


Рис. 3. Электрический баланс, дифференцированный по структурным подразделениям текстильного предприятия: 1 – баланс предприятия; 2 – общепроизводственный баланс; 3 – цеховой баланс; 4 – баланс по статьям расхода ЭЭ; 5 – индивидуальный баланс

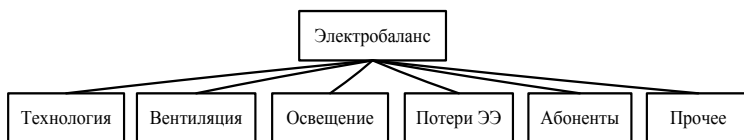


Рис. 4. Электрические балансы структурных подразделений текстильных предприятий, дифференцированные по статьям расхода электроэнергии

Сравнение нормализованных электробалансов с фактическими позволяет определить участки с повышенным расходом электроэнергии. Для этих участков проводится оперативный контроль электропотребления. В процессе проведения оперативного контроля выясняются причины перерасхода электрической энергии по структурным подразделениям, устанавливается электрооборудование, имеющее электропотребление выше установленного среднего значения. Оперативным контролем одновременно выявляется также электрооборудование, имеющее энергопотребление ниже среднего электропотребления. Для этого электрооборудования выявляются факторы, обеспечивающие более экономичную работу оборудования с целью последующего распространения положительного опыта работы на другие агрегаты, станки и машины.

Результаты оперативного контроля электропотребления используются для разработки мероприятий по электросбережению. Основные мероприятия по электросбережению на текстильных предприятиях приведены на рис. 5.



Рис. 4. Мероприятия по электросбережению

На основе показателей электропотребления, полученных в процессе проведения оперативного контроля, учитывая эффективность проведенных мероприятий по электросбережению, устанавливаются новые прогрессивные нормы расхода электрической энергии, снова осуществляется контроль за выполнением этих норм и приведенные на рис. 1. этапы работы по электросбережению повторяются.

#### Библиографический список

1. **О стратегии** развития Ивановской области до 2010 года. Распоряжение от 8 августа 2002 года № 982-р. – Иваново.
2. **Гофман И.В.** Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий. – М.:Л., Энергия, 1966.
3. **Сальников А.Х., Шевченко Л.А.** Нормирование потребления и экономия топливно-энергетических ресурсов. – М: Энергоатомиздат, 1986.
4. **Воскобойников Д.М.** Экономическое стимулирование рационального использования электроэнергии в промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1988
5. **В.К. Олейников, Г.В. Никифоров.** Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях. – Магнитогорск: МГТУ, 1999.
6. **Организация** и планирование энергохозяйства промышленных предприятий / В.Т. Мелехин, Г.Л. Багиев, В.А. Полянский. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

7. **Гуртовцев А.Л.** Комплексная автоматизация учета и контроля электроэнергии и энергоносителей на промышленных предприятиях и их хозяйственных объектах // Промышленная энергетика. – 2000. – № 9.

8. **Иванов А.М.,** Лебедев А.М. Рациональное использование электроэнергии на предприятиях легкой промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1972.

9. **Шмелев А.Н.,** Шишло К.С. Электрооборудование текстильных предприятий. – М., Легкая индустрия, 1968.

10. **Красник В.В.** Повышение эффективности работы электрооборудования на предприятиях текстильной промышленности. – М.: Легпромбытиздат, 1985.

*Е.В. Макарова, А.А. Паунина, студенты;  
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доцент*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ВВОДАХ РАЗЛИЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Среди многочисленных факторов, оказывающих влияние на эффективность работы системы электроснабжения (СЭС), одно из приоритетных мест занимает вопрос компенсации реактивной мощности (КРМ).

Реактивную мощность потребляют такие элементы питающей сети как трансформаторы электростанций; главные понизительные электростанции, линии электропередач – на это приходится 42 % реактивной мощности генератора, из них 22 % на повышающие трансформаторы; 6,5 % на линии электропередач районной системы; 12,5 % на понижающие трансформаторы [1, 2]. Основными потребителями реактивной мощности являются:

- асинхронные электродвигатели, которые потребляют 40 % всей мощности совместно с бытовыми и собственными нуждами;
- электрические печи 8 %;
- преобразователи 10 %;
- трансформаторы всех ступеней трансформации 35 %;
- линии электропередач 7 %.

Реактивная мощность дополнительно загружает высоковольтные линии и трансформаторы, приводит к увеличению потерь активной и реактивной мощности в электрической сети, влияет на уровень напряжения у потребителей.

Сегодня, когда строительство новых генерирующих мощностей очень дорого и невозможно в короткий срок, актуальным становится максимальное использование действующих линий и трансформаторов СЭС, повышая их пропускную способность за счет применения различных устройств КРМ. Согласно теории эти установки необходимо размещать непосредственно у потребителей электрической энергии. Однако

размещение установок компенсации реактивной мощности непосредственно у потребителей электрической энергии должно быть экономически обосновано [3, 4, 5].

Экономический эффект от установки компенсирующих устройств достигается за счет уменьшения величины потерь электрической энергии в СЭС питающей потребителя. Величина экономического эффекта от установки компенсирующих устройств в денежном выражении зависит от стоимости электрической энергии, величины сэкономленной электрической энергии и величины затрат на приобретение, монтаж, наладку и эксплуатацию устройств КРМ.

Потери электрической энергии в СЭС питающей потребителя зависят как от параметров СЭС (сечений линий и их длин, мощностей трансформаторов и их параметров, параметров устройств КРМ) так и режимных параметров (уровней напряжений у потребителей, мощностей нагрузок, статических характеристик потребителей и устройства КРМ, графиков активной и реактивной мощности, времени работы устройств КРМ) [6].

Таким образом, КРМ у потребителей электрической энергии позволяет:

- разгрузить питающие линии, силовые трансформаторы и распределительные устройства;

- улучшить качество электроэнергии в электрической сети до нормативных значений и увеличить срок службы электрооборудования;

- подключить дополнительную активную нагрузку без увеличения мощности силовых трансформаторов и без увеличения сечений линий питающей сети;

- уменьшить потери электроэнергии и снизить расходы на оплату электроэнергии и общие затраты на энергопотребление.

Однако, как показывают расчеты, размещение установок КРМ непосредственно на вводах различных потребителей электрической энергии (например, жилых зданий) в ряде случаев экономически нецелесообразно. Это объясняется небольшим потреблением реактивной мощности, крайне малыми потерями электроэнергии из-за низкой загрузки элементов СЭС и небольшой протяженности и высокой стоимостью устройств КРМ.

#### Библиографический список

1. **Иванов В.С.**, Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. **Овчинников А.** Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4 – 6 (10) кВ // *Новости Электротехники.* – 2003. – № 1(19).
3. **Паули В.К.**, Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // *Энергоэксперт.* – 2007. – № 2.
4. **Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности / В. Овсейчук [и др.]** // *Новости Электротехники.* – 2008. – № 4 (52).

5. **Шишкин С.А.** Использование конденсаторов для компенсации реактивной мощности коммунально-бытовых нагрузок // Электрик. – 2007. – № 6.

6. **Железко Ю.С.**, Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: НЦ ЭНАС, 2006.

*М.В. Тимофеева, студ.; рук. О.А. Бушуева, к.т.н., проф.*

## **ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ФИЛИАЛЕ ОАО «МРСК ЦЕНТРА» – «ЯРЭНЕРГО»**

Широкое внедрение современных типов оборудования, чувствительных к снижению качества электрической энергии, выдвигает на первый план необходимость контроля и обеспечения ее качества. Пониженное качество электрической энергии оказывает негативное влияние как на работу отдельных электроприемников, так и на нормальное функционирование энергосистемы в целом.

В ОАО «МРСК Центра» задача обеспечения качества является составляющей миссии компании. Филиал ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнерго» обеспечивает электроснабжением народнохозяйственный комплекс области с территорией площадью 35,5 тыс. кв. км и населением более 1315 тыс. В качестве основной сети определены сети напряжением 35 – 110 кВ, а также сети напряжением 0,4; 6 – 10; 220 кВ. Ярославская энергосистема граничит с Тверьэнерго, Мосэнерго, Владимирэнерго, Ивэнерго, Костромаэнерго, Вологдаэнерго.

В филиале ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнерго» контроль показателей качества электроэнергии осуществляют служба РЭС, служба измерений, метрологии и качества электроэнергии. К выполнению измерений могут быть допущены лица, имеющие квалификацию не ниже третьей группы (в установленных случаях четвертой) по электробезопасности и должны быть аттестованы на право проведения контроля показателей качества электроэнергии в установленном порядке.

Энергоснабжающая организация должна проводить периодический контроль качества поставляемой потребителями электрической энергии. Потребитель обязан проводить периодический контроль качества по тем показателям, источником ухудшения которых он является в точках собственных сетей, ближайших к точкам общего присоединения к электрической сети общего назначения. В [1] определены методы измерения показателей качества электроэнергии, продолжительность и периодичность контроля, формы предоставления данных.

При периодическом контроле качества электрической энергии рекомендуется, чтобы общая продолжительность непрерывного контроля составляла 7 суток. При этом периодичность измерений:

- для установившегося отклонения напряжения – не реже двух раз в год в зависимости от сезонного изменения нагрузок в распределительной сети;
- для остальных показателей качества – не реже одного раза в 2 года при неизменности схемы сети и ее элементов и незначительном изменении характера электрических нагрузок потребителя, ухудшающего качество электрической энергии.

Контрольными точками диагностических измерений являются шины районных подстанций, к которым подключены кабельные линии потребителей. Эти точки представляют интерес для контроля правильности работы устройств РПН трансформаторов, для сбора статистики и фиксации провалов напряжения и временных перенапряжений в электрической сети. Тем самым контролируется работа уже существующих средств обеспечения качества электрической энергии: синхронных компенсаторов, БСК, трансформаторов с устройствами РПН, обеспечивающих заданные диапазоны отклонения напряжения, а также работа средств защиты и автоматики в электрической сети.

Измерения производятся приборами типа «Ресурс UF0.1». Он предназначен для измерений показателей качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц.

Прибор измеряет следующие параметры:

- 1) показатели качества электрической энергии:
  - установившееся отклонение напряжения;
  - коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
  - коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
  - отклонение частоты;
  - длительность провала напряжения;
  - длительность временного перенапряжения;
  - глубина провала напряжения;
  - коэффициент временного перенапряжения;
- 2) другие характеристики напряжения:
  - действующее значение напряжения основной частоты;
  - действующее значение напряжения прямой последовательности для трехфазной системы междуфазных напряжений;
  - значение частоты.

С помощью программы «Ресурс – UF2 Plus» производится получение данных с измерителей показателей качества электроэнергии и предоставление их в удобной для анализа и дальнейшей обработки форме (в формате Excel), а также в виде графических данных. Для экспорта основных данных измерителей показателей качества электрической энергии используется шаблон.

Качество электрической энергии по отклонению частоты и установленному отклонению напряжения в пункте контроля считают соответствующим установленным требованиям, если одновременно выполняются следующие условия:

а) все измеренные в течение 24 ч значения контролируемого ПКЭ принадлежат интервалу, ограниченному предельно допускаемыми значениями ПКЭ;

б) 95 % измеренных в течение 24 ч значений ПКЭ принадлежат интервалу, ограниченному нормально допускаемыми значениями ПКЭ.

По результатам испытаний электрической энергии на соответствие требованиям ГОСТ 13109-97 дается заключение о соответствии показателей качества электроэнергии нормально и предельно допустимым значениям. В случае несоответствия разрабатывается план организационных и технических мероприятий по приведению их к нормально допустимым значениям.

Улучшать качество электрической энергии по параметру, характеризующему установившееся отклонение напряжения в электрических сетях можно двумя способами:

- за счет регулирования напряжения в центре питания и у потребителей (с помощью изменения коэффициента трансформации питающего трансформатора);

- снижением потерь напряжения в элементах сети (за счет снижения активного и реактивного сопротивления).

Колебания напряжения в системе электроснабжения вызываются резкими изменениями мощности (главным образом реактивной нагрузки). Для снижения размаха изменения должны применяться быстродействующие ИРМ.

Снижение несимметрии напряжения может быть достигнуто либо уменьшением сопротивления сети токам обратной и нулевой последовательности, либо снижением этих токов.

Для снижения несинусоидальности напряжения применяются различные схемные решения, а также используются силовые резонансные фильтры.

Финансирование затрат на техническое перевооружение и ремонт имеет приоритетный статус в филиале ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнер-

го». Обращения и жалобы на качество электрической энергии, поставляемой из распределительных сетей, подлежат оперативному и объективному рассмотрению.

#### **Библиографический список**

1. РД 153-34.0-15.501-00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Ч. 1. Контроль качества электроэнергии.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. **Техническая** политика ОАО «МРСК Центра». – 2010.

*К.С. Беликова, студ.; рук. О.А. Бушуева, к.т.н., проф.*

### **КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

В настоящее время в крупных городах происходит неуклонный рост электропотребления в бытовом секторе. Доля коммунально-бытового сектора в общей структуре энергетической нагрузки города составляет около 70 %. Увеличивается потребление и реактивной мощности. Это происходит из-за появления новых систем освещения, импульсных блоков питания компьютерной техники, частотных преобразователей электроприводов, использующих для работы нелинейные элементы.

Вследствие чего происходит

- увеличение потерь мощности и энергии в электрических сетях;
- снижение пропускной способности питающей сети;
- ухудшение показателей качества электроэнергии у потребителя, регламентируемых ГОСТ 13109-97.

Поэтому возникает необходимость компенсации реактивной мощности (КРМ). КРМ является одним из самых распространенных энергосберегающих мероприятий в электрических сетях.

Установка устройств компенсации реактивной мощности непосредственно у потребителя позволит улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения.

В России для компенсации реактивной мощности в коммунально-бытовом секторе начали применяться батареи конденсаторов.

Так в 2008 г. в г. Москве реализовано несколько проектов по КРМ в многоэтажных жилых домах.



В данной работе рассмотрены результаты исследований по внедрению установок КРМ в жилом доме, расположенном по адресу: г. Москва, ул. Свободы, д. 32 (см. таблицу).

Основанием для проведения работы явились следующие документы:

- Закон города Москва «Об энергосбережении в городе Москве» от 05.07.2006 г. № 35 (ст. 5);

- Постановление Правительства Москвы «О первоочередных задачах по энергосбережению в городе Москва» от 19.12.2006 г. № 1030-ПП. (П.13);

- Постановление Правительства Москвы от 11 декабря 2007 г. № 1078-ПП «О Концепции городской целевой программы «Энергосбережение в городе Москве на 2009 – 2013 гг. и на перспективу до 2020 года» и первоочередных мероприятий на 2008 год»;

- Распоряжение № 1800-ПП от 7 августа 2008 г. «О реализации пилотного проекта по установке систем компенсации реактивной мощности».

Основной целью работы является:

1. Исследование и анализ режимных параметров электрической сети бытовых потребителей и качества электрической энергии на вводе жилого дома.

2. Определение фактического значения потребления реактивной мощности (РМ) и выбор параметров устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ).

3. Оценка эффективности установки конденсаторных батарей.

**Характеристика жилого дома**

Год постройки	1977
Количество этажей	12
Количество подъездов	2
Количество квартир	88
Количество вводов	2
Наличие электроплит в квартирах	имеются

Разрешенная мощность присоединения приемников электрической энергии – 241,5 кВт.

Источники питания дома – ВРУ № 84582, 84583, РТП 15070, ПС № 111.

Проведен анализ технических характеристик и электрических нагрузок дома. Выявлено, что основными электрическими нагрузками являются освещение внутридомовых помещений и квартир, электроплиты и лифты. Электрические нагрузки от лифтов в данной работе не рассматриваются.

Проведены экспериментальные исследования режимных параметров сети и качества электроэнергии на вводах дома.

Результаты исследований представлены в виде графиков электрических нагрузок, графиков напряжений, изменений  $\cos\varphi$ , изменений показателей качества электроэнергии (отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей фазного напряжения).

Установлено, что значение потребления РМ на вводе 1 (квартиры) изменялось в диапазоне от 14 до 32 квар.

Значения  $\cos\varphi$  составили на вводе 1 – 0,75 – 0,92, что подтверждает индуктивный характер РМ.

Установлено, что уровень напряжения на вводе 1 в дом находятся в пределах допустимых значений.

Выявлено, что в сети присутствуют ВГ, в основном это третья, пятая и девятая гармоники (ввод 1).

Для повышения  $\cos\varphi$  на вводе 1 необходима установка батареи конденсаторов мощностью 60 квар с тремя ступенями регулирования по 20 квар. Мощность выбрана по графику изменения реактивной нагрузки дома с учетом перспективного роста нагрузок.

Вообще, компенсация реактивной мощности – это процесс достаточно долгий и дорогостоящий. Сейчас в развитых странах внедряются новые более совершенные методы и устройства компенсации РМ.

Процесс КРМ должен состоять из нескольких этапов. Для получения более быстрого ощутимого результата на первом этапе необходимо провести компенсацию реактивной мощности на подстанциях, что позволит разгрузить сеть и получить энергосбережение в пределах 10 – 20 %. Предварительно, на подстанциях в сетях 0,4 кВ необходимо выравнивание нагрузок фаз, которое производится путем переключения части абонентов с перегруженных фаз на недогруженные.

Поэтому компенсация реактивной мощности на объектах должна производиться на каждой отдельной фазе. При этом в каждом случае должны учитываться гармонические составляющие, при необходимости УКРМ должны иметь фильтры с автоматическим регулированием емкости.

Вторым этапом должна следовать индивидуальная (точечная) компенсация. Проводится она на уровне каждой квартиры или параллельно нагрузке, посредством подключения УКРМ (косинусных конденсаторов небольшой емкости). Данное мероприятие позволяет обеспечить синусоидальность тока, тем самым значительно уменьшая технические потери. Такие же мероприятия должны проводиться и внутри электроустановок зданий.

Практическая реализация подобных схем КРМ возможна с помощью структурного объединения в единую технологическую цепь трех серийных однофазных контроллеров. Компания EPCOS AG (Германия) предлагает версию трехканального управления автоматическими микропроцессорными контроллерами BR6000 однофазными ступенями УКРМ.

Независимо друг от друга однофазные измерительные системы контроллеров тестируют мгновенные значения фазных напряжений и линейных токов, вычисляют их сдвиг во всех четырех квадрантах комплексной плоскости, формируя на выходе сигналы, пропорциональные по величине и направлению РМ каждой фазы. Далее результаты измерения сравниваются с предварительно заданной (одинаковой для 3 контроллеров) уставкой  $\cos\varphi$ , соразмерной углу  $\varphi$ . Если отклонение превысит границы зоны чувствительности, контроллер выдаст команду на поочередную автономную коммутацию шести параллельно включенных секций однофазных конденсаторов одной из 3-емкостных ветвей КБ.

Таким образом, обеспечивается условие ввода дополнительной емкостной проводимости, компенсирующей дисбаланс линейных напряжений путем дифференцированного регулирования РМ-секций, соединенных «звездой» ветвей симметричных трехфазных КБ.

Результаты исследования внедрены в дипломный проект

#### Библиографический список

1. **ГОСТ 13109-97.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
2. **Правила** устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во ЭНАС, 2003.
3. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей. – 2003.
4. **Закон** города Москва «Об энергосбережении в городе Москва» от 05.07.2006 г. № 35 (ст. 5).
5. **Постановление** Правительства Москвы «О первоочередных задачах по энергосбережению в городе Москва» от 19.12.2006 г. № 1030-ПП (п. 13).
6. **Постановление** Правительства Москвы от 11 декабря 2007 г. № 1078-ПП «О Концепции городской целевой программы «Энергосбережение в городе Москва на 2009 – 2013 гг. и на перспективу до 2020 года» и о первоочередных мероприятиях на 2008 г.».
7. **Распоряжение** № 1800-РП от 7 августа 2008 г. «О реализации пилотного проекта по установке систем компенсации реактивной мощности».
8. **Силовая** электроника. – 2007. – № 3.

*С.Н. Максимова, А.Е. Богомолов, П.В. Наумов, студенты;  
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доцент,  
Н.А. Огорелышев, к.т.н., доцент*

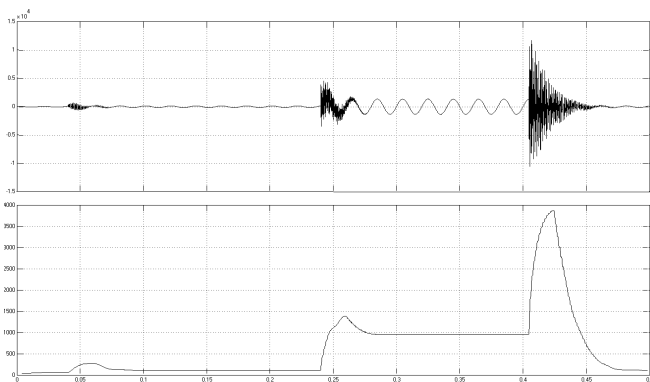
### ИССЛЕДОВАНИЕ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННОЙ ВЛ

Отключенные и выведенные в ремонт воздушные линии электропередачи (ВЛ) могут находиться под наведенным относительно земли напряжением, вызванным влиянием проходящих рядом других ВЛ. При этом появляется опасность поражения электрическим током ремонт-

ного персонала. Многочисленные публикации по этой теме показывают, что проблема обеспечения безопасности работ на ВЛ с наведенным напряжением на сегодняшний день не решена полностью.

Для ее решения требуется достаточно полное описание физических процессов, связанных с наведением напряжения на отключенных для ремонта ВЛ. В докладе показано, что кроме учитываемых обычно нормальных установившихся режимов ВЛ, влияющих на ремонтируемые воздушные линии электропередачи, необходимо рассматривать и всевозможные переходные режимы, включая КЗ.

На рисунке приведены графики изменения во времени наведенного напряжения в средней точке отключенной и заземленной по концам цепи ВЛ-110 кВ протяженностью 60 км (мгновенное значение – вверх, действующее – вниз). Вторая цепь этой передачи являлась влияющей линией. Она осуществляла связь источника с приемной системой. Обе цепи подвешены на общих опорах типа СК-1. При моделировании учитывалась распределенность параметров по длине линии, а также транспозиция обеих цепей, выполненных проводами марки АС-185/43. Находящаяся в работе цепь была нагружена мощностью 25 МВт с последующими набросом мощности до 50 МВт и далее однофазным КЗ в приемной системе, отключаемым через 0,16 с. Видно, что перечисленные коммутации сопровождаются в ремонтируемой цепи линии увеличением наведенного напряжения, включающего в себя высокочастотные составляющие. Действующее значение этого напряжения в переходных режимах достигает 4 кВ, а в установившихся – 56 В и 110 В (при нагрузках соответственно 25 МВт и 50 МВт), что превышает допустимые нормы. Полученные результаты показывают необходимость учета переходных электромагнитных процессов для оценки возможных наведенных напряжений на ремонтируемых ВЛ.



Графики наведенного напряжения на ремонтируемой цепи ВЛ при коммутациях: наброс нагрузки, включение КЗ, отключение КЗ во влияющей цепи ВЛ

*Е.Н. Волков, студ.;*  
*рук. О.А. Бушуева, к.т.н., проф.*

## **ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

В настоящее время актуальна проблема оценки надежности различных элементов электрических сетей. Одну из наиболее важных ролей здесь играет своевременное выявление перегрева контактных соединений электрооборудования. Применение тепловизора позволяет производить эту операцию бесконтактным способом (безопасность персонала), без вывода оборудования в ремонт (малые трудозатраты), появляется возможность выявления дефектов на ранней стадии, а следовательно увеличивается надежность электроснабжения.

В ОАО «МРСК Центра» задача обеспечения качества является составляющей миссии компании. Филиал ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнерго» обеспечивает электроснабжением народнохозяйственный комплекс области с территорией площадью 35,5 тыс. кв. км и населением более 1315 тыс. В качестве объекта определены сети напряжением 35 – 110 кВ, а также сети напряжением 0,4; 6 – 10; 220 кВ. Ярославская энергосистема граничит с Тверьэнерго, Мосэнерго, Владимирэнерго, Ивэнерго, Костромаэнерго, Вологдаэнерго.

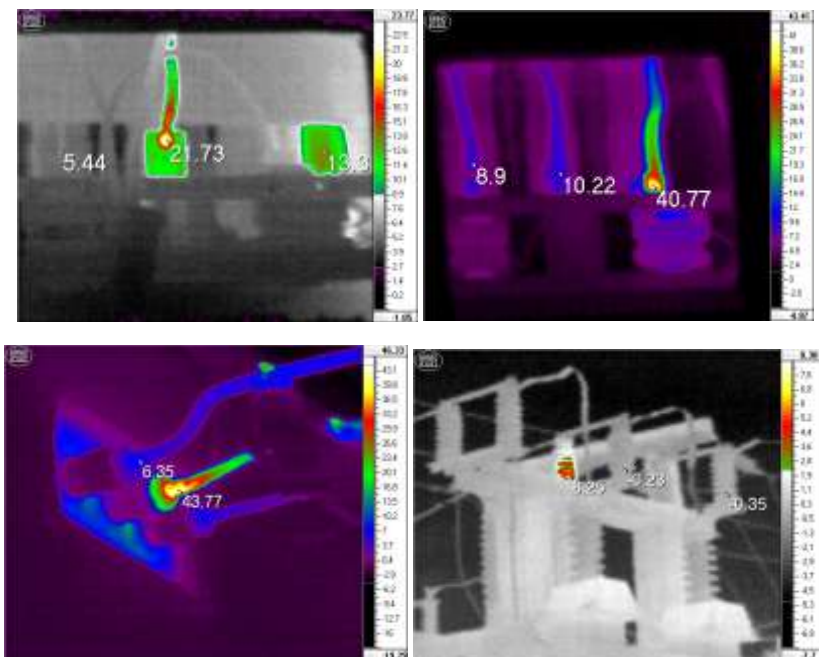
В филиале ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнерго» тепловизионный контроль электрооборудования осуществляется службой изоляции и защиты от перенапряжений. Для определения теплового состояния оборудования следует применять приборы с разрешающей способностью не менее 0,1 °С предпочтительно со спектральным диапазоном 8 – 12 мкм. В службе изоляции и перенапряжений ярославского производственного отделения применяется тепловизор «Fluke IR FlexCam» модификации «Ti40».

Тепловизоры «Fluke Ti40» предназначены для визуализации, бесконтактного измерения и регистрации пространственного распределения радиационной температуры объектов по их собственному тепловому излучению в пределах зоны, определяемой полем зрения оптической системой тепловизоров. Основные характеристики:

- диапазон измеряемых температур в пределах от –20 до 350 °С;
- частота обновления сигнала 30 Гц;
- питание тепловизоров осуществляется с помощью 9 В аккумулятора;
- условия эксплуатации тепловизоров:

- температура окружающего воздуха от  $-10$  до  $50$  °С,
- относительная влажность от 10 до 95 %;
- условия хранения тепловизоров:
  - температура окружающего воздуха от  $-40$  до  $70$  °С,
  - относительная влажность от 10 до 95 %.

Принцип действия прибора основан на том, что тепловое излучение от исследуемого объекта через оптическую систему передается на приемник, представляющий собой неохлаждаемую матрицу микроболометрических детекторов. Далее полученный видеосигнал оцифровывается и отображается на жидкокристаллическом дисплее. С помощью внутренней микропроцессорной системы возможна различная обработка полученного изображения. В тепловизорах предусмотрена возможность передачи сохраненных данных на персональный компьютер для дальнейшей обработки результатов измерений с помощью прилагаемого программного обеспечения. Обработка данных на ПК позволяет получить термограммы (см. рисунок), которые являются основной частью протокола тепловизионного контроля.



Примеры термограмм

Оценка теплового состояния электрооборудования и токоведущих частей в зависимости от условий их работы и конструкции может осуществляться: по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры), избыточной температуре, коэффициенту дефектности, динамике изменения температуры во времени, с изменением нагрузки, путем сравнения измеренных значений температуры в пределах фазы, между фазами, с заведомо исправными участками и т.п.

Результатом протокола тепловизионного контроля является заключение о исправности электрооборудования или о выявленных дефектах и сроках их устранения. Использование такого метода диагностики позволяет предприятию переходить от планового ремонта к ремонту фактическому, по состоянию оборудования.

#### **Библиографический список**

1. РД **34.45-51.300.97**. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
2. **Техническая** политика ОАО «МРСК Центра». – 2010.

## СЕКЦИЯ 12

### РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Председатель – д.т.н., профессор **Шуин В.А.**  
Секретари – студенты гр. П-29М **Сарбеева О.А., Чугрова Е.С.**

*Е.С. Чугрова, магистрант,  
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.*

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА ТИПА БРЭ 1301.02 (ЗЗГ-12)

**Введение.** В России и других странах для выполнения 100 %-ной защиты от ОЗЗ в обмотках статора генераторов, работающих в блоке с трансформаторами, наиболее широкое применение получили устройства, основанные на сравнении напряжения третьей гармоники на выводах и в нейтрали (ЗЗГ-11, БРЭ-1301.01 и аналогичные защиты в микропроцессорных терминалах защит генераторов многих известных фирм). Существуют две разновидности этой защиты – типа ЗЗГ-11 и ЗЗГ-12. Первая выполнена в виде реле с торможением, которое с учетом пропорциональности третьей гармоники напряжения рабочей цепи ( $U_{\Delta} + U_N$ ) – току, а третьей гармоники напряжения тормозной цепи  $U_N$  – напряжению, измеряет сопротивление нейтрали обмотки статора генератора на землю (также называемое «реле с торможением» или «реле сопротивления»). ЗЗГ-12 выполнена реагирующей на скорость и величину изменения третьей гармоники напряжения  $U_{\Delta}$  («реле производной»).

Принцип работы 100-процентной защиты типа ЗЗГ-11 требует измерения напряжения третьей гармоники как на выводах генератора, что не вызывает трудностей, так и в нейтрали генератора, что осуществимо только для генераторов с возможностью подключения трансформатора напряжения в нейтрали генератора. Между тем, в эксплуатации находится достаточно большое число генераторов без такой возможности. Это генераторы старых моделей мощностью до 100 МВт. Только на генераторах ТВФ-63М и ТВФ-110М, создаваемых последнее десятилетие, есть конструктивная возможность подключения трансформатора напряжения в нейтрали. Поэтому сегодня старые модели генераторов работают без 100 %-ной защиты от замыканий в обмотке статора генератора, требуе-



мой ПУЭ. Для таких генераторов во ВНИИЭ (Кискачи В.М.) была разработана защита ЗЗГ-12 (БРЭ 1301.02), реализованная на  $\Delta U_3$  и  $dU_3/dt$  со стороны выводов генератора, т.е. подключенная к ТН только на выводах.

Опыт эксплуатации этой защиты, выпускаемой в течение многих лет ЧЭАЗ, дал отрицательный результат. В настоящее время БРЭ 1301.01 снята с производства. В то же время необходимость в подобной защите будет сохраняться до полного вывода из работы генераторов мощностью 50...60 – 100 МВт, внедряемых до 80-90-х годов прошлого века.

Таким образом, защита обмотки статора генератора от замыканий на землю, использующая в качестве информационного параметра только напряжение на выводах обмотки статора генератора, является востребованной. Поэтому представляет интерес исследование и анализ возможных причин недостаточно высокой эффективности функционирования защиты ЗЗГ-12.

Схемы замещения генератора и графики распределения третьей гармоника напряжения, поясняющие принцип действия БТГ, показаны на рис. 1, 2.

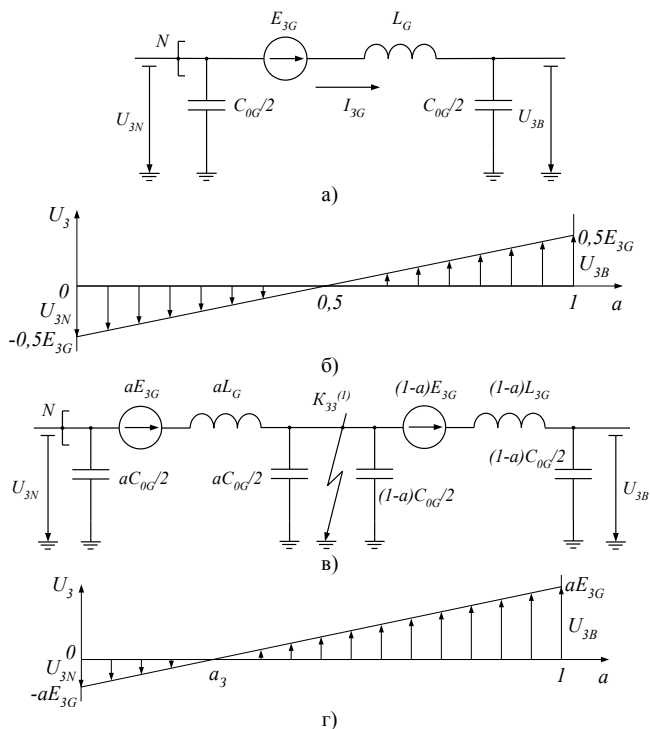


Рис. 1. Схемы замещения генератора (а, в) и распределение третьей гармоники напряжения вдоль обмотки статора (б, г) в нормальном режиме работы и при ОЗЗ в обмотке статора

Как видно из рис. 1, в нормальном режиме работы третьей гармоники напряжения на выводах генератора  $U_{3\Delta}$  и на нейтрали  $U_{3N}$  равны по модулю  $0,5E_3$  и противоположны по фазе. При возникновении ОЗЗ вблизи нейтрали генератора напряжение  $U_{3N}$  снижается до нуля, а напряжение  $U_{3\Delta}$  возрастает в два раза.

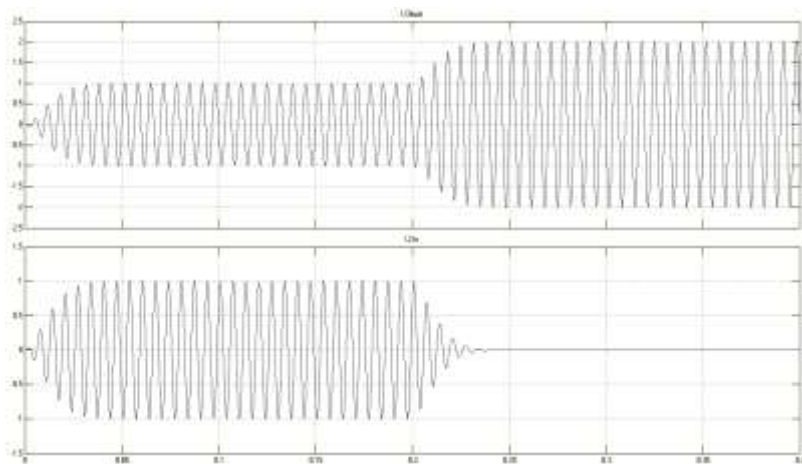


Рис. 2. Осциллограмма изменения напряжения 3-й гармоники на выводах  $U_{3\text{выв}}$  и в нейтрали  $U_{3н}$  при ОЗЗ в нейтрали

**Постановка задачи** – БТГ реагирует на переходный процесс изменения  $U_{3B}$ . На устойчивость его функционирования существенное влияние могут оказывать электромагнитные переходные процессы при дуговых прерывистых ОЗЗ.

**Цель работы** – исследование динамической устойчивости функционирования 100 %-й защиты от ОЗЗ в обмотке статора типа БРЭ1301.02 генераторов в переходных режимах ОЗЗ.

**Методы исследований** – математическое моделирование на ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ SIMULINK и Power System Blockset системы моделирования MATLAB.

**Задачи исследований:**

1. Разработка математической модели защиты типа БРЭ1301.02.
2. Исследование динамических режимов работы защиты типа БРЭ1301.02 на математической модели при дуговых прерывистых ОЗЗ.

Достоверность получаемых на основе вычислительных экспериментов результатов обеспечивается адекватностью математических моделей исследуемому объекту. До испытаний модели защиты БРЭ 1301.02 по методике, изложенной в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации БРЭ 1301.02» была проведена проверка настройки и наладка узлов модели блока 3-й гармоники. Параметры настройки всех функциональных узлов после проверки и наладки модели соответствовали требованиям инструкции.

**Функционально-структурная схемы защиты БРЭ 1301.02.** Блок исполнения БРЭ 1301.02 представляет собой защиту типа ЗЗГ-12 и предназначен для применения на генераторах, нейтраль обмотки статора которых изолирована. Блок защиты, основанный на использовании третьей гармоники напряжения (БТГ), выполнен в виде реле, реагирующего на скорость и величину изменения третьей гармоники напряжения  $U_{\Delta}$  («реле производной»). Назначением реле является выполнение защиты генератора при замыканиях в части обмотки статора, примыкающей к нейтрали, включая нейтраль (40 %). Функционально-структурная схема защиты приведена на рис. 3.

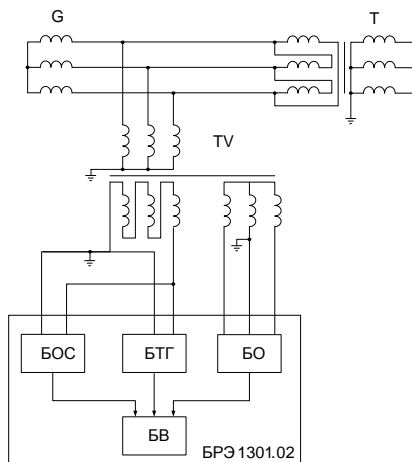


Рис. 3. Схема подключения и структурная схема защиты БРЭ 1301.02

Блок защиты включает в себя:

- блок основной составляющей (БОС);
- блок третьей гармоники (БТГ);
- орган блокировки по основной составляющей напряжения обратной последовательности (БО);
- выходной орган (БВ);

На рис. 4 представлена функционально-структурная схема блока 3-й гармоники защиты БРЭ-1301.02: ЛП – линейный преобразователь (входной трансформатор); ПФ – полосовые фильтры; С – сглаживатель; ИО – измерительный орган; ПО – пусковой орган; П – блок перемножения.

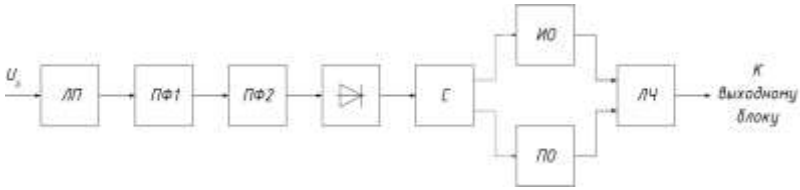


Рис. 4. Функционально-структурная схема блока третьей гармоники защиты типа БРЭ 1301.01: ЛП – линейный преобразователь (входной трансформатор); ПФ – полосовые фильтры; С – сглаживатель; ИО – измерительный орган; ПО – пусковой орган; ЛЧ – логическая часть

**Математическое моделирование.** Наиболее удобными для моделирования основных функциональных узлов БТГ способами являются:

1. Вывод передаточной функции «вход-выход»:

$$H(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_0}. \quad (1)$$

2. Составление системы алгебро-дифференциальных уравнений состояния, реализуемой в модели структурной схемой из интеграторов, сумматоров и линейных преобразователей.

Второй из вышеперечисленных способов представляется более удобным, поскольку при настройке узлов необходимо изменять параметры некоторых элементов, что приводит к изменению практически всех коэффициентов в передаточной функции и только одного-двух в уравнениях состояния.

Моделирование функциональных узлов блока 3-й гармоники велась следующим образом:

1. Каждый реактивный элемент (емкость) описывается уравнением  $C \frac{du}{dt} = i$ .

2. Для каждого узла записывается уравнение по первому закону Кирхгофа.

3. Для выбранных контуров приводятся уравнения по второму закону Кирхгофа.

4. В соответствии с записанными уравнениями составляется схема с помощью прикладной программы Simulink пакета MATLAB.

**Математическая модель фильтра третьей гармоники.** Принципиальная электрическая схема полосового фильтра ПФ1 приведена на рис. 5.

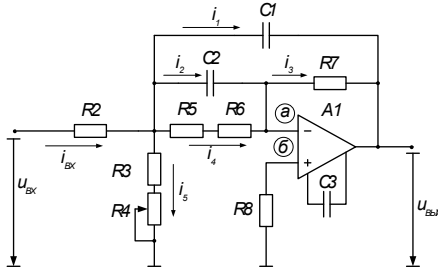


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема полосового фильтра ПФ1

Уравнения, необходимые для математического описания схемы полосового фильтра ПФ1, можно записать следующим образом:

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C1} i_1; \quad (2)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{C2} i_2; \quad (3)$$

$$i_1 + i_2 + i_4 + i_5 - i_{BX} = 0; \quad (4)$$

$$i_2 + i_3 - i_4 = 0; \quad (5)$$

$$u_{C1} - u_{C2} - i_3 R7 = 0; \quad (6)$$

$$u_{C2} - i_4 (R5 + R6) = 0; \quad (7)$$

$$u_a - u_{C2} - u_o = 0; \quad (8)$$

$$u_o = u_{BX}^- = u_{BX}^+ = 0; \quad (9)$$

$$u_a - i_5 (R3 + R4) = 0; \quad (10)$$

$$u_{BX} - u_a - i_{BX} (R2 + R142) = 0; \quad (11)$$

$$u_o - i_3 R7 - u_{BbX} = 0. \quad (12)$$

Структурная схема модели для решения системы уравнений (1) – (11) приведена на рис. 6, где:

$$K_1 = \frac{1}{R7}; \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{1}{R5 + R6}; \quad (14)$$

$$K_3 = \frac{1}{R3 + R4}; \quad (15)$$

$$K_4 = \frac{1}{R2}; \quad (16)$$

$$K_5 = \frac{1}{C2}; \quad (17)$$

$$K_6 = \frac{1}{C1}. \quad (18)$$

Из рис. 6 можно видеть, что данная форма и записи и представления математических моделей функциональных узлов и элементов БТГ позволяет просто изменять параметры отдельных элементов принципиальной электрической схемы, что необходимо для настройки модели и оптимизации ее параметров.

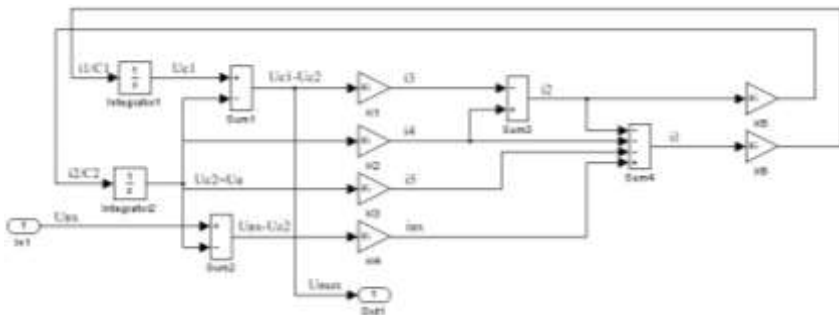


Рис. 6. Структурная схема модели для решения системы уравнений (2) – (12)

Принципиальная электрическая схема полосового фильтра ПФ2 приведена на рис. 7.

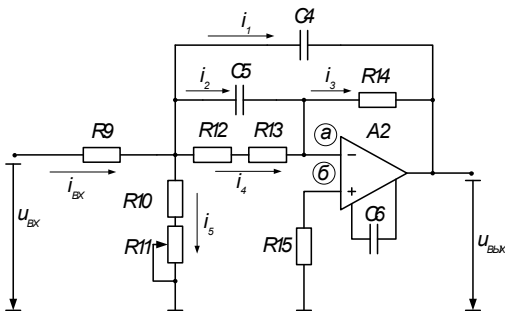


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема полосового фильтра ПФ2

Принципиальная электрическая схема, система алгебро-дифференциальных уравнений состояния и структурная схема модели для решения системы уравнений полосового фильтра ПФ2 такие же, как для полосового фильтра ПФ1. Расхождение заключается в использовании других элементов цепи, обладающих иными параметрами. Таким образом, система алгебро-дифференциальных уравнений для ПФ2:

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C4} i_1; \quad (19)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{C5} i_2; \quad (20)$$

$$i_1 + i_2 + i_4 + i_5 - i_{BX} = 0; \quad (21)$$

$$i_2 + i_3 - i_4 = 0; \quad (22)$$

$$u_{C1} - u_{C2} - i_3 R14 = 0; \quad (23)$$

$$u_{C2} - i_4 (R12 + R13) = 0; \quad (24)$$

$$u_a - u_{C2} - u_{\bar{o}} = 0; \quad (25)$$

$$u_{\bar{o}} = u_{BX}^- = u_{BX}^+ = 0; \quad (26)$$

$$u_a - i_5 (R10 + R11) = 0; \quad (27)$$

$$u_{BX} - u_a - i_{BX} R9 = 0; \quad (28)$$

$$u_{\bar{o}} - i_3 R14 - u_{BbLX} = 0. \quad (29)$$

Коэффициенты для структурной схемы модели ПФ2:

$$K_1 = \frac{1}{R14}; \quad (30)$$

$$K_2 = \frac{1}{R12 + R13}; \quad (31)$$

$$K_3 = \frac{1}{R10 + R11}; \quad (32)$$

$$K_4 = \frac{1}{R9}; \quad (33)$$

$$K_5 = \frac{1}{C4}; \quad (34)$$

$$K_6 = \frac{1}{C5}. \quad (35)$$



**Математическая модель двухполупериодного выпрямителя.**  
 Принципиальная электрическая схема двухполупериодного выпрямителя приведена на рис. 8.

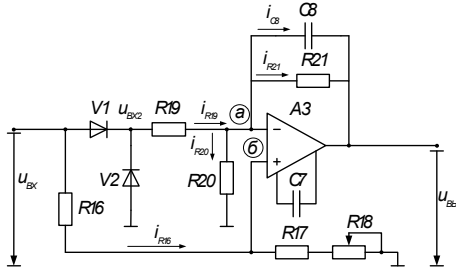


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема двухполупериодного выпрямителя

Система алгебро-дифференциальных уравнений для двухполупериодного выпрямителя:

$$\frac{du_{C8}}{dt} = \frac{1}{C8} i_{C8}; \quad (36)$$

$$i_{C8} = i_{R19} - i_{R20} - i_{R21}; \quad (37)$$

$$u_{C8} = i_{R21} R21; \quad (38)$$

$$i_{R21} = \frac{u_{C8}}{R21}; \quad (39)$$

$$i_{R20} = \frac{u_a}{R20}; \quad (40)$$

$$u_{\phi} = u_{BX} \frac{R17 + R18}{R16 + R17 + R18}; \quad (41)$$

$$u_a = u_{\phi}; \quad (42)$$

$$i_{R20} = u_{BX} \frac{R17 + R18}{R20 \cdot (R16 + R17 + R18)}; \quad (43)$$

$$i_{R19} = \frac{u_{BX2} - u_a}{R19}; \quad (44)$$

$$u_{BX2} = u_{BX}, \text{ если } u_{BX} \geq 0; \quad (45)$$

$$u_{BX2} = 0, \text{ если } u_{BX} < 0; \quad (46)$$

$$i_{R19} = \frac{1}{R19} \left( u_{BX2} - u_{BX} \frac{R17 + R18}{R16 + R17 + R18} \right); \quad (47)$$

$$u_{BBX} = i_{R20} R20 - u_{C8}. \quad (48)$$

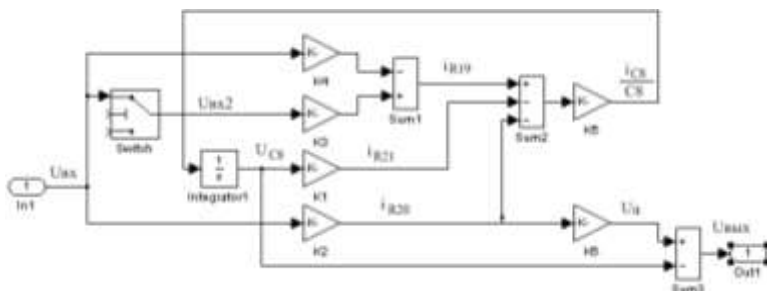


Рис. 9. Структурная схема модели для решения системы уравнений (36) – (48)

Коэффициенты, используемые в структурной схеме модели двухполупериодного выпрямителя:

$$K_1 = \frac{1}{R21}; \quad (49)$$

$$K_2 = \frac{R17 + R18}{R20(R17 + R18)}; \quad (50)$$

$$K_3 = \frac{1}{R19}; \quad (51)$$

$$K_4 = \frac{R17 + R18}{R19(R16 + R17 + R18)}; \quad (52)$$

$$K_5 = \frac{1}{C8}; \quad (53)$$

$$K_6 = R20. \quad (54)$$

**Математическая модель сглаживателя.** Принципиальная электрическая схема сглаживателя приведена на рис. 10.

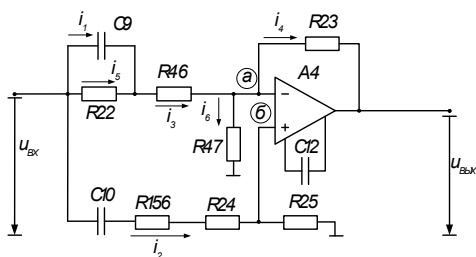


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема сглаживателя

Система алгебро-дифференциальных уравнений для сглаживателя:

$$\frac{du_{C9}}{dt} = \frac{1}{C9} i_1; \quad (55)$$

$$\frac{du_{C10}}{dt} = \frac{1}{C10} i_2; \quad (56)$$

$$i_3 = i_1 + i_5; \quad (57)$$

$$i_3 = i_4 + i_6; \quad (58)$$

$$u_{C9} = i_5 R22; \quad (59)$$

$$u_{ex} = u_{C10} + i_2 (R156 + R24) + u_{\bar{b}}; \quad (60)$$

$$u_a = i_4 R23 + u_{\bar{b}bx}; \quad (61)$$

$$u_{ex} = u_{C9} + i_3 R46 + u_a; \quad (62)$$

$$u_a = i_6 R47; \quad (63)$$

$$u_{\bar{b}} = i_2 R25; \quad (64)$$

$$\frac{du_{C9}}{dt} = \frac{1}{C9} i_1; \quad (65)$$

$$\frac{du_{C10}}{dt} = \frac{1}{C10} i_2; \quad (66)$$

$$i_3 = i_1 + i_5. \quad (67)$$

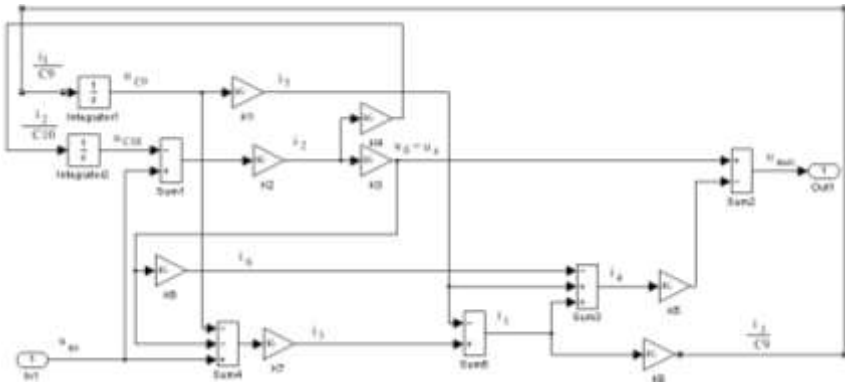


Рис. 11. Структурная схема модели для решения системы уравнений (55) – (67)

Коэффициенты, используемые в структурной схеме модели сглаживателя:

$$K_1 = \frac{1}{R22}; \quad (68)$$

$$K_2 = \frac{1}{R156 + R24 + R25}; \quad (69)$$

$$K_3 = R25; \quad (70)$$

$$K_4 = \frac{1}{C10}; \quad (71)$$

$$K_5 = R23; \quad (72)$$

$$K_6 = \frac{1}{R47}; \quad (73)$$

$$K_7 = \frac{1}{R46}; \quad (74)$$

$$K_8 = \frac{1}{C9}. \quad (75)$$

**Математическая модель измерительного органа.** Принципиальная электрическая схема измерительного органа приведена на рис. 12.

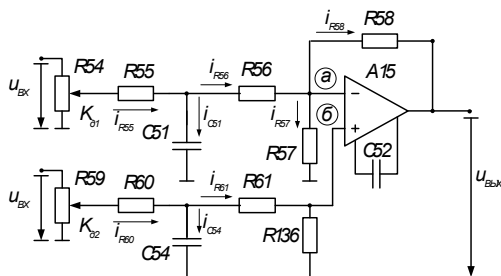


Рис. 12. Принципиальная электрическая схема измерительного органа

Система алгебро-дифференциальных уравнений для измерительного органа:

$$du_{C51}/dt = i_1/C51; \quad (76)$$

$$du_{C54}/dt = i_2/C54; \quad (77)$$

$$i_3 = i_1 + i_4; \quad (78)$$

$$i_4 = i_5 + i_6; \quad (79)$$

$$i_7 = i_2 + i_8; \quad (80)$$



$$K_7 = \frac{1}{R57}; \quad (94)$$

$$K_8 = \frac{1}{R60}; \quad (95)$$

$$K_9 = \frac{1}{R61 + R136}; \quad (96)$$

$$K_{10} = R58. \quad (97)$$

**Математическая модель пускового органа.** Принципиальная электрическая схема пускового органа приведена на рис. 14.

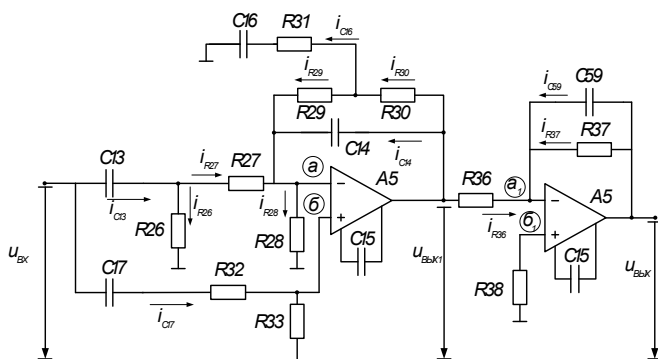


Рис. 14. Принципиальная электрическая схема пускового органа

Система алгебро-дифференциальных уравнений для пускового органа:

$$\frac{du_{C13}}{dt} = \frac{1}{C13} i_{13}; \quad (98)$$

$$\frac{du_{C14}}{dt} = \frac{1}{C14} i_{14}; \quad (99)$$

$$\frac{du_{C16}}{dt} = \frac{1}{C16} i_{16}; \quad (100)$$

$$\frac{du_{C17}}{dt} = \frac{1}{C17} i_{17}; \quad (101)$$

$$i_{C13} = i_{R26} + i_{R27}; \quad (102)$$

$$i_{R27} + i_{C14} + i_{R29} = i_{R28}; \quad (103)$$

$$i_{R30} = i_{C16} + i_{R29}; \quad (104)$$

$$u_{6x} = u_{C13} + i_{R26}R26; \quad (105)$$

$$i_{R26}R26 = i_{R27}R27 + u_a; \quad (106)$$

$$u_a = -u_{C14} + u_{6bx1}; \quad (107)$$

$$u_{C14} = i_{R30}R30 + i_{R29}R29; \quad (108)$$

$$u_a = i_{R28}R28; \quad (109)$$

$$u_{C16} + i_{C16}R31 = u_a + i_{R29}R29; \quad (110)$$

$$u_6 = i_{C17}R33; \quad (111)$$

$$u_{6x} = u_{C17} + i_{C17}(R32 + R33); \quad (112)$$

$$\frac{du_{C59}}{dt} = \frac{1}{C59} i_{C59}; \quad (113)$$

$$i_{R36} + i_{R37} + i_{C59} = 0; \quad (114)$$

$$u_{6bx1} = u_{a1} + i_{R36}R36. \quad (115)$$

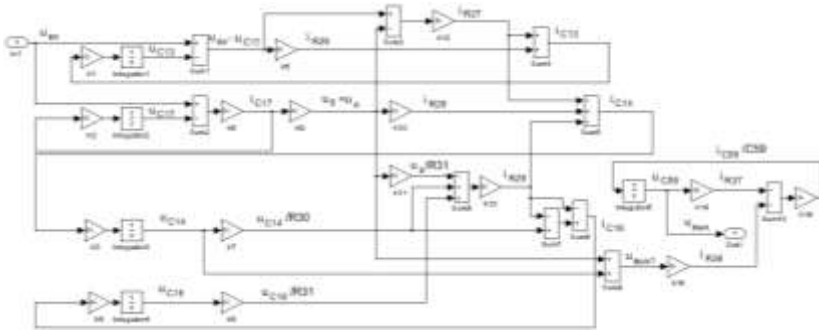


Рис. 15. Структурная схема модели для решения системы уравнений (98) – (115)

Коэффициенты, используемые в структурной схеме модели пускового органа:

$$K_1 = 1/C13; \quad (116)$$

$$K_2 = 1/C17; \quad (117)$$

$$K_3 = 1/C14; \quad (118)$$

$$K_4 = 1/C16; \quad (119)$$

$$K_5 = 1/R26; \quad (120)$$

$$K_6 = \frac{1}{R32 + R33}; \quad (121)$$

$$K_7 = \frac{1}{R30}; \quad (122)$$

$$K_8 = \frac{1}{R31}; \quad (123)$$

$$K_9 = R33; \quad (124)$$

$$K_{10} = \frac{1}{R28}; \quad (125)$$

$$K_{11} = \frac{1}{R31}; \quad (126)$$

$$K_{12} = \frac{1}{R27}; \quad (127)$$

$$K_{13} = \frac{1}{\frac{R29}{R30} + \frac{R29 + R31}{R31}}; \quad (128)$$

$$K_{14} = \frac{1}{R37}; \quad (129)$$

$$K_{15} = \frac{1}{R36}; \quad (130)$$

$$K_{16} = \frac{1}{C59}. \quad (131)$$

**Исследование работы защиты типа ЗЗГ-12.** Ниже приведены осциллограммы работы защиты типа ЗЗГ-12 при замыканиях на землю в нейтрали генератора и на выводах генератора.

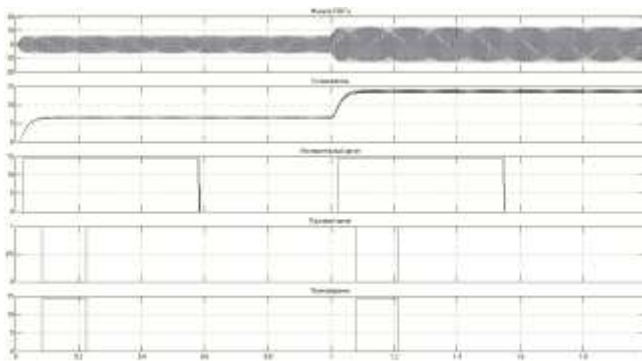


Рис. 16. Осциллограмма напряжений при устойчивом замыкании в нейтрали генератора



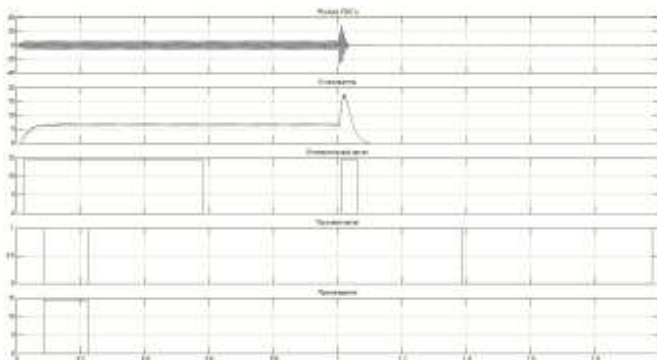


Рис. 17. Оциллограмма при устойчивом замыкании на выводах генератора

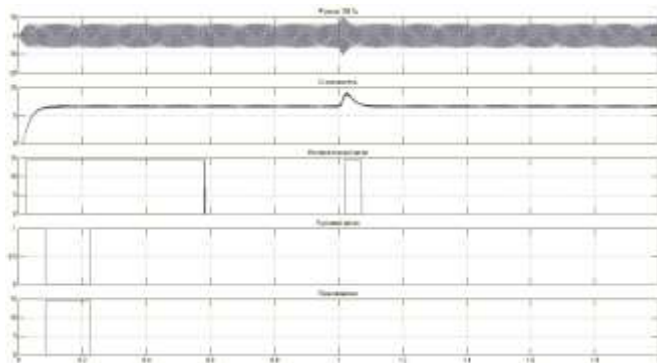


Рис. 18. Оциллограмма при однократном пробое в нейтрали генератора

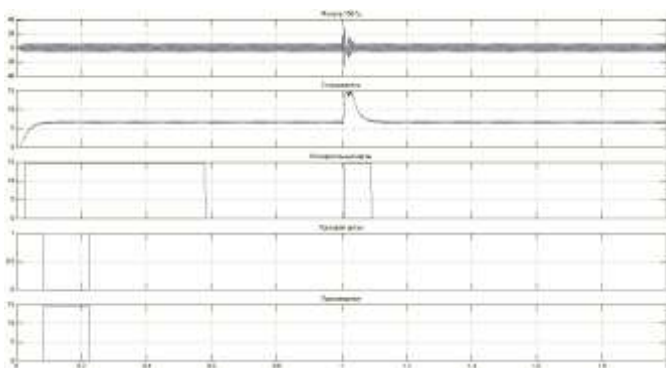


Рис. 19. Оциллограмма напряжений при однократном пробое на выводах генератора

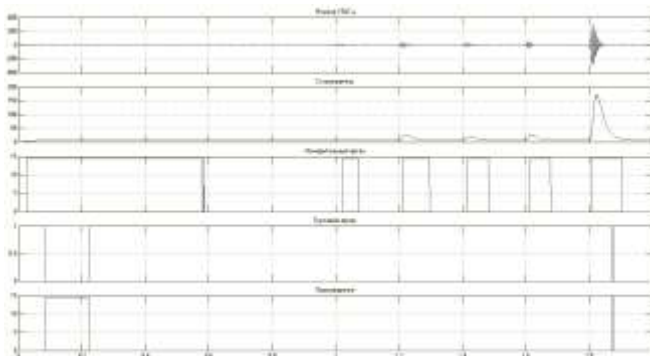


Рис. 20. Осциллограмма напряжений при многократных пробоях в нейтрали генератора

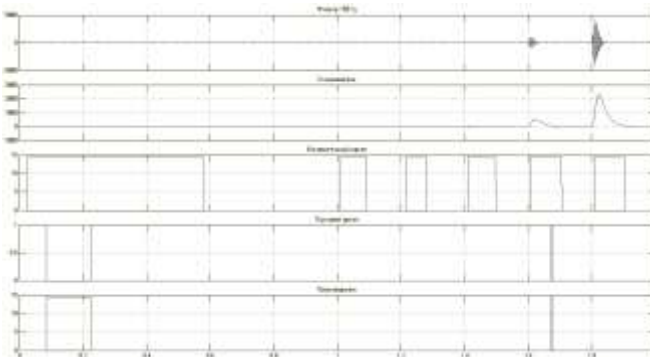


Рис. 21. Осциллограмма при многократных пробоях на выводах генератора

### Выводы

1. Используемые в БТГ схмотехнические решения не обеспечивают устойчивости функционирования защит при дуговых прерывистых ОЗЗ со стороны нейтрали.
2. Возможны излишние срабатывания защиты при дуговых прерывистых ОЗЗ со стороны выводов, обусловленные собственными переходными процессами в фильтрах третьей гармоники.
3. Переходные процессы в фильтрах и большие постоянные времени функциональных узлов БТГ снижают селективность и устойчивость его функционирования.
4. Используемые в БТГ фильтры не обеспечивают требуемую степень подавления 1-й гармоники, что может приводить к излишним

срабатываниям (при ОЗЗ на выводах) и ложным срабатываниям в режимах без ОЗЗ.

5. Основные функциональные узлы (фильтры, выпрямитель, сглаживатель) имеют значительные постоянные времени, соизмеримые с постоянными времени переходных процессов в режимах без ОЗЗ, приводящих к изменению уровня 3-й гармоники, (изменение тока возбуждения, тока нагрузки и др.), что также может обуславливать ложные срабатывания защиты.

*И.Е. Горбачев, студ.;*  
*рук. В.Ф. Коротков, к.т.н., проф.*

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ ИНТЕРАКТИВНОГО РЕШЕНИЯ И КОНТРОЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ**

В настоящее время на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» под руководством профессора В.Ф. Короткова разработана автоматизированная обучающая система по дисциплине «Автоматическое регулирование в ЭЭС» [1].

АОС охватывает все виды учебной деятельности студентов по дисциплине (теоретическое обучение, практическая работа, эксперимент, самоконтроль, тренировка, контроль, а также самостоятельная работа).

Для обеспечения практической работы студентов важно дать студентам возможность самостоятельно решать аналитические задачи по дисциплине и осуществлять автоматическую проверку правильности их решений с соответствующими комментариями.

Перед автором была поставлена задача разработать программное обеспечение для практической работы.

В основу работы был положен следующий подход.

Решение каждой из задач разбивается на 2 этапа:

1 этап – формирование общего алгоритма решения задачи;

2 этап – использование соответствующих формул (математических выражений) на каждом шаге реализации алгоритма.

Каждая программа представляет собой задачу, оформленную на странице html, с приведенными условиями, исходными данными, необходимыми схемами и графиками.

В качестве примера рассматривается одна из задач интерактивного решения (рис. 1).

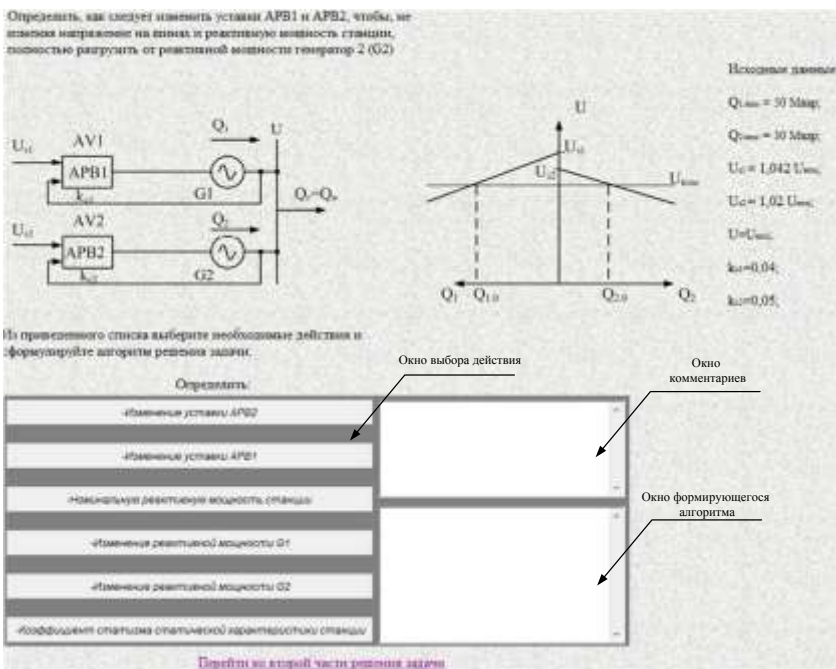


Рис. 1. Графическое оформление задачи

На рис. 1 приведен пример интерфейса программы реализации 1 этапа решения задачи. Перед студентом представлена схема электрической станции с двумя генераторами, оснащенными статическими автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ). Приведены статические характеристики АРВ генераторов. Требуется определить, как следует изменить уставки АРВ1 и АРВ2, чтобы, не изменяя напряжение на шинах и реактивную мощность станции, полностью разгрузить от реактивной мощности генератор 2 (G2). Приведен список действий (рис. 1), выбирая которые (нажимая на соответствующие кнопки), студент формирует общий алгоритм решения задачи. Список также содержит избыточные действия, что усложняет решение задачи. В процессе решения задачи программа осуществляет автоматическую проверку каждого действия студента и выдает результат данной проверки (рис. 2).

Данная программа реализована с помощью объектно-ориентированного языка программирования «Java».



Рис. 2. Ход решения задачи

Во второй части задания студенту предоставляется возможность по уже сформированному алгоритму произвести численный расчет, используя определенный набор формул (рис. 3). Из данного набора математических выражений студент должен выбрать соответствующее выражение для каждого шага алгоритма. Также как в первой части условие содержит избыточные формулы. В процессе решения задачи происходит автоматическая оценка выбора, производится расчет по правильному варианту и удаление верного варианта (рис. 4).



Рис. 3. Интерфейс второго этапа решения задачи

На данный момент по схожим алгоритмам разработано 12 типов задач по регулированию реактивной мощности, 8 типов задач по регулированию активной мощности, и 18 расчетных задач. Задачи успешно функционируют в составе автоматизированной обучающей системы.



Рис. 4. Комментарии и ход решения задачи

### Библиографический список

1. **Коротков В.Ф.** Автоматическое управление напряжением и реактивной мощностью синхронных генераторов и электрических станций: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 192 с.

*Е.В. Боталов, Д.И. Киселев, студенты;  
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доцент*

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА «РАСЧЕТ СТУПЕНЧАТЫХ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ»

В настоящее время в процессе обучения студентов все большее применение находят компьютерные технологии.

Изучение принципов действия и функционирования ступенчатых токовых направленных защит линий электропередачи (ЛЭП) является одним из важных разделов дисциплины «Релейная защита электроэнергетических систем» [1]. Токowymi направленными защитами являются защиты, реагирующие на значение тока и направление мощности короткого замыкания (КЗ) в месте их включения.

Создание компьютерного лабораторного практикума, предназначенного для расчета токовых направленных защит ЛЭП, имеет своей целью дать возможность обучающемуся закрепить знания о принципах действия и основах согласования ступенчатых токовых направленных защит.

При разработке компьютерной лабораторной работы решались следующие задачи:

– разработка математических моделей и алгоритмов моделирования установившихся режимов работы электроэнергетических объектов;

- разработка общего сценария и алгоритма выполнения компьютерной лабораторной работы;
- разработка алгоритма выбора и расчета параметров срабатывания ступенчатых токовых направленных защит;
- разработка алгоритмов оценки чувствительности измерительных органов защит и проверки направленности;
- реализация разработанных алгоритмов с использованием инструментальной среды графического программирования *LabVIEW* [2].

Для исследования была выбрана схема кольцевой электрической сети, состоящей из эквивалентированной электрической системы (С), двух подстанций (Б и В) с понижающими трансформаторами (Т1, Т2, Т3, Т4, трех соединяющих их линий (Л1, Л2, Л3). На объектах электрической сети установлены устройства релейной защиты, предназначенные для отключения поврежденных участков с сохранением работоспособности сети и бесперебойного питания потребителей (рис. 1).

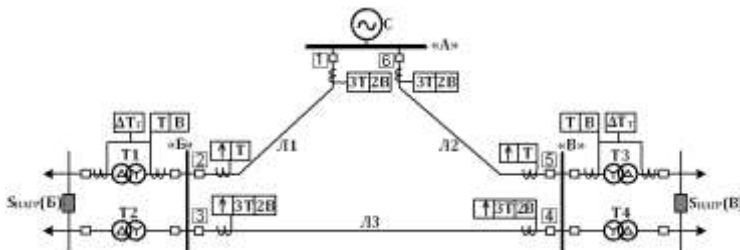


Рис. 1. Схема моделируемой электрической сети

В практикуме рассматривается проектирование следующих защит линий кольцевой сети: трехступенчатых токовых защит (1 и 6), токовых направленных защит (2 и 5) и трехступенчатых токовых направленных защит (3 и 4). Токовая направленная защита имеет органы: измерительные – токовый и направления мощности, выдержки времени и исполнительный. На каждом трансформаторе подстанций установлены продольная дифференциальная токовая защита и максимальная токовая защита.

Исследования в практикуме проводятся для различных вариантов исходных данных (рис. 2). Для этого автоматически выдаются значения параметров электрической сети, соответствующие выбранному варианту задания, которые разделены на четыре группы: система, линии, трансформаторы и нагрузка.

В параметры системы входят линейное ( $U_{ном}$ ) и фазное ( $E_C$ ) напряжение, максимальная ( $S^{(3)}_{КЗ макс}$ ) и минимальная ( $S^{(3)}_{КЗ мин}$ ) мощность трехфазного короткого замыкания. Линии задаются длинами ( $l_{л}$ ) и удель-

ным сопротивлением ( $X_{уд}$ ). Трансформаторы характеризуются номинальной мощностью ( $S_{ном\ tr}$ ), напряжением короткого замыкания ( $U_{K\%}$ ) и временем срабатывания защит ( $t_{CЗ\ T\ рез}$ ). Нагрузка определяется своей мощностью потребления ( $S_{нагр}$ ).

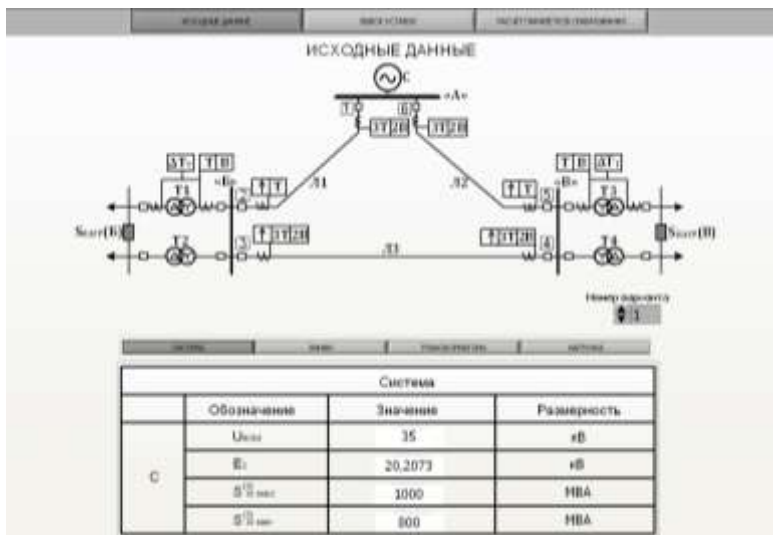


Рис. 2. Режим задания исходных данных

Для расчета электрических величин при КЗ сформирована математическая модель электрической сети на основе конфигурации и исходных параметров ее элементов. В качестве метода формирования общей математической модели электрической сети используется модифицированный метод узловых потенциалов, что позволяет просто учитывать в процессе расчета состояние коммутационных элементов (включено или отключено), при этом общая математическая модель формируется методом поэлементного вклада [4].

Система уравнений, описывающая установившийся режим электрической сети, сформированная по модифицированному методу узловых потенциалов:

$$[Y_p] \cdot [X] = [W], \quad (1)$$

где  $[Y_p]$  – матрица узловых проводимостей;  $[X]$  – матрица искомым величин, в которую входят токи через защиты и узловые потенциалы;  $[W]$  – матрица источников токов.



Расчет данной системы уравнений позволяет определить токи, протекающие через защиты при КЗ в различных узлах электрической сети, направления этих токов и напряжения в месте установки защит.

Расчет параметров срабатывания осуществляется на основе методики согласования токовых ступенчатых направленных защит, формируемой в таблице обоснования выбора уставок (рис. 3). Для каждой уставки всех защит необходимо выбрать задаваемые функции, расчетные условия и соответствующий общий вид расчетных выражений. Защиты 2 и 5 имеют одну ступень защиты и одну уставку  $I_{C3}$ . Остальные защиты содержат три ступени и следующие уставки:  $I'_{C3}$ ,  $I''_{C3}$ ,  $t'_{C3}$ ,  $I'''_{C3}$ ,  $t'''_{C3}$ .

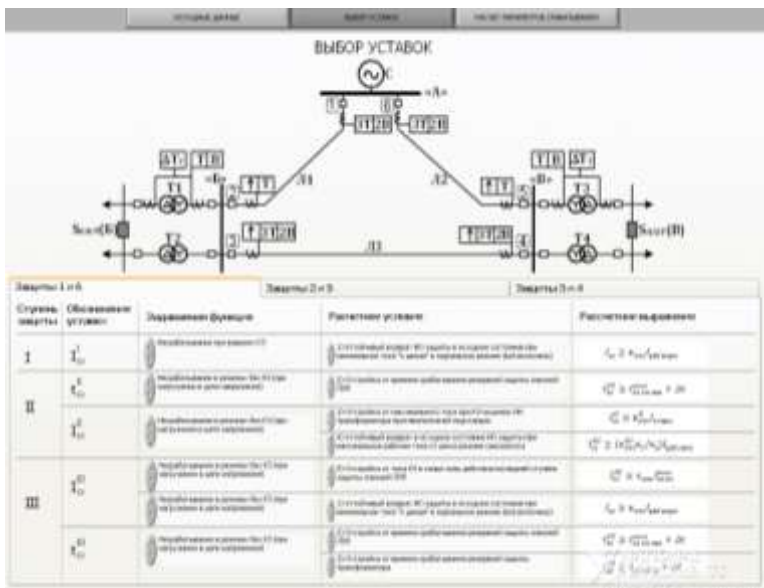


Рис. 3. Формирование таблицы обоснования выбора уставок

Согласование параметров срабатывания защит выполняется последовательно: сначала для токовых направленных защит 2 и 5, затем для токовых ступенчатых направленных защит 3 и 4, далее для токовых ступенчатых защит 1 и 6. Расчет уставок этих защит сводится в таблицы. Для каждого параметра срабатывания согласно ранее сформированной таблицы обоснования выбора уставок нужно определить расчетные условия, соответствующие расчетные выражения и режим сети, необходимый для расчета данного параметра срабатывания. Для вычисления значения лю-

бого параметра в расчетное выражение необходимо ввести значение времени или тока через защиту, которое пользователь предварительно должен вычислить в режиме расчета токов нагрузочного режима или в режиме расчета токов КЗ (рис. 4).

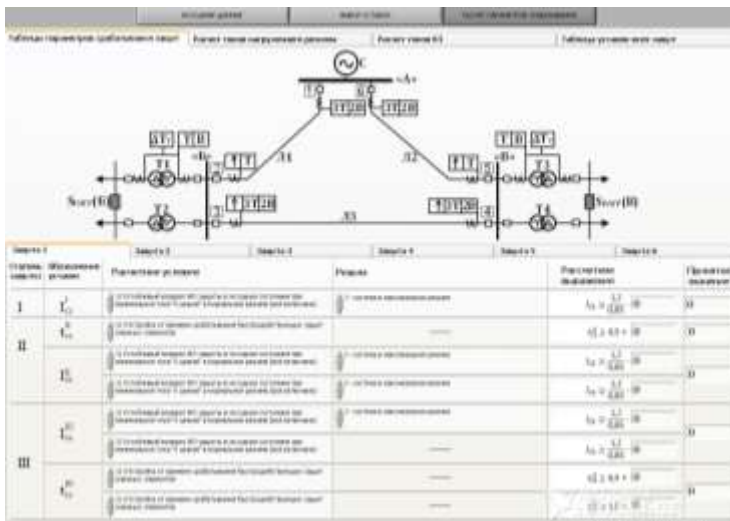


Рис. 4. Таблица расчета параметров срабатывания защит

Для определения данных, которые заносятся в таблицу необходимо воспользоваться следующими модулями:

1. Расчет токов нагрузочного режима.
2. Расчет токов КЗ.
3. Вывод информации об уставках спроектированных защит.

Токи нагрузочных режимов (нормальный и послеаварийный) через защиты вычисляются в модуле расчета токов нагрузочного режима (рис. 5). Для этого согласно выбранному режиму сети необходимо задать состояние выключателей и режим системы.

В аварийных режимах токи через защиты вычисляются в модуле расчета токов КЗ (рис. 6). Для этого также согласно выбранному режиму сети нужно задать состояние выключателей, режим системы и место короткого замыкания. При этом можно менять расположение КЗ на линии (K1, K2, K7) по ее длине.

Все окончательные значения параметров срабатывания защит, выбранные в результате расчетов, автоматически заносятся в таблицу уставок всех защит (рис. 7).

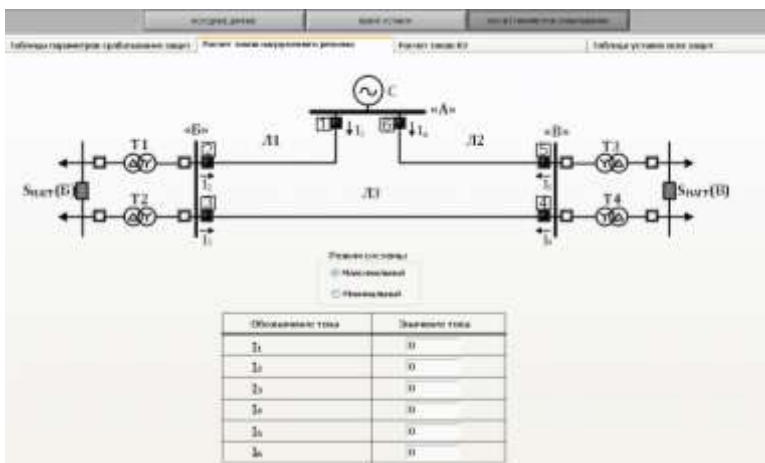


Рис. 5. Режим расчета токов нагрузочного режима

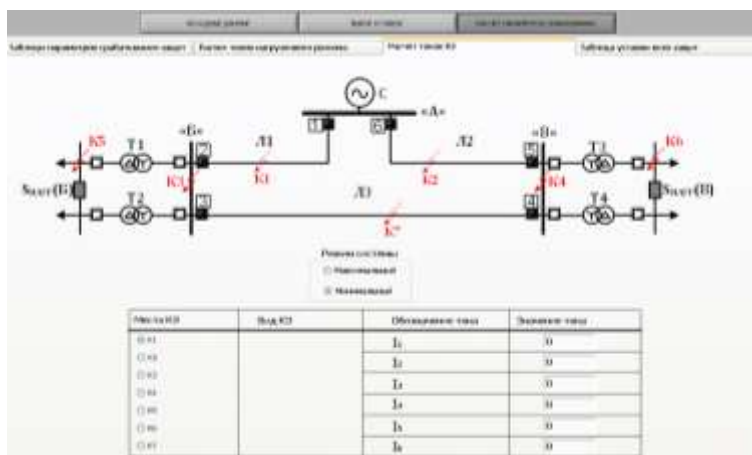


Рис. 6. Режим расчета токов КЗ

На данном этапе создания лабораторного практикума разработаны:

- общий сценарий и алгоритм выполнения компьютерной лабораторной работы;
- математические модели и алгоритмы моделирования установившихся режимов работы электроэнергетических объектов;
- алгоритм выбора и расчета параметров срабатывания ступенчатых токовых направленных защит.

Имя защиты	Степень защиты	Минимальное значение тока	Максимальное значение тока	Направление тока
1	I	$I_{11}^{I,1}$	$I_{11}^{I,2}$	0
	II	$I_{12}^{II,1}$	$I_{12}^{II,2}$	0
	III	$I_{13}^{III,1}$	$I_{13}^{III,2}$	0
2	I	$I_{21}^{I,1}$	$I_{21}^{I,2}$	0
	II	$I_{22}^{II,1}$	$I_{22}^{II,2}$	0
	III	$I_{23}^{III,1}$	$I_{23}^{III,2}$	0
3	I	$I_{31}^{I,1}$	$I_{31}^{I,2}$	0
	II	$I_{32}^{II,1}$	$I_{32}^{II,2}$	0
	III	$I_{33}^{III,1}$	$I_{33}^{III,2}$	0
4	I	$I_{41}^{I,1}$	$I_{41}^{I,2}$	0
	II	$I_{42}^{II,1}$	$I_{42}^{II,2}$	0
	III	$I_{43}^{III,1}$	$I_{43}^{III,2}$	0
5	I	$I_{51}^{I,1}$	$I_{51}^{I,2}$	0
	II	$I_{52}^{II,1}$	$I_{52}^{II,2}$	0
	III	$I_{53}^{III,1}$	$I_{53}^{III,2}$	0
6	I	$I_{61}^{I,1}$	$I_{61}^{I,2}$	0
	II	$I_{62}^{II,1}$	$I_{62}^{II,2}$	0
	III	$I_{63}^{III,1}$	$I_{63}^{III,2}$	0

Рис. 7. Таблица рассчитанных параметров срабатывания защит

Следующий этап работы предусматривает разработку алгоритмов оценки чувствительности ступенчатых токовых направленных защит, определения их направленности и функционирования защит при повреждениях в различных точках электрической сети.

Компьютерный лабораторный практикум позволяет закрепить знания о принципах действия и основах согласования ступенчатых токовых направленных защит, провести анализ функционирования данных защит при внутренних и внешних КЗ в различных режимах работы питающих систем.

#### Библиографический список

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: пер. с англ. Клушин Н.А. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2004.
3. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер с польск. – М.: Энергоиздат, 1982.
4. Математические модели и алгоритмы для расчетов в фазных составляющих установившихся электромагнитных процессов в электроэнергетических системах при коротких замыканиях и сложных несимметриях / В.А. Шуин, А.Ю. Мурзин, О.В. Фролова, А.В. Насонов // Вестник ИГЭУ. – Вып. 5. – Иваново, 2004. – С. 40 – 52.

*А.А. Князева, А.В. Котлова, студенты;  
рук. В.Ф. Коротков, к.т.н., проф.*

## СТАТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СТАТКОМ

В настоящее время в ЕЭС России испытывается недостаток средств регулирования напряжения и реактивной мощности. В связи с этим недоиспользуются линии электропередачи по пропускной способности, не оптимально распределяются потоки мощности по параллельным линиям электропередачи различного класса напряжений. Эффективным способом решения указанных проблем может явиться применение гибких электропередач (FACTS), содержащих современные многофункциональные устройства и, в частности, статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) [1].

СТАТКОМ представляет собой устройство, выполненное на базе полупроводникового преобразователя постоянного/переменного напряжения (ПН) с емкостным накопителем электроэнергии на стороне постоянного тока. Упрощенная структурная схема СТАТКОМ представлена на рис. 1.

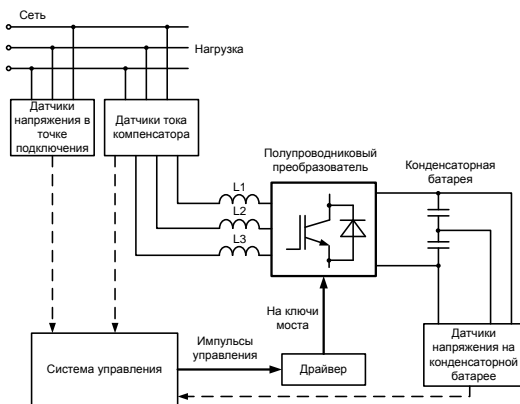


Рис. 1. Упрощенная структурная схема СТАТКОМ

В компенсаторах малой и средней мощности преобразователь обычно имеет трехфазную двухуровневую топологию схемы. В системах большой мощности и высокого напряжения – многоуровневую и многоячейковую топологию схемы. Схема многоуровневого преобразователя для СТАТКОМ изображена на рис. 2.

На базе СТАТКОМ могут быть реализованы другие устройства FACTS: вставка постоянного тока (ВПТ), управляемая продольная компенсация, компенсаторы активно-реактивной мощности и др.

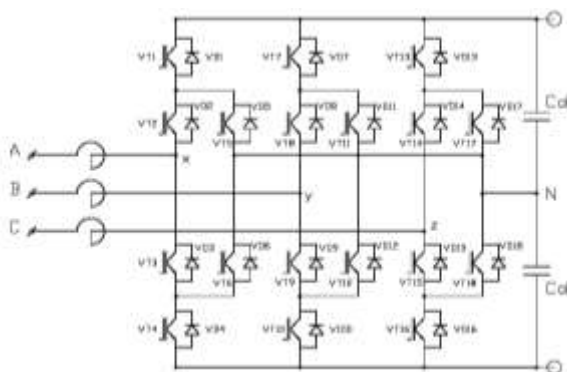


Рис. 2. Схема мостового трехуровневого преобразователя для СТАТКОМ

СТАТКОМ представляет интерес не только как составная часть FACTS, но сам по себе в качестве альтернативы синхронным компенсаторам (СК) на подстанциях (ПС), поскольку обслуживание и ремонт СК связаны со значительными затратами [1].

СТАТКОМ как источник реактивной мощности осуществляет:

- повышение пропускной способности электрических сетей разного класса напряжения;
- поддержание напряжения на подстанциях в протяженных и сильно загруженных сетях в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах;
- ограничение коммутационных перенапряжений;
- симметрирование напряжений;
- подавления фликкера.

В настоящее время в мире существует несколько действующих установок СТАТКОМ, выполненных по технологии SVC Light шведской фирмой АВВ на основе мощных биполярных транзисторов (IGBT). Такие установки обладают существенными преимуществами по сравнению с устройствами, традиционно используемыми для компенсации реактивной мощности. Это, прежде всего, высокое качество электроэнергии, что достигается использованием высокочастотного широтно-импульсного модулирования (ШИМ). Практически независимое друг от друга и быстрое регулирование активной и реактивной мощности как на стороне выпрямителя, так и на стороне инвертора. При этом реактивная мощность может как потребляться, так и, при необходимости, выдаваться в сеть переменного тока. Такое

качество ПН позволяет ему участвовать в регулировании уровня напряжения в сети переменного тока. Кроме того, преимуществом СТАТКОМ является широкий диапазон регулирования реактивной мощности при снижении напряжения в сети, а также компактность установки [2].

На рис. 3 приведена расчетная схема присоединения СТАТКОМ к сети через трансформатор.

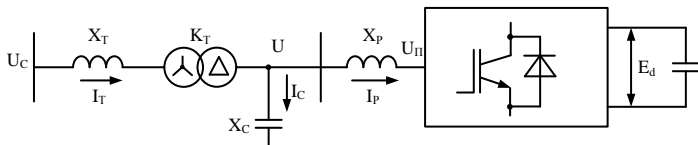


Рис. 3. Расчетная схема присоединения СТАТКОМ к сети через трансформатор

Для активной и реактивной мощности преобразователя напряжения известны формулы [3]:

$$P = \frac{U \cdot U_n}{x_p} \cdot \sin \varphi; \quad (1)$$

$$Q = \frac{U \cdot (U_n \cos \varphi - U)}{x_p}, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение на шинах переменного тока;  $U_n$  – напряжение преобразователя;  $x_p$  – сопротивление фазного реактора;  $\varphi$  – угол между  $U$  и  $U_n$ .

Управление реактивной мощностью осуществляется путем формирования эталонного напряжения преобразователем. На фазный реактор подается разность напряжений сети и преобразователя. Активное сопротивление реактора незначительно, поэтому ток в фазе СТАТКОМ отстает практически на  $90^\circ$  от напряжения, приложенного к реактору.

Активная мощность регулируется путем получения на выходе преобразователя напряжения, отстающего или опережающего по фазе напряжение сети. Управление активной мощностью возможно в том случае, когда СТАТКОМ выступает как часть других средств FACTS [4].

Выражения для активной и реактивной мощности СТАТКОМ могут быть записаны в следующем виде [3]:

$$P = \frac{3 \cdot U_1 \cdot I_1}{2} \cdot \cos \gamma + \frac{3 \cdot U_2 \cdot I_2}{2} \cdot \cos \beta; \quad (3)$$

$$Q = \frac{3 \cdot U_1 \cdot I_1}{2} \cdot \sin \gamma + \frac{3 \cdot U_2 \cdot I_2}{2} \cdot \sin \beta, \quad (4)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – амплитуды прямой и обратной последовательности напряжения в точке подключения СТАТКОМ;  $I_1$  и  $I_2$  – амплитуды прямой и обратной последовательности фазного тока СТАТКОМ;  $\gamma$  – угол между напряжением сети и фазным током СТАТКОМ по прямой последовательности;  $\beta$  – угол между напряжением сети и фазным током СТАТКОМ по обратной последовательности.

Для пояснения работы СТАТКОМ по симметрированию напряжения рассмотрим векторную диаграмму, изображенную на рис. 4.

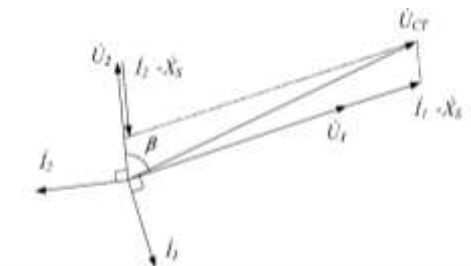


Рис. 4. Векторная диаграмма, поясняющая функцию СТАТКОМ по симметрированию напряжения

Симметрирование напряжения осуществляется путем генерации/потребления в сеть реактивного тока  $\dot{I}_1$  прямой последовательности и создания регулируемого вектора напряжения  $\dot{I}_1 \cdot \dot{x}_s$ , а уменьшение амплитуды обратной последовательности напряжения сети осуществляется за счет потребления реактивного тока  $\dot{I}_2$  обратной последовательности, и создания вектора  $\dot{I}_2 \cdot \dot{x}_s$ .

Характеристики СТАТКОМ приближены к управляемому источнику тока за счет алгоритма токовой широтно-импульсной модуляции, что исключает необходимость защиты СТАТКОМ от превышения допустимого уровня коммутируемого вентилем тока с выводом СТАТКОМ из работы при возникновении в энергосистеме значительных возмущений (коммутации, КЗ).

Исследования работы СТАТКОМ, проведенные специалистами ВНИИ на цифровой модели «Узел», подтвердили эффективность алгоритмов регулирования напряжения сети, симметрирования напряжения, а так же показали высокое быстродействие системы управления, достаточное для работы СТАТКОМ в аварийных и послеаварийных режимах сети [5].

Авторами данной статьи были произведены исследования влияния СТАТКОМ, установленного на инверторной стороне вставки постоянного тока ПС Выборгская, на параметры режима сети.



Основная расчетная схема сети, обеспечивает передачу мощности в Финляндию от двух генерирующих источников:

- энергосистемы Северо-Запада через ВПТ ПС Выборгская по линии 330 кВ ПС Выборгская – ПС Каменногорская, двум параллельно работающим линиям 330 кВ ПС Выборгская – ПС Восточная и линиям 400 кВ ПС Выборгская – ПС Юлликкяля и ПС Выборгская – ПС Кюми – не более 1000 МВт;

- блоков ПГУ-1, выделенных на Северо-Западной ТЭЦ, с помощью линии 330 кВ Северо-Западная ТЭЦ – ПС Выборгская, повышающего автотрансформатора 400/330 кВ и линии 400 кВ ПС Выборгская – ПС Юлликкяля – 400 МВт.

В этом случае СТАТКОМ подключается на шины низшего напряжения трансформаторов связи СК с шинами 400 кВ.

Данные исследования проводились на модели сети, созданной в программе «Energy 300».

При расчете были приняты следующие допущения:

- расчет ведется для установившегося режима в схеме с учетом и без СТАТКОМ;

- СТАТКОМ задается в модели узлом с генерируемой реактивной мощностью  $Q = 150$  МВА и ветвью с сопротивлением  $X = 1$  Ом;

- остальные средства компенсации реактивной мощности используемые в схеме задаются в модели как узлы, выдающие реактивную мощность;

- потребление реактивной мощности ВПТ составляет 60 % от передаваемой активной мощности.

Результаты расчетов потокораспределения и параметров режима в расчетной схеме показывают, что:

- при использовании СТАТКОМ в схеме ПС Выборгская отклонение напряжения на шинах переменного тока в сети 400 кВ составляет не более 4 % от номинальной величины;

- без учета влияния СТАТКОМ в сети возникает дефицит реактивной мощности, что приводит к снижению напряжения в узлах сети 400 кВ максимум на 22 % от номинального значения;

- в данной сети при использовании СТАТКОМ потери полной мощности в режиме максимальных нагрузок снижаются на 12 %.

Исследования подтвердили, что применение в условиях ПС Выборгская СТАТКОМ позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения на шинах переменного тока и компенсацию реактивной мощности.

В настоящий момент СТАТКОМ наиболее совершенное и многофункциональное статическое устройство FACTS, поэтому и более дорогое.

За прошедшее десятилетие за рубежом целый ряд проектов СТАТКОМ уже был реализован, происходит внедрение и в России.

В настоящее время СТАТКОМ является наиболее перспективным средством управления реактивной мощностью в электрических сетях.

#### Библиографический список

1. **Николаев А.В.** Разработка принципов управления статическим компенсатором (статком) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока. – Режим доступа: [www.lib.ua-gu.net](http://www.lib.ua-gu.net).
2. **Статком** как средство компенсации реактивной мощности в сетях высокого напряжения / П.А. Шейко [и др.]. – Новое в российской электроэнергетике – 2003. – № 5.
3. **Кочкин В.И.,** Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. – 248 с.
4. **Розанов Ю.К.,** Кошелев К.С., Смирнов М.И. Цифровая система управления статическим компенсатором реактивной мощности. – Электричество. – 2006. – № 7. – С. 25 – 30.
5. **Пешков М.В.** Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем. – М., 2009.
6. **Кошелев К.С.,** Пешков М.В. Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ. – Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 34 – 37.
7. **Статком** как средство компенсации реактивной мощности в сетях высокого напряжения / П.А. Шейко [и др.]. – Новое в российской электроэнергетике – 2003. – № 5.
8. **Кочкин В.И.,** Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. – 248 с.

*И.Ю. Стойкова, студ.; рук. О.В. Фролова, к.т.н., доцент*

### УСТРОЙСТВО АВТОМАТИКИ ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА «АЛАР-М»

Устройство АЛАР-М предназначено для использования на линиях электропередач с целью выявления и ликвидации асинхронного режима энергосистемы.

Выявление асинхронного режима в устройстве АЛАР-М основано на прямом признаке асинхронного режима – монотонном возрастании разностного угла между векторами напряжений на концах контролируемого участка электропередачи (проворот) с одновременным наличием на контролируемом участке точки электрического центра качаний.

Настройка работы устройства выполняется без необходимости предварительного анализа режимов и использует следующие группы уставок:

- уставки контролируемого участка электропередачи, определяемые только его параметрами, задающие границы зоны защиты;

- параметры ступеней, определяющие моменты выдачи устройством управляющих воздействий для ликвидации АР;
- флаги режима работы, обеспечивающие координацию работы основного, резервного и смежного с ними устройств.

Устройство позволяет работать с тремя ступенями алгоритма. Работа всех ступеней однотипна, ступени работают поочередно, начиная с первой, обычно используется одна ступень. Пример работы с расширенной зоной приведен на рис. 1.



Рис. 1. Работа основного и резервного устройства

Если работа устройства должна резервироваться работой другого устройства, установленного с противоположной стороны контролируемого участка, устанавливается флаг «Включить режим основной-резервный». Тогда резервное устройство выдаст управляющее воздействие на заданное число проворотов позже, чем основное. При включении флага «основной-резервный» алгоритм устройства автоматически считает его основным или резервным в зависимости от направления потока мощности. Если скольжение для данного устройства положительное, оно работает как основное, если отрицательное – оно работает как резервное.

Когда желательно учитывать погрешность определения электрических характеристик контролируемого участка, устанавливается флаг «Работа с расширенной зоной». При этом, выявив точку ЭЦК в расширенной зоне, устройство выдаст управляющее воздействие с дополнительным сдвигом на заданную величину. Такое поведение обеспечивает невоз-

возможность одновременного отключения линии с двух сторон. Пример работы с расширенной зоной приведен на рис. 2.



Рис. 2. Работа с расширенной зоной

В целях обеспечения наилучшего послеаварийного баланса мощности целесообразно нагрузку подстанции оставлять в избыточной части энергосистемы. Технологический алгоритм определяет знак скольжения асинхронно движущихся частей энергосистемы. Поэтому для каждой ступени предусмотрено два выходных реле. Одно реле срабатывает при положительном скольжении, другое при отрицательном.

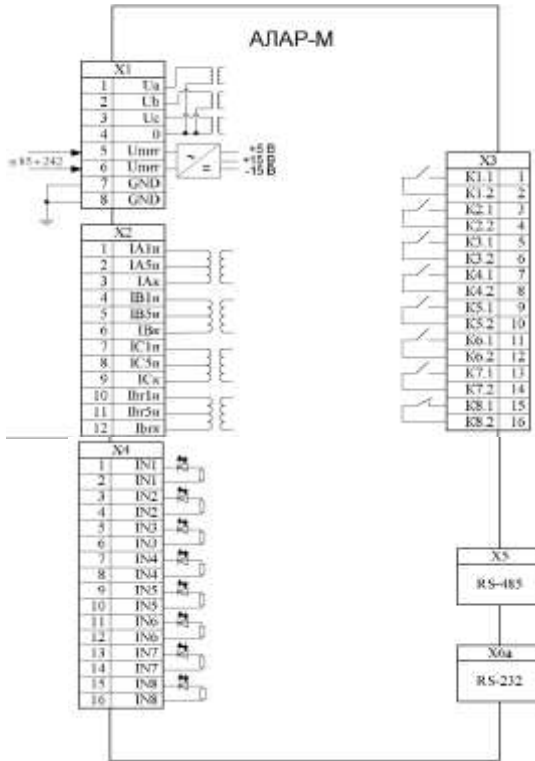


Рис. 3. Подключение устройства

Когда к подстанции подведено более двух линий, контроль АР выполняется несколькими устройствами. В случае сложного переходного процесса развития АР точка ЭЦК может перемещаться с одной линии на другую. Для исключения возможности двухстороннего обесточивания подстанции можно использовать метод взаимной блокировки устройств. При срабатывании одного устройства выдается высокий уровень напряжения на дискретные входы других устройств, что приводит к блокировке работы этих устройств.

Устройство подключается к внешним цепям аналоговых и дискретных сигналов посредством разъемов, расположенных на задней панели. В устройстве имеются разъемы для подключения цепей переменного напряжения и оперативного питания, переменного тока, разъем контактов выходных реле, разъем для внешних дискретных сигналов, разъемы для подключения к персональному компьютеру. Подключение устройства приведено на рис. 3.

*Е.А. Мазнев, студ.; рук. В.Ф. Коротков, к.т.н., проф.*

**АДАПТАЦИЯ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЧР ЭЭС  
К СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

Нормальный режим работы энергосистемы характеризуется балансом генерируемой и потребляемой мощности. При аварийных ситуациях, в которых происходит возникновение дефицита генерируемой активной мощности, происходит снижение частоты, что отрицательно сказывается на работе энергосистемы и потребителей. При снижении частоты ниже допустимого уровня возможно возникновение «лавины частоты», которая может сопровождаться «лавиной напряжения». Данные процессы протекают весьма быстро и могут привести к останову всех или части электростанций системы.

Наиболее эффективным средством предотвращения значительных аварийных снижений частоты является использование устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР). Они осуществляют автоматическое отключение части нагрузки при снижении частоты, вызванном возникшим аварийным режимом [1, 2].

Расчет процесса изменения частоты во времени требует большего количества однотипных вычислений. Это связано с многообразием аварийных режимов и как следствие с различными дефицитами активной мощности.

В 2008 году студентом Рыжиковым С.Е. была разработана математическая модель для исследования процессов изменения частоты в энергетических системах при возникновении больших дефицитов активной мощности [3]. Но данная математическая модель исследования изменения частоты оказалась программно несовместимой с автоматизированной обучающей системой.

Целью данной работы являлось создание математической модели участка ЭЭС [1] на языке программирования Java, которая должна соответствовать реальным процессам при действии АЧР и быть программно совместимой с системой автоматизированного обучения в качестве наглядного материала по изучению процессов изменения частоты.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- не учитывается работа устройств автоматического частотного пуска резервных гидрогенераторов и перевод этих агрегатов из компенсаторного в генераторный режим;

- не учитывается «горячий ввод резерва» при возникшем дефиците мощности;

- не учитывается работа устройств АПВ;

- не учитывается каскадное развитие аварии;

- не учитывается возможность совмещенного отключения одних и тех же потребителей от АЧР I и АЧР II;

- не учитываются дополнительная АЧР и ЧАПВ;

- не учитывается изменение реактивной мощности и связанное с этим изменение напряжения;

- выдержка времени очередей АЧР I принимается равной нулю.

Разработанная программа позволяет моделировать работу ЭЭС в условиях дефицита активной мощности:

- при отсутствии устройств АЧР;

- при действии АЧР I;

- при действии АЧР I и АЧР II.

В качестве наглядной информации выводится графики соответствующие выбранным условиям.

Реализована возможность настройки уставок по частоте и времени устройств АЧР I и АЧР II, а также задание генерируемой и потребляемой мощностей на отдельных участках системы. Блок-схема программы приведена на рисунке.

В блоке «Ввод исходных данных» вводится исходные данные для расчета: генерируемая и потребляемая мощности, уставки АЧР I и АЧР II, постоянные инерции турбогенераторов и нагрузки, значения начальной и критической частоты.



В блоке «Режим» производится выбор аварийного режима работы моделируемой системы.

В блоке «Категория АЧР» необходимо выбрать цель производимого расчета:

- при отсутствии устройств АЧР;
- при действии АЧР I;
- при действии АЧР I и АЧР II.

В блоке «Расчет» происходит расчет изменения частоты согласно выбранному режиму и категории АЧР.

В блоке «Вывод графика» происходит графическая демонстрация расчета согласно выбранной категории АЧР.

В блоке «Вывод итогового графика процесса» выводятся результирующий график изменения частоты во времени.

#### Библиографический список

1. **Рабинович Р.С.** Автоматическая частотная разгрузка энергосистем; под ред. Е.Д. Зейлидзе. – М.: Энергия, 1980.
2. **Электротехнический справочник:** в 3-х т. Т. 3. Кн. 1. Производство, передача и распределение энергии; под ред. Герасимова В.Г. и др. – М.: Энергоиздат, 1982.
3. **Разработка** модели для исследования автоматической частотной разгрузки электроэнергетической системы по активной мощности / С.Е. Рыжиков // Энергия-2008: мат-лы региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Иваново, 2008.



*И.Е. Вятский, студ.;  
рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доцент*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 – 220 КВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Для проведения расчетов токов КЗ в электрических сетях необходимо знание параметров отдельных элементов, в том числе линий электропередач. Особое значение точность вычисления параметров ЛЭП приобретает для решения задачи определения места короткого замыкания. На практике в расчетах сетей с линиями сложной конфигурации приходится учитывать:

- наличие взаимоиндуктивных связей с параллельной линией, с линиями, идущими в одном коридоре от подстанции или станции;
- наличие отпаечных подстанций с трансформаторами, имеющими заземленные нейтрали (как правило, число таких отпайек не больше четырех, и в обязательном порядке заземление трансформаторов на отпайке требуется только при наличии генерирующего источника со стороны отпайки);
- наличие тросов; причем в ряде случаев тросы могут охватывать не всю длину линии, а только отдельные ее участки, например, подходящие к шинам подстанции.

Расчет параметров линии с учетом указанных факторов представляет собой достаточно трудоемкую задачу, решение которой осложняется наличием значительного количества типов опор с различным расположением проводов и тросов. В расчете также учитывается вид материала из которого изготовлен трос. Для стальных тросов приходится принимать во внимание нелинейную зависимость от тока в тросе величины его эквивалентного радиуса и, соответственно, сопротивления троса, влияющего на удельное сопротивление линии.

В расчетах приходится учитывать такой параметр, как эквивалентная глубина залегания обратного провод. Эта величина зависит от характера грунта (его удельного сопротивления) и может изменяться от 95 м для морской воды, до 3000 м для сухой земли. Для скальных пород возможны большие значения.

Эквивалентная глубина возврата тока через землю, м:

$$D_3 = \frac{66,4}{\sqrt{f \cdot \lambda}},$$

где проводимость земли  $\lambda = 10^{-4} 1/(\text{Ом} \cdot \text{км})$ .

Удельные параметры линии зависят от величины  $D_3$ , но так как эта величина находится под знаком логарифма, то, как правило, разброс получается небольшой.

В связи с этим целесообразно автоматизировать расчет параметров. Такая программа для ЭВМ была разработана во ВНИИЭ (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики) [2]. Алгоритм программы позволяет получить уточненные параметры линий электропередач в зависимости от сечения проводов, типа и габаритов промежуточных опор, преобладающих для данной ЛЭП, а также учесть более полно взаимное влияние параллельных ЛЭП с большим числом цепей в коридоре параллельного следования (до 10 цепей). При известной длине ЛЭП также выдаются полные параметры.

Ставится задача создания функционально аналогичной программы, в которой не ограничивается число цепей со взаимоиндукцией и учитываются нелинейности характеристики тросов.

Основные расчетные формулы приведены в [1] и основаны на выражениях, предложенных Карсоном:

$$\begin{aligned} Z_L &= r_L + jx_L = r_L + 0,000987f + j0,002894f \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{э.л.}} = \\ &= r_L + 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{э.л.}}; \\ Z_\mu &= r_\mu + jx_\mu = 0,000987f + j0,002894f \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{э.л.}} = \\ &= 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{э.л.}}. \end{aligned}$$

В качестве исходных данных для расчета в программу вводится число цепей, проходящих в одном коридоре, тип грунта для определения эквивалентной глубины возврата тока через землю. Далее вводятся расстояния от фазных проводов (тросов) до оси опоры, а также высота подвеса каждого провода. По этим данным геометрически вычисляются расстояния между проводами различных фаз на одной опоре, расстояние между проводами на разных опорах, а также расстояния между фазными проводами и грозозащитными тросами.

Расстояние между проводами соседних цепей:

$$D_{AiAj} = \sqrt{|h_{Ai} - h_{Aj}|^2 + (l_{ij} + d_{Ai} + d_{Aj})^2}.$$

Расстояние между проводами одной цепи :

$$D_{AiBi} = \sqrt{|h_{Ai} - h_{Bi}|^2 + (|d_{Ai}| + |d_{Bi}|)^2} .$$

Расстояние между проводами и тросом одной цепи:

$$D_{AiT} = \sqrt{|h_T - h_{Ai}|^2 + (d_{Ai})^2} .$$

Для остальных фаз расчеты производятся по аналогичным формулам.

На основе этих данных рассчитывается сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между цепями:

$$Z_{0i-j} = 0,15 + j \cdot 0,435 \times \\ \times \lg \left( \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{AiAj} \cdot D_{AiBj} \cdot D_{AiCj} \cdot D_{BiAj} \cdot D_{BiBj} \cdot D_{BiCj} \cdot D_{CiAj} \cdot D_{CiBj} \cdot D_{CiCj}}} \right).$$

Собственное сопротивление нулевой последовательности определяется с учетом тросов. Для расчета вводятся радиус провода, поперечное сечение алюминия в проводе, наличие грозозащитного троса. Так как для тросов из различных материалов методика вычисления эквивалентного радиуса троса различна, то необходимо ввести материал, из которого изготовлен трос. Для сталеалюминиевых тросов вычисление эквивалентного радиуса ведется по формуле:

$$P_{э.т.} = 0,9 P_T .$$

Для стальных тросов для вычисления эквивалентного радиуса необходимо знать внутреннее индуктивное сопротивление, которое различно для разных марок троса:

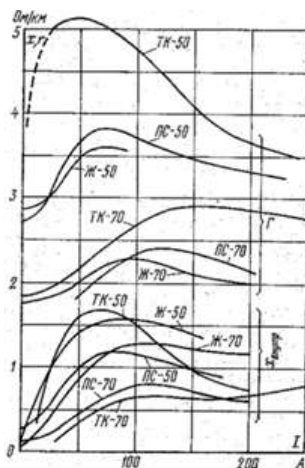
$$P_{э.т.} = \frac{P_T}{\text{antilg} \frac{X_{внутр}}{0,145}} .$$

На рисунке показаны приведенные в [1] зависимости удельных сопротивлений тросов от величины тока.

Параметры зависят от тока в тросе. По умолчанию в алгоритме используются параметры наиболее часто применяемых стальных тросов при токе в 100 А.

В этом случае погрешность может быть достаточно большой и для уточненного расчета в алгоритм вводится возможность ввода токов нуле-

вой последовательности в фазах для точного определения параметров троса. Расчет тока в тросе можно рассчитать при помощи специализированной программы АРМ СРЗА.



Зависимости удельных сопротивлений стальных тросов от величины тока

В ряде случаев тросы могут охватывать не всю длину линии, а только отдельные ее участки; например, подходящие к шинам подстанции. Для таких случаев в алгоритме расчета предусмотрена возможность ввода длин участков линии с тросом и без троса.

#### Библиографический список

1. **Руководящие** указания по релейной защите. – Вып. 11. – Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110 – 750 кВ.
2. **Небрат И.Л.** Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты: учеб. пособие. – СПб, 1996. – 54 стр.

*С.В. Козлов, студ.;*  
*рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доцент*

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ ТЕРМИНАЛА ВЛ 110 – 220 кВ

Необходимость решения задачи определения места короткого замыкания (ОМКЗ) на ВЛ средствами микропроцессорных терминалов релейной защиты требует выбора алгоритмов и оценки их эффективности.

Ввиду малой вероятности обрыва провода и сложности расчетов ОМП, в отечественной практике в качестве повреждений рассматриваются короткие замыкания, а так как 85 % из них являются однофазными, далее идет речь об определении места однофазного КЗ.

Фирмы-производители устройств РЗА включают в состав терминалов функцию ОМКЗ. Учет ограничений, связанных с техническими характеристиками терминала РЗА и связанных с ограниченной возможностью передачи параметров с противоположного конца ВЛ, заставляет ориентироваться на методы ОМКЗ по параметрам аварийного режима с использованием одностороннего замера. Причем используются не мгновенные, а интегральные параметры аварийного режима (действующее значение и фаза синусоидальной величины, представляемой вектором).

На ВЛ сложной конфигурации (наличие взаимоиндукции в коридоре и (или) ответвления с трансформатором, имеющим заземленную нейтраль) возникают особенности в применении известных методов. В ряде устройств применяется метод «мысленного переноса прибора» в другую точку.

Расчет расстояния до места КЗ при наличии взаимоиндуктивности ( $K_1$ , рис. 1, а) имеет вид:

$$l = \frac{\operatorname{Im}\left[\underline{U}_{\phi} / \underline{I}_0\right]}{\operatorname{Im}\left[\left(\underline{I}_{\phi} + \underline{K} \cdot \underline{I}_0 + \underline{dI}_m\right) \cdot \underline{Z}_{1y\delta} / \underline{I}_0\right]}; \quad (1)$$

$$\underline{K} = \left(\underline{Z}_{0y\delta} - \underline{Z}_{1y\delta}\right) / \underline{Z}_{1y\delta}; \quad (2)$$

$$\underline{dI}_m = \sum_{k=1}^{k=n} \left(\underline{Z}_{my\delta k} / \underline{Z}_{1y\delta}\right) \underline{I}_{0mk}, \quad (3)$$

где  $\underline{K}$  – коэффициент компенсации;  $\underline{dI}_m$  – компенсация от токов взаимоиндукции;  $\underline{Z}_{1y\delta}$  – удельное сопротивление прямой последовательности;  $\underline{Z}_{0y\delta}$  – удельное сопротивление нулевой последовательности;  $\underline{Z}_{my\delta}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции;  $\underline{I}_{0m}$  – ток нулевой последовательности взаимоиндуктивной цепи;  $n$  – количество взаимоиндуктивных цепей.

В выражении (1) в качестве поляризующей величины используется ток нулевой последовательности в месте установки прибора ( $\underline{I}_0$ ).

При КЗ за точкой  $N$  ( $K_2$ , рис. 1, а) производится перерасчет фазного напряжения для «мысленного переноса прибора»:

$$\underline{U}_{\phi N} = \underline{U}_{\phi} - \left(\underline{I}_{\phi} + \underline{K} \cdot \underline{I}_0 + \underline{dI}_m\right) \cdot \underline{Z}_{1y\delta} \cdot L_{mi}. \quad (4)$$

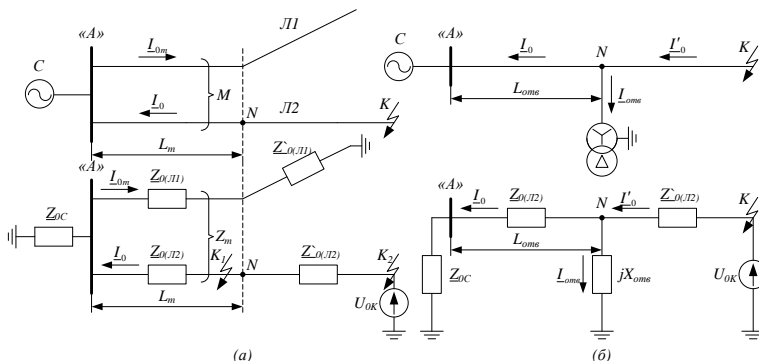


Рис. 1. Линия с взаимной индукцией (а) и с ответвлением (б)

Расстояние до места повреждения в этом случае:

$$l = L_m + \frac{\text{Im} \left[ \underline{U}_{\phi N} / \underline{I}_0 \right]}{\text{Im} \left[ \left( \underline{I}_{\phi} + \underline{K} \cdot \underline{I}_0 + \underline{d}l'_m \right) \cdot \underline{Z}_{1\gamma\delta} / \underline{I}_0 \right]}, \quad (5)$$

где  $\underline{d}l'_m$  – компенсация от токов взаимной индукции начиная с точки мысленного переноса прибора (N).

При наличии ответвления на линии (рис. 1, б) необходим так же перерасчет тока нулевой последовательности и фазного тока за ответвлением. Значение тока нулевой последовательности и фазного тока после ответвления:

$$\underline{I}'_0 = \underline{I}_0 + \frac{\underline{U}_0 + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0\gamma\delta} \cdot L_{омс}}{jX_{омс}}; \quad (6)$$

$$\underline{I}'_{\phi} = \underline{I}_{\phi} + \frac{\underline{U}_0 + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0\gamma\delta} \cdot L_{омс}}{jX_{омс}}. \quad (7)$$

Приняв

$$\alpha = \frac{\frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} + \underline{Z}_{0\gamma\delta} L_{омс}}{jX_{омс}}, \quad (8)$$

получим

$$\underline{I}'_0 = (1 + \alpha)\underline{I}_0, \quad (9)$$

$$\underline{I}'_\phi = \underline{I}_\phi + \alpha\underline{I}_0. \quad (10)$$

Расчет расстояния до места КЗ за ответвлением производится по выражению:

$$l = L_{омс} + \frac{\operatorname{Im}\left[\left(\underline{U}_\phi - \left(\underline{I}_\phi + \underline{K} \cdot \underline{I}_0\right) \cdot \underline{Z}_{1\gamma\delta} \cdot L_{омс}\right) / (1 + \alpha)\underline{I}_0\right]}{\operatorname{Im}\left[\left(\underline{I}_\phi + \alpha\underline{I}_0 + \underline{K}(1 + \alpha)\underline{I}_0\right) \cdot \underline{Z}_{1\gamma\delta} / (1 + \alpha)\underline{I}_0\right]}. \quad (11)$$

При комбинации факторов усложнения конфигурации (взаимоиндукции и ответвления) расчетное выражение принимает вид:

$$l = L_m + \frac{\operatorname{Im}\left[\left(\underline{U}_\phi - \left(\underline{I}_\phi + \underline{K} \cdot \underline{I}_0 + \underline{dI}'_m\right) \cdot \underline{Z}_{1\gamma\delta} \cdot L_m\right) / (1 + \alpha)\underline{I}_0\right]}{\operatorname{Im}\left[\left(\underline{I}_\phi + \alpha\underline{I}_0 + \underline{K}(1 + \alpha)\underline{I}_0 + \underline{dI}'_m\right) \cdot \underline{Z}_{1\gamma\delta} / (1 + \alpha)\underline{I}_0\right]}. \quad (12)$$

На основании выведенного расчетного выражения для определения места однофазного КЗ строится алгоритм для микропроцессорного терминала РЗА. Упрощенная блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

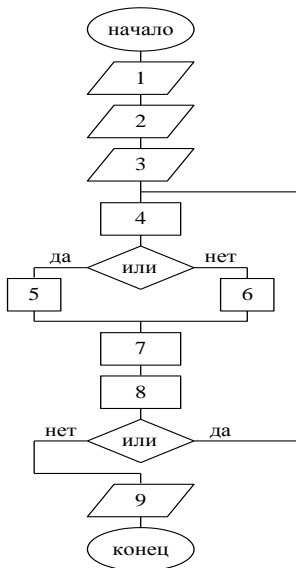


Рис. 2. Упрощенная блок-схема алгоритма

Этапы расчета:

1) Линия делится на участки, различающиеся по значению взаимоиндукции и(или) наличию ответвления.

2) Предварительно рассчитываются параметры каждого участка.

3) При возникновении КЗ измеряются значения токов и напряжений нулевой последовательности, а так же фазных токов и напряжений в месте установки приборов.

4) На основании этих данных производится расчет по приведенному алгоритму.

Ход выполнения алгоритма:

1) Ввод исходных данных (1-й и 2-й блоки работают в интерактивном режиме):

– в 1-м блоке блок-схемы производится ввод количества участков линии, их длина ( $L_i$ ), удельные сопротивления прямой ( $Z_{ly0}$ ) и нулевой последовательности ( $Z_{0y0}$ ), а так же удельные сопротивления взаимоиндукции ( $Z_{my0}$ );

– Во 2-м блоке вводятся номера участков, перед которыми есть ответвления, и реактивные сопротивления на этих ответвлениях ( $jX_{ome}$ ).

– В 3-м блоке производится ввод значений токов и напряжений нулевой последовательности ( $I_0, U_0$ ), фазных токов и напряжений ( $I_{\phi}, U_{\phi}$ ) и токов нулевой последовательности во взаимоиндуктивных цепях ( $I_{0m}$ ), измеренных во время КЗ.

2) Расчетная часть:

– В 4-м блоке производится расчет коэффициента компенсации по выражению (2) и компенсация от токов взаимоиндукции по выражению (3).

– Если рассматриваемый участок имеет ответвление, то рассчитывается коэффициент  $\alpha$  по выражению (8) (блок 5), если нет, то  $\alpha = 0$  (блок 6).

– В 7-м блоке производится корректировка напряжения по выражению (4). Если расчет ведется на первом участке, то напряжение не корректируется.

– В 8-м блоке рассчитывается расстояние по выражению (12). На первом участке принимается  $L_m = 0$ .

– Если выполняется условие  $l > L$  ( $L$  – сумма длин участков линии до рассматриваемого включительно), то выполняется переход к рассмотрению следующего участка линии и расчетная часть выполняется снова. Если нет, то в 9-м блоке производится вывод рассчитанного расстояния.

### Вывод

В работе сформулировано обобщенное выражение для определения места однофазного КЗ по односторонним замерам линий сложной конфигурации (12) и сформирован алгоритм для программы расчета.



Библиографический список

1. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

*Д.Н. Кокоулин, асп.;*  
*рук. Л.М. Колесов, к.т.н., доцент, В.А. Шуин, д.т.н., профессор*

**АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ВЫДЕЛЕНИЯ  
АВАРИЙНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В УСТРОЙСТВАХ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИЙ**

Важной вехой в развитии мировой электроэнергетики стал переход устройств РЗА на микропроцессорную элементную базу, которая позволила не только перейти к новой идеологии построения устройств релейной защиты (интеграция различных функций в одно устройство), но и открыла новые возможности для разработчиков устройств релейной защиты в части создания новых алгоритмов работы. Одним из таких методов является определение короткого замыкания по факту появления аварийных составляющих токов (приращение токов).

Устройства, предназначенные для выделения аварийной составляющей, получили наименование фильтров аварийных составляющих. Они решают задачу контроля приращения контролируемой величины. Одно из наиболее актуальных их применений пусковые органы блокировки при качаниях.

В данной статье рассматривается наглядное отличие режима качаний от режима короткого замыкания на основе сравнения аварийных составляющих фазных токов.

Анализ аварийных составляющих фазных токов будем проводить на простейшем участке электрической сети, приведенной на рис. 1.

Анализируем три алгоритма нахождения аварийной составляющей.

$i(t)_{ав1} = i(t) - 2 \cdot i(t - T) + i(t - 2 \cdot T)$  – формула для нахождения аварийной составляющей по первому алгоритму.

$i(t)_{ав2} = i(t) - \frac{i(t - T) + i(t - 2 \cdot T)}{2}$  – формула для нахождения аварийной составляющей по второму алгоритму.

$i(t)_{ав3} = i(t) + i(t - T) - 2 \cdot i(t - 2 \cdot T)$  – формула для нахождения аварийной составляющей по третьему алгоритму.

Проблема анализа аварийных составляющих возникает в тех случаях, когда режим непериодический или появление аварийной составляющей

щей связано с бросками токов, в результате включения нагрузки. Например, режим качаний, когда ток состоит из колебаний двух близких частот. Возможен такой режим, при котором амплитуда мгновенного значения фазного тока превышает амплитуду мгновенного значения тока короткого замыкания. Это справедливо и для действующих значений токов. При этом режим качаний не является аварийным и не должен быть отключен защитой до определенного момента (момент при котором возможен выход части системы из синхронизма).

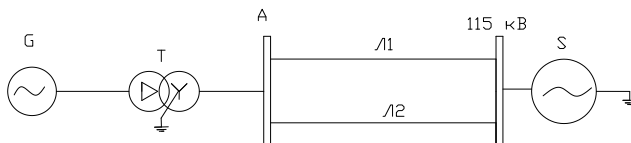


Рис. 1. Участок электрической сети

Для наглядного отличия режима качаний и режима короткого замыкания вводим понятие коэффициента «качаний» и коэффициента «короткого замыкания».

$$K_{\text{кач}} = \frac{I_{\text{дейст. авар. кач}}}{\text{MAX}(I_{\text{действ. кач.}})}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{кач}}$  – коэффициент «качаний» – отношение действующего значения аварийной составляющей тока в режиме качаний к максимальному действующему значению тока качаний;  $I_{\text{дейст. авар. кач}}$  – действующее значение аварийной составляющей в режиме качаний;  $\text{MAX}(I_{\text{действ. кач.}})$  – максимальное действующее значение тока качаний.

$$K_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{дейст. авар. кз}}}{I_{\text{действ. кз.}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{кз}}$  – коэффициент короткого замыкания – отношение действующего значения аварийной составляющей тока в режиме короткого замыкания к действующему значению тока короткого замыкания;  $I_{\text{дейст. авар. кз}}$  – действующее значение аварийной составляющей в режиме качаний;  $I_{\text{действ. кз.}}$  – максимальное действующее значение тока короткого замыкания.

Построим графическую зависимость отношения коэффициента короткого замыкания к коэффициенту качаний для трех анализируемых алгоритмов нахождения аварийных составляющих, см. рис. 2.

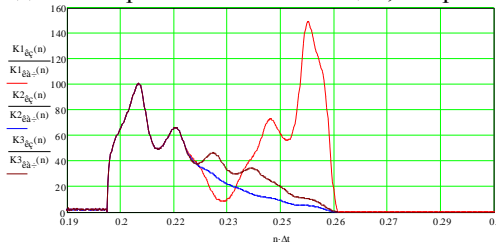


Рис. 2. Зависимость отношения коэффициента короткого замыкания к коэффициенту качаний

Как можно заметить из рис. 2. коэффициент короткого замыкания в 100 раз (за первые полпериода) превышает коэффициент «качаний». Коэффициент короткого замыкания прямо пропорционален действующему значению аварийной составляющей в режиме короткого замыкания, а коэффициент «качаний» прямо пропорционален действующему значению аварийной составляющей в режиме качаний. Можно однозначно заключить, что аварийная составляющая в режиме короткого замыкания превышает значение аварийной составляющей в режиме качаний. Следовательно, защита сработает при коротком замыкании и не сработает в режиме качаний, в том случае, если пусковой орган будет отстроен от аварийной составляющей в режиме качаний.

Все три алгоритма первый период работают одинаково, на втором и третьем периоде первый алгоритм вычисляет аварийную составляющую лучше остальных.

Для дальнейшего анализа введем функцию  $F$ , которую определим следующим образом:

$$F1 = \frac{K1_{кз} - K1_{кач}}{100}, \quad (3)$$

где  $F1$  – функция, определяющая, на сколько действующее значение аварийной составляющей для режима короткого замыкания больше действующего значения аварийной составляющей для режима качаний;  $K1_{кз}$  – коэффициент «короткого замыкания», найденный по первому алгоритму;  $K1_{кач}$  – коэффициент «качания», найденный по первому алгоритму.

Данную функцию находим для трех анализируемых алгоритмов.

Можно прийти к выводу, что коэффициент качания зависит от частоты скольжения, так как от частоты скольжения зависит аварийная составляющая тока в режиме качания.

Проанализируем поведение трех алгоритмов нахождения аварийной составляющей с учетом следующих факторов:

- амплитуда тока в режиме качания превышает амплитуду тока для режима короткого замыкания;

- частота скольжения меняется от 0 до 10 Гц.

Анализ проводим с помощью функции, найденной по выражению (3).

Графическая зависимость функции  $F$  от частоты скольжения приведена на рис. 3.

Данная функция позволяет сделать следующие выводы об алгоритмах вычисления:

- если функция  $F$  имеет отрицательный знак, то это говорит о том, что действующее значение аварийной составляющей для режима качаний превышает действующее значение аварийной составляющей тока для режима короткого замыкания;

- чем больше значение функции  $F$  при определенной частоте скольжения, тем больше разница между максимальными действующими значениями аварийных составляющих для режима качания и короткого замыкания.

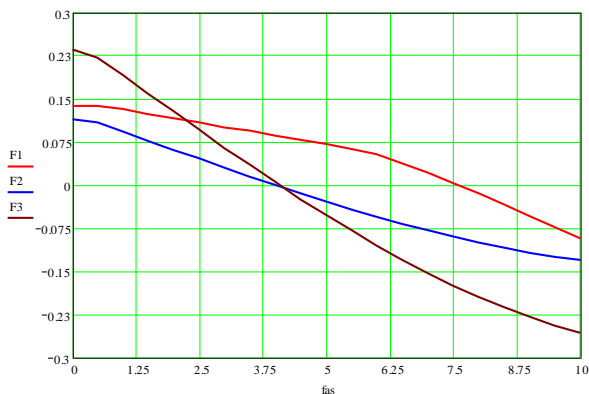


Рис. 3. Функция  $F$  в зависимости от частоты скольжения:  $F1$  – функция, найденная по первому алгоритму;  $F2$  – функция найденная по второму алгоритму;  $F3$  – функция, найденная по третьему алгоритму

## Выводы

1. Из рис. 3. следует, что, начиная с частоты скольжения 4 Гц  $F3$  и  $F2$  приобретают отрицательный знак, а  $F1$  с частоты 7,5 Гц. Этот факт говорит о том, что действующее значение аварийной составляющей в режиме качаний превышает действующее значение аварийной составляющей для режима качаний. Релейная защита в этом случае режим качаний будет считать аварийным режимом.

2. Как можно заметить при частоте скольжения 0,5 Гц (соответствует периоду качания 2 с) наибольшее значение имеет функция  $F3$ . Это говорит о том, что при данной частоте скольжения разница между максимальным действующим значением аварийной составляющей для режима короткого замыкания и максимальным действующим значением аварийной составляющей для режима качаний, наибольшая, то есть ПО защиты лучше отличает режим короткого замыкания от режима качаний.

3. На основе анализа делаю заключение, что наилучшим алгоритмом для нахождения аварийной составляющей является алгоритм номер три  $i(t)_{авз} = i(t) + i(t-T) - 2 \cdot i(t-2 \cdot T)$

4. Метод выделения аварийных составляющих из фазных токов находит широкое применение в микропроцессорных устройствах РЗ.

5. Аварийная составляющая тока присутствует при любом коротком замыкании, что делает этот метод достаточно универсальным.

## Библиографический список

1. **Дьяконов А.Ф.**, Овчаренко Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учеб. пособие для студентов вузов. – М: Изд-во МЭИ, 2000. – 199 с.

2. **Федосеев А.М.**, Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов. – М: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

*Ю.В. Макаров, студ.;*  
*рук. А.В. Гусенков, к.т.н., доцент*

## ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАЩИТ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ LABVIEW

Токковые защиты со ступенчато-зависимыми характеристиками выдержки времени – это наиболее простые и дешевые устройства релейной

защиты, широко используемые (особенно в радиальных распределительных сетях напряжением 35 кВ и ниже) для защиты элементов электрической сети от коротких замыканий (КЗ).

Токовые защиты реагируют на ток в защищаемом элементе и приходят в действие при превышении током в месте их включения некоторого заранее установленного значения (уставки). Основными элементами токовой защиты являются реле тока, реле времени и промежуточное реле. Защита может действовать на отключение поврежденного элемента сети без выдержки времени (токовая отсечка (ТО)) или с выдержкой времени (токовая отсечка с выдержкой времени (ТОВ), максимальная токовая защита (МТЗ)) [1].

Изучение токовых защит со ступенчато-зависимыми характеристиками выдержки времени предусмотрено учебными планами для студентов практически всех специальностей электроэнергетического факультета как очной, так и заочной форм обучения. Для этого на кафедре АУЭС имеется лабораторный стенд Р-1 [2].

Стенд существует в единственном экземпляре, изготовлен около 20 лет назад и имеет значительную степень износа установленного оборудования. Замена стенда пока не предусмотрена, поэтому актуальным является поиск альтернативных решений по замене этого лабораторного стенда с минимальными материальными затратами, но с сохранением его функциональных возможностей.

Разработка нового лабораторного стенда особенно актуальна для студентов заочной формы обучения, для которых в отличие от студентов очной формы обучения планируется значительно меньшее количество аудиторных занятий, но больший объем самостоятельной работы.

Наиболее простым и перспективным решением является использование для выполнения лабораторного стенда одного из математических пакетов визуального моделирования. Анализ возможностей различных систем моделирования показал, что наиболее приемлемой для реализации виртуального лабораторного стенда является среда графического программирования LabVIEW [3].

Среда графического программирования LabVIEW – самый популярный в мире программный продукт для разработки систем сбора данных, их анализа, обработки и визуализации, в котором для создания приложений используются графические средства, вместо традиционного текстового кода. От пользователя пакета LabVIEW не требуется знаний языков программирования. Все действия по разработке сводятся к простому построению структурной схемы приложения в интерактивной графической среде с набором всех необходимых библиотечных образов, из которых собираются объекты, называемые виртуальными инструментами.

Выбор пакета определяется также тем, что это один из немногих лицензионных продуктов, имеющих в ИГЭУ.

Использование современных информационных технологий позволяет организовать необходимое количество рабочих мест и отказаться от практики бригадного выполнения лабораторных работ студентами, сделав упор на развитие навыков индивидуальной самостоятельной работы студентов.

Таким образом, основными целями работы являются:

1. Разработка виртуального лабораторного стенда для исследования токовых ступенчатых защит;

2. Повышение качества учебного процесса на основе повышения роли индивидуальной самостоятельной работы студентов.

Разработка нового виртуального лабораторного стенда особенно актуальна для студентов заочной формы обучения, для которых, в отличие от студентов очной формы обучения, планируется значительно меньшее количество аудиторных занятий, но больший объем самостоятельной работы.

В настоящее время на факультете заочного и вечернего обучения (ФЗВО) введено в эксплуатацию Интернет-приложение «Виртуальный методический кабинет» (ВМК), обеспечивающее выполнение функций размещения учебно-методических и нормативно-справочных материалов, полнотекстового поиска и доступа студентов и преподавателей к информационным ресурсам ВМК в режиме многопользовательского авторизованного ролевого доступа.

В целях предоставления студентам максимальной возможности самостоятельной работы с учебными материалами, разработанное программное обеспечение виртуального лабораторного стенда будет, прежде всего, размещено на сервере ФЗВО для использования студентами ФЗВО всех энергетических специальностей круглосуточно в режиме удаленного доступа через Internet.

Для достижения поставленных целей в процессе выполнения работы решаются следующие основные задачи:

1. Составление принципиальной схемы участка электрической сети;
2. Составление схемы замещения;
3. Составление и решение системы уравнений для нахождения токов КЗ в отдельных элементах системы с учетом состояния коммутационных элементов (выключателей и ключей КЗ);
4. Разработка лицевой панели и блок – диаграммы виртуального лабораторного стенда;
5. Отладка программного обеспечения;
6. Размещение программного обеспечения в информационных ресурсах виртуального методического кабинета ФЗВО.
7. Опытная эксплуатация разработанного программного обеспечения.

## 8. Использование в учебном процессе.

В качестве исходной схемы участка электрической сети принята схема лабораторного стенда Р-1, состоящая из трех радиальных линий электропередачи и трансформаторной подстанции [2]. Принципиальная схема сети приведена на рис. 1.

На каждой из линий Л1, Л2, Л3 установлены трехступенчатые токовые защиты (ТО, ТОВ, МТЗ) 1, 2 и 3 соответственно. На трансформаторе Т установлена продольная дифференциальная токовая защита (основная защита) и МТЗ (резервная защита). Упрощенная схема сети используется для отработки алгоритмов функционирования виртуального лабораторного стенда. В дальнейшем принципиальную схему стенда планируется видоизменить, с тем, чтобы согласовать ее со схемой электрической сети, используемой студентами ФЗВО для расчета токовых защит линий в курсовой работе. Тем самым студенты получают возможность рассчитать уставки защит в соответствии со своим вариантом задания курсовой работы, а затем, используя заданные параметры элементов сети и полученные уставки, проверить эффективность функционирования защиты в различных режимах работы. Среда графического программирования LabVIEW позволяет задавать практически неограниченное количество вариантов (индивидуально для каждого студента).

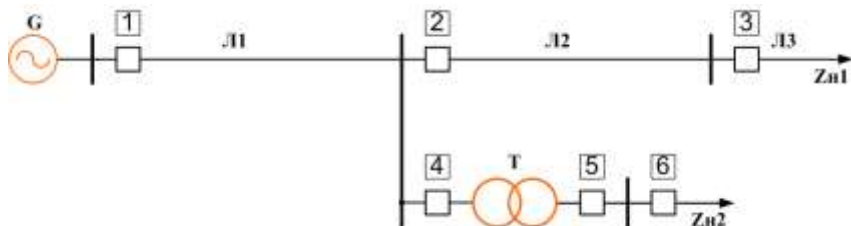


Рис. 1. Принципиальная схема участка электрической сети

На основе исходной схемы сети составлена ее схема замещения с учетом наличия 6 выключателей и ключа КЗ. Схема замещения электрической сети изображена на рис. 2 .

В схеме предусмотрена возможность задания коротких замыканий в 16 промежуточных узлах.

Расчет токов в нормальном нагрузочном режиме и в режимах КЗ в выключателях схемы и ключе КЗ, а также напряжений в узлах схемы ведется модифицированным методом узловых потенциалов.



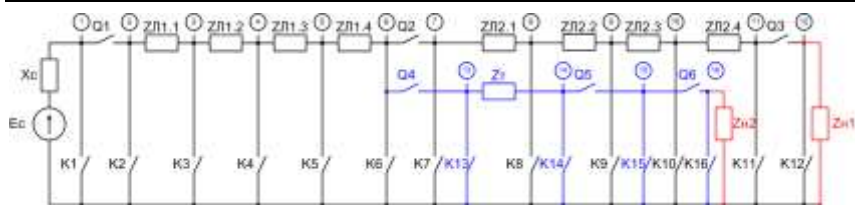


Рис 2. Схема замещения участка электрической сети

Решение полученного матричного уравнения производится встроенными средствами LabVIEW.

На рис. 3 а, б в качестве примера приведена блок-схема формирования подматрицы положения ключей КЗ.

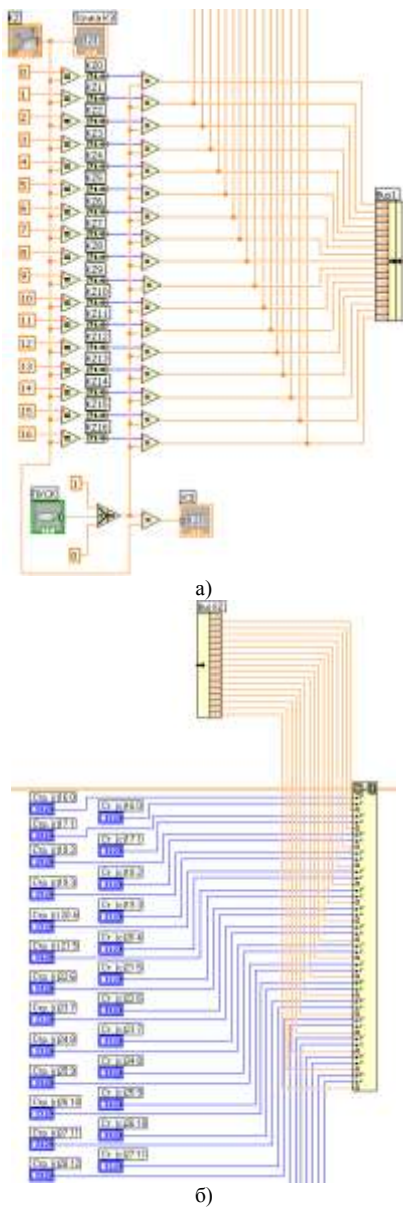


Рис. 3. Формирование подматрицы положения ключей КЗ

Созданная программа позволяет вводить параметры исследуемой электрической сети, включать и отключать выключатели, моделировать КЗ в заданных узлах схемы, получать значения токов во всех ветвях схемы, а также напряжения во всех узлах в режиме реального времени.

Расчет напряжений в узлах схемы позволяет в дальнейшем нарастить функциональные возможности схемы (например, использовать в качестве защиты отдельных элементов защиты с пуском по напряжению).

Интерфейс разработанной программы является наглядным и интуитивно понятным, что облегчает процесс выполнения работы и вызывает интерес у пользователя. Лицевая панель разработанного виртуального стенда показана на рис. 4.

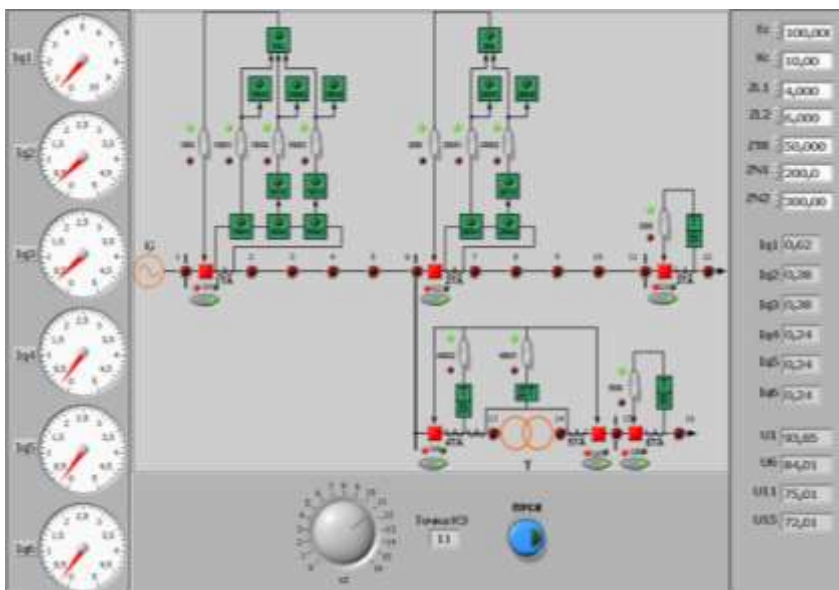


Рис 4. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда

## Выводы

1. Использование графической среды визуального моделирования LabVIEW позволяет выполнить виртуальный лабораторный стенд для исследования токовых ступенчатых защит, обладающий большими функциональными возможностями по сравнению с существующим на кафедре АУЭС лабораторным стендом.

2. Виртуальный лабораторный стенд обеспечивает повышение качества самостоятельной работы студентов по дисциплине «Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем» на факультете заочного и вечернего обучения (ФЗВО) на основе использования современных информационных технологий и может использоваться в учебном процессе для студентов очной формы обучения.

#### Библиографический список

1. **Гусенков А.В.**, Коротков В.Ф. Расчет токовых защит линий в радиальных распределительных электрических сетях 6 – 35 кВ: метод. указания №1883. – Иваново, 2007.
2. **Лебедев О.В.** Исследование МТЗ с независимой характеристикой: метод. указания к лабораторных работе Р-1. – Иваново, 1979.
3. **Тревис Дж.**, Кринг Дж. LabVIEW для всех. – М., ДМК Пресс, 2008 – 880 с.

*О.А. Сарбеева, Е.С. Чугрова, магистранты;  
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.*

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 – 10 кВ

**Введение.** Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в кабельных сетях 6 – 10 кВ (70 – 90 % от общего числа электрических повреждений) и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Поэтому от эффективности функционирования защит от этого вида повреждений существенно зависит надежность электрооборудования потребителей.

Все устройства защиты от ОЗЗ можно разделить на 2 большие группы:

1) устройства, основанные на использовании электрических величин нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ (токи и напряжения промышленной частоты, естественные высшие гармоники, «наложенные» токи непромышленной частоты);

2) устройства, основанные на использовании электрических величин переходного процесса.

На функционирование устройств защиты от ОЗЗ существенное влияние оказывают электромагнитные переходные процессы, возникающие в момент пробоя изоляции фазы сети на землю.

Для защит 1-й группы токи и напряжения переходного процесса представляют собой сигналы помехи, которые могут привести к отказам функционирования (излишним срабатываниям, отказам срабатывания).

Для устройств 2-й группы электрические величины переходного процесса представляют собой информационные сигналы, по параметрам которых определяется поврежденное присоединение.

Для решения задач, связанных с исследованием влияния электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ на функционирование защит 1-й группы и повышением динамической устойчивости их функционирования, и задач, связанных с разработкой и повышением эффективности функционирования защит 2-й группы, представляют интерес основные информационные параметры переходных токов и напряжений при ОЗЗ и их зависимости от основных влияющих факторов.

К основным информационным характеристикам переходных токов ОЗЗ относятся:

- значения токов и напряжений переходного процесса (амплитуды переходных токов и напряжений, интегральные значения переходных токов);
- частотные характеристики токов переходного процесса (спектр частот токов переходного процесса, амплитудно-частотные характеристики, частотно-энергетические характеристики).

Основные факторы, влияющие на значения и частоты электрических величин переходного процесса – это суммарный емкостный ток сети  $I_{C\Sigma}$ , индуктивность источника питания, удаленность места ОЗЗ от шин источника питания, режим заземления нейтрали сети (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор, высокоомное заземление нейтрали через резистор).

**Метод исследований.** Для получения информационных параметров электрических величин переходного процесса, определения диапазона их изменения и исследования влияния на них указанных выше факторов в данной работе использовались:

- аналитическое решение для уравнений переходного процесса при ОЗЗ, полученное в [1] для двухчастотной схемы замещения электрической сети 6 – 10 кВ радиальной конфигурации (для случая «малых потерь» в контуре нулевой последовательности электрической сети);
- математическое моделирование переходных процессов при ОЗЗ в программах Matlab и Mathcad с использованием указанной выше упрощенной модели электрической сети 6 – 10 кВ.

**Уравнения переходного процесса при ОЗЗ для двухчастотной схемы замещения электрической сети 6 – 10 кВ.** Исследования, проведенные в реальных электрических сетях 6 – 10 кВ и на математических моделях, показали, что в переходных токах при ОЗЗ преобладают две частотные составляющие, связанные соответственно с разрядом емкостей поврежденной фазы сети (разрядная составляющая) и с подзарядом емкостей неповрежденных фаз сети (зарядная составляющая), например, [1, 2

и др.]. Указанным двум свободным составляющим соответствует т.н. двухчастотная схема замещения (рис. 1).

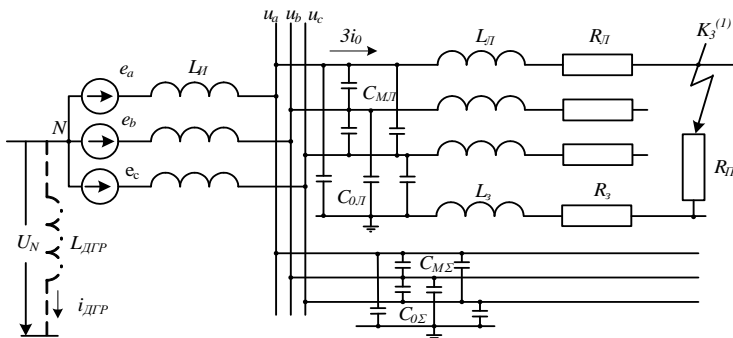


Рис. 1. Двухчастотная схема замещения радиальной кабельной сети 6 – 10 кВ для анализа переходных процессов при ОЗЗ

Для сети по рис. 1, работающей с изолированной нейтралью, для напряжения нулевой последовательности уравнение имеет следующий вид [1]:

$$u_0(t) = u_{np} + u_p + u_3 = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{mp} e^{-\delta_p t} \sin(\omega_p t + \varphi_p) - U_{m3} e^{-\delta_3 t} \sin(\omega_3 t + \varphi_3); \quad (1)$$

$$U_{mp} = U_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p}; \quad (2)$$

$$U_{m3} = U_m a_2 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3}, \quad (3)$$

где  $u_{np}$  – принужденная составляющая переходного напряжения  $u_0(t)$ ;  $u_p$  – разрядная составляющая напряжения  $u_0(t)$ ;  $u_3$  – зарядная составляющая напряжения  $u_0(t)$ ;  $\omega_p$  – частота разрядных колебаний;  $\omega_3$  – частота зарядных колебаний;  $\delta_p$  – постоянная затухания разрядных колебаний;  $\delta_3$  –

постоянная затухания зарядных колебаний;  $\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}$ ;

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\omega_3 \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_3 \sin \varphi}; \quad a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

Частоты  $\omega_p$ ,  $\omega_3$  и постоянные затухания  $\delta_p$ ,  $\delta_3$  разрядных и зарядных колебаний определяются из следующих уравнений [1]:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \cdot \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \cdot \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}}; \quad (4)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \cdot \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \cdot \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}}; \quad (5)$$

$$\delta_p = \alpha \cdot \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2 \cdot (2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \cdot \omega_1^2)}; \quad (6)$$

$$\delta_3 = \alpha \cdot \frac{\omega_3^2 - \omega_2^2}{2 \cdot (2\omega_3^2 - \omega_2^2 - k_c \cdot \omega_1^2)}, \quad (7)$$

где  $\alpha_1 = R_1/L_1$ ;  $\omega_1^2 = 1/L_1 C_1$ ;  $\omega_2^2 = 1/L_2 C_2$ ;  $k_c = 1 + C_1/C_2$ ;  $L_1 = 3L_{Л1} + L_3$ ;  $C_1 = C_{0\Sigma} + C_{0Л1}$ ;  $L_2 = 2L_{Л2}$ ;  $C_2 = 0,5[C_{0\Sigma} + C_{0Л2} + 3(C_{М\Sigma} + C_{МЛ})]$ ;  $R_1 = 3R_{Л1} + R_3 + 3R_{Л2}$ .

Переходный ток ОЗЗ в месте повреждения для сети с изолированной нейтралью пропорционален производной напряжения  $u_0(t)$

$$3i_0 = -3C_1 du_0/dt = i_{np} + i_3 + i_p = 3C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3); \quad (8)$$

$$I_{mp} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_p a_1 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}{\omega_p^2 + \delta_p^2}}; \quad (9)$$

$$I_{m3} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_3 a_2 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}{\omega_3^2 + \delta_3^2}}, \quad (10)$$

где  $\theta_{p,3} = \varphi_{p,3} + \arctg \frac{\delta_{p,3}}{\omega_{p,3}}$ .

Основные влияющие на информационные параметры токов переходного процесса при ОЗЗ факторы соответственно определяют значения следующих параметров, входящих в уравнения (1) – (10):

суммарный емкостный ток сети  $I_{C\Sigma}$  – значения  $C_1$  и  $C_2$ ;

индуктивность источника питания – значение  $L_2$ ;

удаленность точки ОЗЗ от шин – значения  $R_1$  и  $L_1$ .

**Модель электрической сети 6 – 10 кВ в системе моделирования Matlab.** Моделирование в системах Matlab и Mathcad использовалось для проверки точности аналитического решения и упрощения сложных расчетов, а также для исследования влияния на информационные параметры электрических величин переходного процесса больших значений сопротивления  $R_{II}$  в месте повреждения. Для этого модель сети в системе Matlab дополнена инструментальными средствами для вычисления интегральных переходных токов (рис. 2).

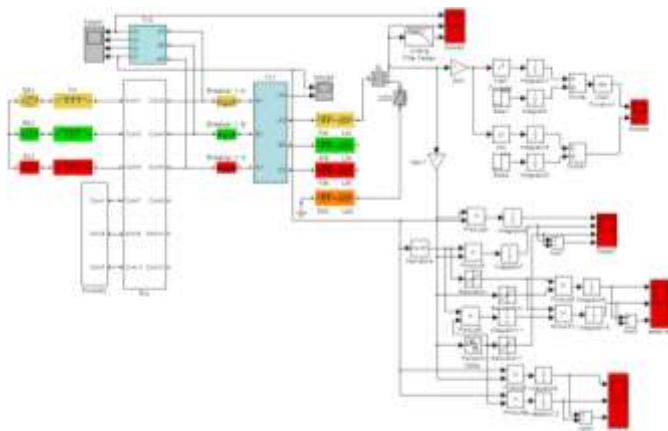


Рис. 2. Модель сети 6 – 10 кВ в системе Matlab, дополненная инструментальными средствами для вычисления интегральных характеристик электрических величин токов переходного процесса

Кроме элементов электрической сети, соответствующих схеме замещения по рис. 2, модель содержит также средства измерения фазных напряжения и токов и составляющих нулевой последовательности, трехфазный выключатель в цепи линии и ключ для имитации основных разновидностей неустойчивых ОЗЗ (однократный пробой изоляции, дуговое прерывистое ОЗЗ по теории Петерсена, Петерса и Слепяна или Белякова Н.Н. [2]).

**Амплитуды и соотношения значений свободных составляющих напряжения переходного процесса при ОЗЗ.** Амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного напряжения нулевой последова-



тельности определяются по уравнениям (2) и (3). На рис. 3 приведены полученные по уравнениям (1) – (3) составляющие напряжения нулевой последовательности в переходном режиме ОЗЗ.

Из рис 3 можно видеть, что при небольших удаленностях места ОЗЗ от шин и малом затухании отношение  $\frac{U_{mp}}{U_{m3}} \approx 1$  и практически не зависит от суммарного емкостного тока сети. Наиболее существенное влияние на соотношение оказывает удаленность  $l_3$  точки ОЗЗ от шин (рис. 4).

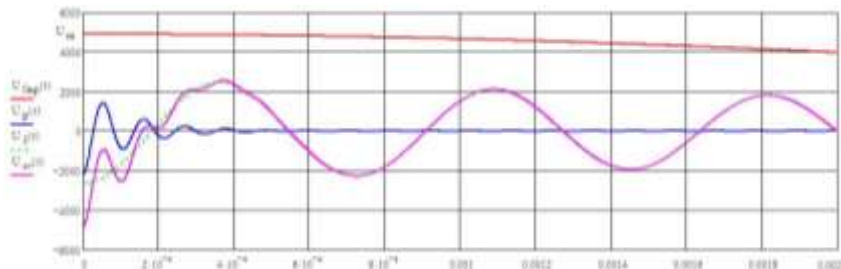


Рис. 3. Напряжения переходного процесса при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C3} = 30$  А, удаленности места ОЗЗ от шин  $l_3 = 1$  км и  $\varphi = 90^\circ$

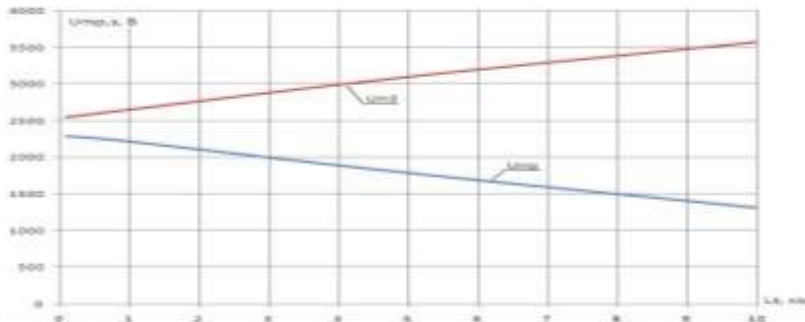


Рис. 4. Зависимости амплитудных значений зарядной и разрядной составляющих напряжений от расстояния до места повреждения

При увеличении расстояния до месте замыкания, т.е. при уменьшении частот  $f_3$  и  $f_p$ ,  $U_{m3}$  увеличивается, а  $U_{mp}$  уменьшается. Из приведенных соотношений можно сделать вывод, неучет действительных соотношений между  $U_{m3}$  и  $U_{mp}$ , как это имеет место в применяемых часто для расчетов токов переходных процессов одночастотных схемах замещения сети (например, [3 и др.]), учитываемых только зарядную составляющую

тока и напряжения нулевой последовательности, может привести к значительным ошибкам в оценке их амплитуд.

**Амплитуды переходных токов при ОЗЗ.** Амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного тока нулевой последовательности определяются по уравнениям (9) и (10). На рис. 5 приведены полученные по уравнению (8) ток переходного процесса при ОЗЗ и его составляющие.

Из рис. 5 можно видеть, что при малых потерях в контуре нулевой последовательности сети 6 – 10 кВ, когда разрядная составляющая переходного тока при ОЗЗ сохраняет колебательный характер,  $I_{mp} \gg I_{mz}$  и амплитуда полного переходного тока  $I_{mпер}$  определяется в основном значением  $I_{mp}$  и может быть определена как значение тока  $3i_0$  при  $t_m = 1/4f_p$  по выражению (8).

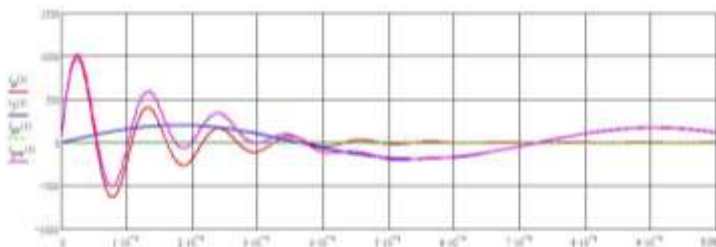


Рис. 5. Токи переходного процесса при ОЗЗ в сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 30$  А, удаленности места ОЗЗ от шин  $l_s = 1$  км и  $\varphi = 90^\circ$

Наиболее существенное влияние на амплитуду  $I_{mz}$  зарядной составляющей тока переходного процесса оказывает величина суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma}$  и индуктивности источника питания  $L_n$  (просто определяемая по значению тока трехфазного КЗ на шинах), на амплитуду разрядного составляющей  $I_{mp}$  – величина  $I_{C\Sigma}$  и удаленность точки ОЗЗ от шин (рис. 6, 7).

Расчеты показали, что при изменении суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma}$  от 5 до 100 А, тока трехфазного КЗ на шинах источника питания от 5 до 20 кА и удаленности места ОЗЗ от шин от 0,1 до 10 км амплитуда разрядного тока  $I_{mp}$  и полного тока переходного процесса  $I_{mпер}$  может изменяться в пределах от сотен ампер до ~3 кА, амплитуда зарядного тока – до ~1 кА.

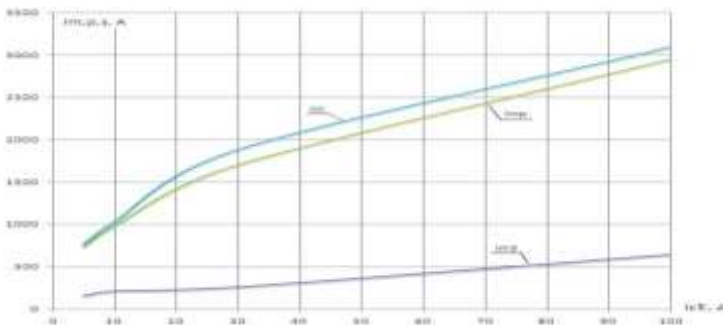


Рис. 6. Зависимости амплитудных значений зарядной, разрядной составляющих и амплитуды полного тока от суммарного емкостного тока  $I_{C\Sigma}$  кабельной сети напряжением 6 кВ при  $l_3 = 1$  км и  $\varphi = 90^\circ$

Из рис. 7 можно видеть, больших удаленностях  $l_3$  места ОЗЗ от шин амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного тока становятся соизмеримыми.

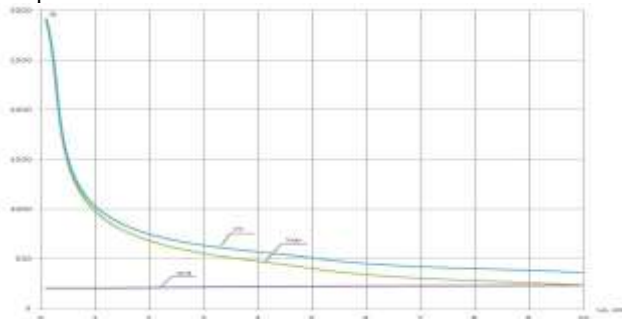


Рис. 7. Зависимости амплитудных значений зарядной, разрядной составляющих и амплитуды полного тока от расстояния  $l_3$  до места повреждения в кабельной сети 6 кВ при  $I_{C\Sigma} = 30$  А и  $\varphi = 90^\circ$

**Интегральные значения токов переходного процесса.** Наиболее широкое применение в электрических сетях 6 – 10 кВ получили токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), реагирующие на интегральные значения (например, эффективное, среднее по модулю) значения тока нулевой последовательности в защищаемом присоединении. ТЗНП с измерительными органами на электромеханической базе и большинство исполнений микропроцессорных ТЗНП реагируют на эффективное значение контролируемого тока. В микроэлектронных и микропроцессорных исполнениях для действия ТЗНП могут быть использованы также средние по модулю значения контролируемых токов нулевой последовательности.

Для исследования динамической устойчивости функционирования различных исполнений ТЗНП, а также некоторых исполнений токовых направленных защит от ОЗЗ представляют интерес интегральные значения переходных токов при однократном пробое изоляции (рис. 8) и дуговым перемежающемся ОЗЗ (рис. 9).

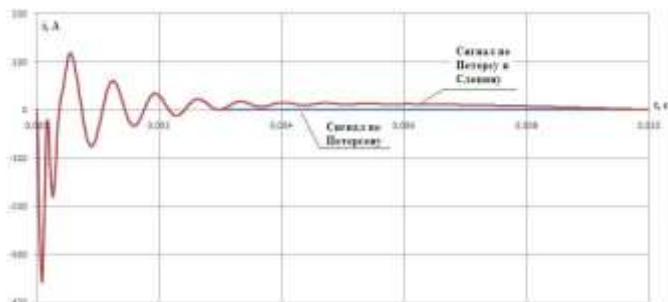


Рис. 8. Однократные пробое изоляции с гашениями заземляющей дуги при переходе через нуль тока свободных колебаний (теория Петерсена) и при переходе через нуль тока промышленной частоты (теория Петерса и Слепяна)

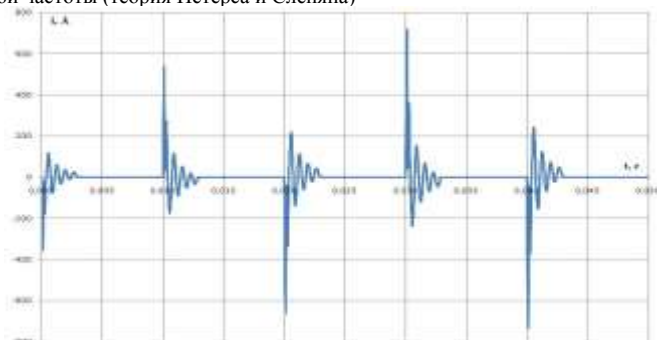


Рис. 9. Перемежающееся дуговое ОЗЗ по теории Петерсена с повторными пробоями изоляции каждый полупериод промышленной частоты

Для однократного пробоя изоляции с гашением дуги при последнем переходе через нуль тока свободных колебаний (худший случай по условиям отстроенности ТЗНП от внешних ОЗЗ) из уравнений (8) – (10) получим:

$$\begin{aligned}
 I_{эфф.одн} &= \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} i_{неп}^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} (i_p + i_3)^2 dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} \left( I_{мп} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{м3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right)^2 dt};
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 I_{ср.одн} &= \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_3 + i_p| dt = \\
 &= \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} \left| I_{мп} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{м3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right| dt,
 \end{aligned} \tag{12}$$

где  $T_{зам}$  – время полного затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ (может быть принято равным  $\sim 3 \dots 5$  мс [2]).

Для случая гашения заземляющей дуги в момент перехода через нуль тока промышленной частоты (теория Петерса и Слепяна):

$$\begin{aligned}
 I_{эфф.одн} &= \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} (i_p + i_3)^2 dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left( I_{мп} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{м3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right)^2 dt};
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 I_{ср.одн} &= \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_3 + i_p| dt = \\
 &= \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left| I_{мп} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{м3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right| dt,
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $T_{50} = 20$  мс – период тока промышленной частоты.

Фактором, оказывающим наибольшее влияние на интегральные значения переходного тока при однократном пробое, является суммарный емкостный ток сети  $I_{C\Sigma}$  (рис. 10).

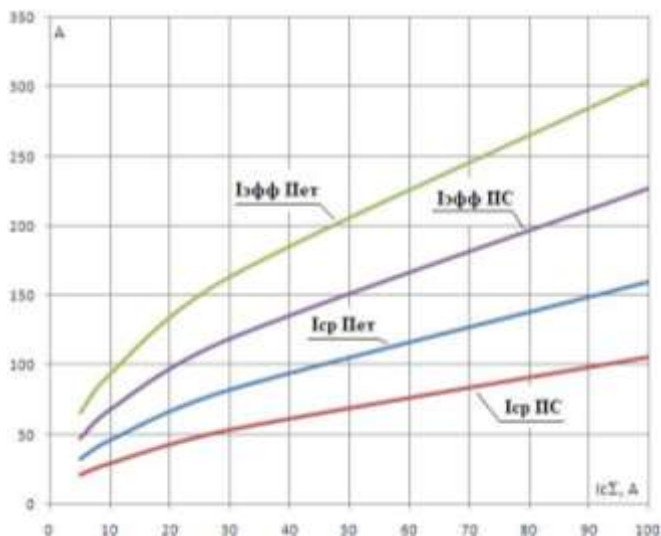


Рис. 10. Зависимости эффективных и средних значений токов от суммарного емкостного тока кабельной сети 6 кВ при однократном пробое изоляции ( $l_s = 1$  км,  $\varphi = 90^\circ$ )

Из рис. 10 можно видеть, что интегральные значения переходного тока в месте ОЗЗ на интервале времени наблюдения, равном  $T_{зам}$ , могут в несколько раз превышать эффективное ( $I_{CS}$ ) и среднее ( $I_{CS}/1,11$ ) установившегося тока повреждения. Следует отметить, что среднее по модулю значение переходного тока возрастает в значительно меньшей степени, чем эффективное значение. Это означает, что защиты от ОЗЗ (например, ТЗНП), реагирующая на среднее значение тока лучше отстроена от влияния переходных процессов, чем защиты, реагирующие на эффективное значение контролируемого тока.

При перемежающемся дуговом ОЗЗ по теории Петерсена (рис. 10) амплитуда переходного при повторных пробоях изоляции в пределе увеличивается в 2,0...2,5 раза по сравнению с амплитудой переходного тока при первом пробое, при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена и Слепяна – примерно в 2 раза. С учетом этого для дугового перемежающегося ОЗЗ по теории Петерсена при повторных пробоях каждый полупериод промышленной частоты максимальные значения эффективного и среднего по модулю тока определяются следующими выражениями:

$$I_{эфф} \approx \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} [(2 \div 2,5)i_{неп}]^2 dt} ; \quad (15)$$

$$I_{cp} \approx \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |(2 \div 2,5)i_{неп}| dt . \quad (16)$$

Для дугового перемежающегося ОЗЗ по теории Петерса и Слепьяна при повторных пробоях изоляции каждый период промышленной частоты

$$I_{эфф} \approx \sqrt{\frac{1}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} [2i_{неп}]^2 dt} ; \quad (17)$$

$$I_{cp} \approx \frac{1}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |2i_{неп}| dt . \quad (18)$$

Из сравнения уравнений (15), (16) и (17), (18) можно видеть, что при дуговых прерывистых ОЗЗ, развивающихся в соответствии с теорией Петерсена, эффективной и среднее по модулю значения переходного тока будут больше, чем при дуговом прерывистом ОЗЗ, развивающимся по теории Петерса и Слепьяна (рис. 11).

Из рис. 11 можно видеть, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ эффективное значение контролируемого защитой тока может увеличиваться 5...15 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что приводит к необходимости значительного заглубления ряда исполнений ТЗНП и ограничению их чувствительности и области возможного применения.

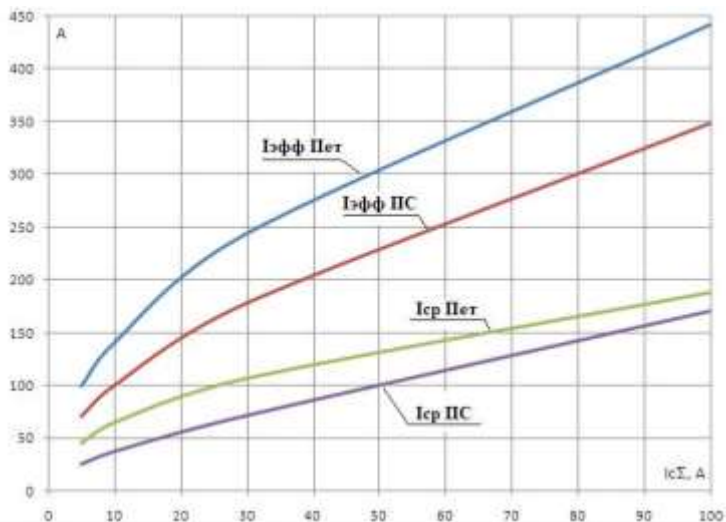


Рис. 11. Зависимости эффективных и средних значений токов от суммарного емкостного тока кабельной сети 6 кВ при перемежающемся дуговом ОЗЗ по теории Петерсена и Петерса и Слепяна ( $l_s = 1$  км,  $\varphi = 90^\circ$ )

**Влияние фильтрации на интегральные значения переходных токов ОЗЗ.** Ограничить влияние токов переходного процесса на устойчивость функционирования ТЗНП при внешних дуговых прерывистых ОЗЗ можно с помощью входных фильтров низших частот (ФНЧ). Представляет интерес влияние частоты среза ФНЧ на эффективность отстройки от влияния переходных токов. При анализе применялся фильтр Чебышева 2-го порядка.

На рис. 12 и 13 приведены зависимости средних по модулю и эффективных значений переходных токов при дуговых перемежающихся ОЗЗ при применении в цепях тока защиты входных ФНЧ с различными значениями частоты среза (от 300 до 3000 Гц).

Из рис. 12 можно видеть, что применение ФНЧ с частотой среза около 500 Гц позволяет ограничить среднее по модулю значение переходного тока при дуговом перемежающемся ОЗЗ до значений, не превышающих среднее по модулю значение установившегося тока замыкания на землю, т.е. обеспечивает эффективную отстройку от влияния токов переходного процесса.

Для получения аналогичного эффекта для ТЗНП, основанной на использовании действующих значений контролируемого тока, необходимо применение ФНЧ с частотой среза около 300 Гц (рис. 13).



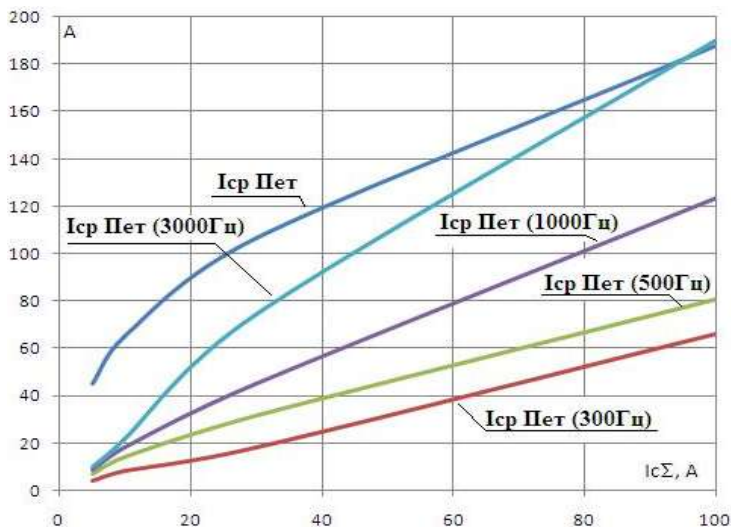


Рис. 12. Зависимости средних значений токов при перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена с учетом фильтрации

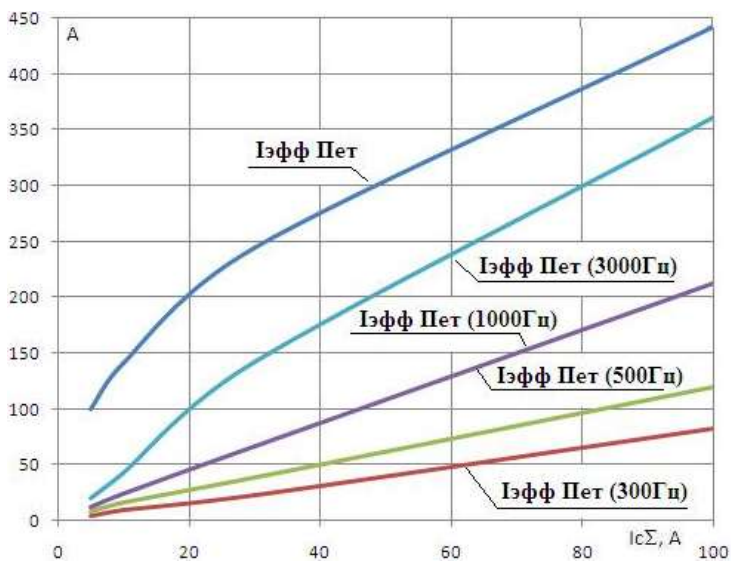


Рис. 13. Зависимости эффективных значений токов при перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена с учетом фильтрации

## Выводы

1. На основе аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в электрических кабельных сетях 6 – 10 кВ получены основные информационные характеристики переходных токов при ОЗЗ.

2. Полученные аналитическим методом результаты проверены и уточнены с использованием математического моделирования в системе Matlab.

3. Определены основные факторы, влияющие на информационные параметры переходных токов при ОЗЗ в кабельных сетях 6 – 10 кВ (суммарный емкостный ток сети, удаленность точки замыкания от шин, ток короткого замыкания на шинах).

4. Определены приближенные пределы изменения амплитуд и частот токов переходного процесса при ОЗЗ в диапазоне изменения суммарного емкостного тока сети от 5 до 100 А, удаленности точки ОЗЗ от 0,1 до 10 км и тока КЗ на шинах от 5 до 20 кА.

5. Определены интегральные значения переходных токов при ОЗЗ (эффективные и средние по модулю значения) при однократном пробое изоляции и дуговых перемежающихся ОЗЗ по теориям Петерсена и Петерса и Слепяна и их зависимости от основных влияющих факторов.

6. На основе исследований показано, что применение для действия ТЗНП не действующих, а средних по модулю значений позволяет примерно в 1,5 – 2 раза повысить устойчивость функционирования защиты и следовательно расширить область ее применения.

7. Определены энергетические характеристики переходных токов при ОЗЗ при однократном пробое и дуговом перемежающемся ОЗЗ. Показано, что не менее 90 % энергии сигнала сосредоточено в спектре частот до 3 кГц.

## Библиографический список

1. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // *Электричество*. – 1991. – № 10. – С. 58 – 61.

2. **Лихачев, Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.

3. **Спрота И.М.** Защита от замыканий на землю в электрических сетях. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955.

## СЕКЦИЯ 13

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Председатель – д.т.н., профессор **Мартынов В.А.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

*В.М. Снегирев, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.*

#### ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕТОК

Для такого ответственного узла как тепловыделяющий элемент, используемого в атомных реакторах на атомных станциях одним из основных узлов является дистанционирующая направляющая решетка, изготавливаемая из циркониевых пластин. К решетке предъявляются особые требования на коррозионную стойкость и выдерживания высоких температур. Цирконий было решено применять из-за того, что он хорошо переносит большие температуры. Основное производство данных решеток, поставляемых на отечественные атомные станции, идет при помощи контактной сварки. Но из-за применения циркония данный вид сварки не удовлетворяет требованиям предъявляемых к дистанционирующей направляющей решетке, потому что при сварки остаются прожоги (глубокие кратеры), что приводит к браку продукции. Дистанционирующая решетка приведена на рис. 1.

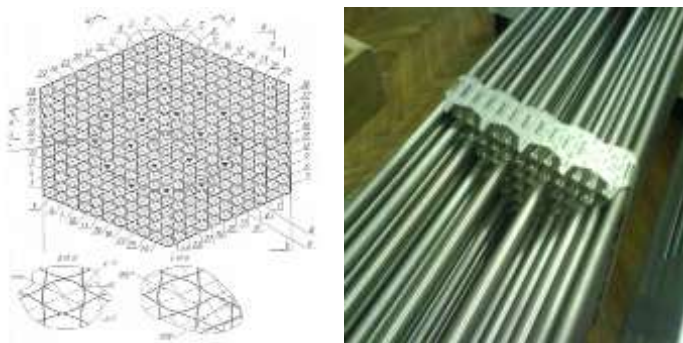


Рис. 1.

По этому на заводе МСЗ «Элемаш» было принято решение проводить сварку немецкой электроннолучевой установке (ЭЛУ) фирмы «Штангервальд».

До настоящего времени применялась однопозиционная оснастка. То есть в камеру загружалась и сваривалась только одна решетка.

В данной работе был разработан технологический процесс для сварки на двухпозиционной оснастке перекрытий дистанционирующей направляющей решетки. Для повышения выпуска продукции была разработана двухпозиционная оснастка. В рабочую камеру загружалась оснастка в которую было вставлено две решетки. А также были проведены испытания, по которым выяснились основные параметры сварки. Основные параметры указанные в технологии, это:

- ток, не менее 12 мА;

- координаты первой точки. Так процесс полностью автоматический и сварщик только следит за правильностью хода работ. ЭЛУ необходимо задать координаты первой точки решетки, относительно которой пойдет сварка (рис. 1). На рисунке показаны точки по периметру изделия. Это необходимые точки, при сварке которых решетка не меняет свои геометрические размеры. Решетка варится с двух сторон.

- диаметр пятна электронного луча. Так же является неотъемлемой частью технологи, так он не должен превышать толщину перекрытия.

- вакуум не менее  $4 \cdot 10^{-4}$  мБар;

- скорость сварки не более 32 м/ч.

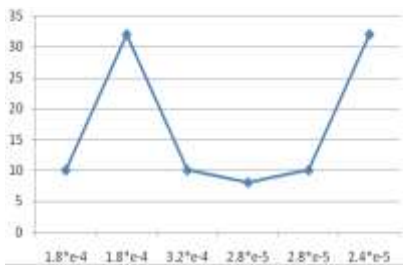


Рис. 2.

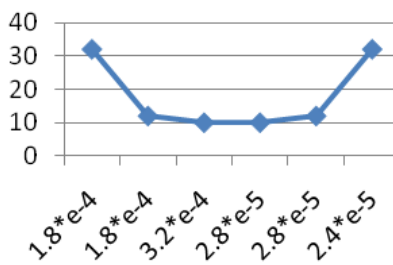


Рис. 3.

В процессе сварки выполняется 1240 сварных точек, процесс сварки одной дистанционирующей решетки длится 42 минуты, с момента загрузки оснастки в камеру и откачки воздуха. После окончания сварки проводится ряд работ по контролю качества изделия: визуальный контроль, контроль по окисной пленке, она не должна превышать 125 мкм (в процессе сварки металл загрязнен). На рис. 2 показан график измене-

ния скорости сварки и давления в рабочей камере. Для сварки выбирается минимальный вакуум и максимальная скорость сварки. На рис. 3 показана зависимость тока от давления в рабочей камере.

За одну смену сварщик производит 4 – 5 решеток, стоимость одной решетки составляет 38 тысяч 750 рублей.

*Д.И. Титов, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЯСА СТАЦИОНАРНОГО ПОДЪЕМНОГО КРАНА**

Одним из узлов стационарного подъемного крана, который используется в строительной индустрии, является пояс. От соблюдения технологии его изготовления зависит механическая прочность, а, следовательно, надежность и ресурс работы крана. Поэтому для изготовления пояса используется современное сварочное оборудование, которое обеспечивает необходимое качество сварных соединений.

Пояс состоит из проушины, направляющих без отверстий и с отверстиями и непосредственно стойки пояса. Для каждой детали была разработана технология изготовления и выбрано необходимое оборудование.

Проушина изготавливается из стали марки 09Г2С толщиной 60 мм на газорезательной машине «SUPRAREX» фирмы «ESAB». На ней выполняется плазменная и термическая резка листового металлопроката с высокой точностью резки фигурных, прямолинейных и круговых деталей. Технические характеристики машины следующие: максимальная толщина листа стали – 200 мм; максимальная длина листа стали – 8000 мм; максимальная ширина листа стали – 3000 мм.

Для изготовления стойки пояса используется роботизированный комплекс «MOTOMAN» (рис. 1). Сварка производится в среде защитного газа FOGON20, проволокой диаметром 1,2 мм марки Autrod ОК12.51. Это омедненная проволока для сварки углеродистых и низколегированных сталей как в смеси 80 % Ar / 20 % CO<sub>2</sub>, так и чистом CO<sub>2</sub>. Качественная намотка проволоки на катушки, стабильный калибр ее по всей длине в сочетании с низким содержанием вредных S и P, вызывающих возникновение холодных и горячих трещин, обеспечивают стабильное горение проволоки с минимальным разбрызгиванием и высокое качество шва. Проволока широко применяется в судостроении, производстве металлоконструкций, машиностроении. Существующие диаметры: 0,8, 0,9, 1,0, 1,2, 1,4 и 1,6 мм. В процессе сварки получаем нестандартный шов длиной 5 м.

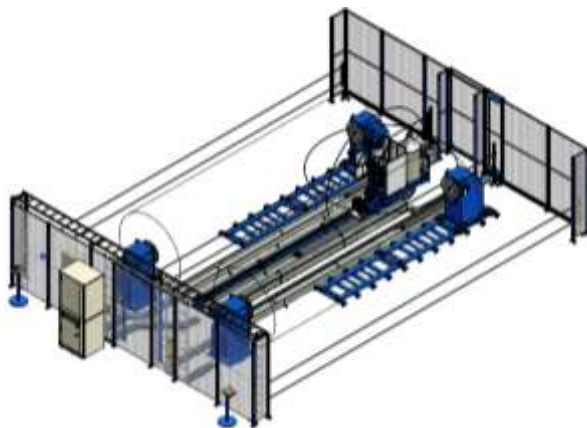


Рис. 1

Сварка полностью автоматизирована и производится по заданной программе (рис. 2).



Рис. 2

Технологические параметры сварки следующие:

сила тока, А	260 – 320;
напряжение, В	26 – 30;
скорость подачи проволоки, м/ч	265 – 300;
скорость сварки, м/ч	25 – 30;
расход защитного газа, л/мин	16 – 18.

Таким образом использование современного роботизированного комплекса «МОТОМАН» позволяет получать качественные и высокопрочные сварные соединения деталей для пояса стационарного подъемного крана.

*Н.В. Архангельский, А.Е. Кузьмин, А.В. Шерихов, студенты;  
рук. А.Н. Королев, к.т.н., проф., М.Г. Марков, к.т.н., доцент*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ**

Датчики, дающие информацию о положении объекта, широко используются в системах автоматического управления самых различных отраслей промышленности. Примерами являются системы автоматики в станкостроении, в роботизированных комплексах, в транспортных системах и т.п. Чаще всего проблема получения информации решается установкой датчиков по отдельным координатам и последующей независимой или последовательной отработкой координатных перемещений. Однако, установка датчиков на отдельные координатные направления в ряде случаев затруднительна или невозможна. Примерами могут служить тренажеры и анализаторы деятельности человека различных видов, требующие регистрации точности движения рук по заданным траекториям с необходимой скоростью и позиционирования их в пространстве. В частности в тренажере для электросварщиков, в котором обучаемыми нарабатывается опыт прохождения швов различных видов с заданной точностью по положению и скорости движения электрода. То есть требуется отслеживать координаты конца электрода в трехмерном пространстве при случайных его отклонениях от заданной траектории. При этом датчик положения должен обладать простотой и надежностью работы в условиях неадекватных действий обучаемых с малым опытом работы.

Поэтому имеется задача создания датчиков многокоординатных перемещений. При этом они должны обладать простотой и надежностью работы в самых различных условиях, необходимой точностью, как в статике, так и в динамике анализируемого объекта.

В настоящее время в качестве датчика положения возможно применение оптоэлектронных, емкостных и индуктивных датчиков. По совокупности характеристик в качестве датчика положения наиболее подходящим на данный момент является индуктивный датчик, базирующийся на анализе величины индукции в конкретных точках рабочих объемов. Он достаточно прост в изготовлении, его чувствительность не намного

меньше, чем у оптоэлектронного, а помехозащищенность наиболее высокая по сравнению с рассмотренными датчиками.

Сопоставление способов получения информации о положении объекта над некоторой базовой поверхностью показало, что наиболее адекватным в этом случае является использование принципа взаимной индукции магнитно-связанных катушек. Известно, что наведенная от одной катушки в другой электродвижущая сила зависит от коэффициента взаимной индукции, который, в свою очередь, является функцией взаимного расположения двух катушек. При этом магнитное поле внутри катушки практически линейно, что позволяет использовать его для построения датчиков с постоянными коэффициентами связи входных и выходных величин. Поэтому в подавляющем большинстве случаев для индукционных датчиков используется именно взаимодействие чувствительного элемента с внутренним полем катушек индуктивности. Примерами могут служить сельсины, вращающиеся трансформаторы, дифференциальные датчики линейных перемещений и другие устройства.

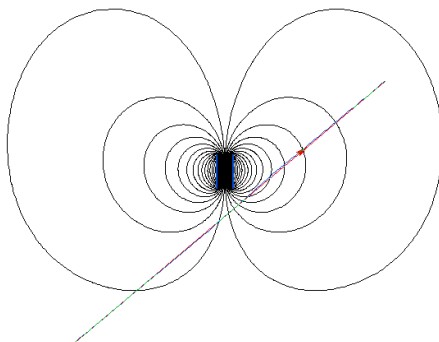


Рис. 1. Картина поля катушки

Однако, при слежении за пространственными перемещениями рационально не связывать объект с ограниченным объемом внутреннего поля катушки. Позволяет большую свободу перемещений и, в то же время, остается информативным поле вне катушки, индукция которого является ярко выраженной функцией удаления от катушки. На рис. 1 представлена картина поля катушки, указывающая на существенную неравномерность распределения индукции во внешнем объеме. На рис. 2 представлено распределение индукции и ее ортогональной составляющей на плоскости, перпендикулярной к оси катушки.



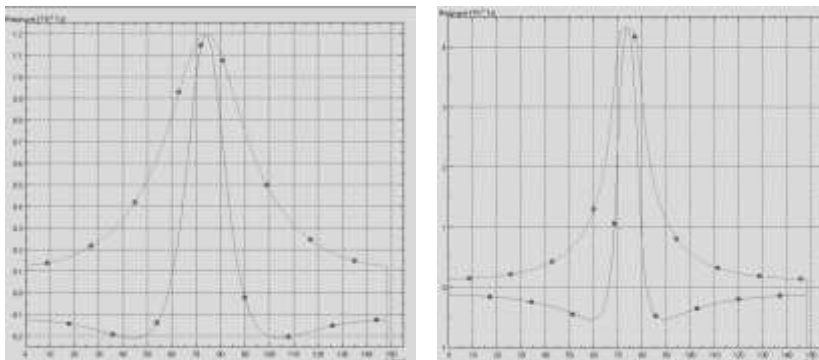


Рис. 2. Распределение индукции и ее ортогональной составляющей на плоскости, перпендикулярной к оси катушки

Анализ результатов моделирования показывает, что при перпендикулярном расположении катушки относительно исследуемой плоскости расстояние до нее может быть легко определено по площади нормальной составляющей. В докладе рассматриваются принципы определения координат катушки индуктивности. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями.

*С.И. Реппиев, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.*

### **СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ**

Источники питания для ручной дуговой сварки плавящимися электродами в настоящее время остаются наиболее распространенной группой оборудования, включающей в себя трансформаторы, преобразователи и выпрямители. Сварочные трансформаторы с механическим регулированием отличаются простотой конструкции, отсутствием аппаратуры управления и имеют высокие показатели надежности. Кроме того, они являются наиболее дешевыми и экономичными источниками питания. Поэтому во многих случаях им отдается предпочтение при выборе электросварочного оборудования. Трансформаторы являются основным элементом преобразования энергии во многих источниках сварочного тока и поэтому оказывают решающее влияние на технические характеристики электросварочного оборудования.

Конструирование и расчет сварочных трансформаторов ведется методом последовательных приближений, поскольку на первых этапах всегда приходится задаваться некоторыми параметрами ориентировочно, уточняя их в дальнейшем. В задании на проектирование сварочного трансформатора обычно указываются: номинальное напряжение питающей сети; номинальный сварочный ток; пределы регулирования сварочного тока и продолжительность нагрузки при номинальном токе. В процессе расчета определяются: напряжение холостого хода и напряжение сварки; расчетная мощность; геометрические размеры и вес сердечника и обмоток; температура нагрева и другие параметры.

Целью данной работы является создание системы автоматизированного проектирования сварочных трансформаторов с механическим регулированием. Использование данной системы позволяет отказаться от выполнения трудоемких расчетов и уделить основное внимание выбору оптимальной конструкции сварочного трансформатора из ряда вариантов с учетом различных критериев. Интуитивно понятный интерфейс позволяет быстро включиться в работу, не тратя времени на изучение программы.

В окне программы (рис. 1) находятся поля ввода исходных данных, панель навигации по разделам, кнопки вызова помощи по разделу, в котором находится пользователь, также таблиц данных и эскизов (рис. 2) проектируемых частей трансформатора. После выбора размеров активной зоны и обмоточных данных производится определение токов и напряжений дуги, которые сможет обеспечить спроектированный трансформатор при ручной дуговой сварки, и проверка на устойчивость по максимальной полезной мощности.

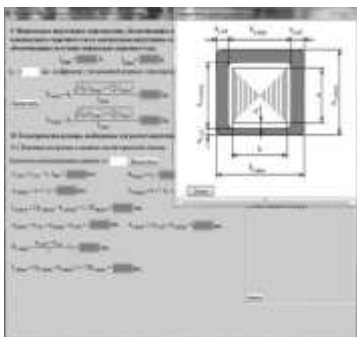


Рис. 1. Интерфейс программы

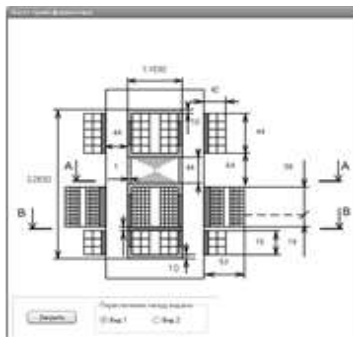


Рис. 2. Эскиз трансформатора

Проверка выполняется для двух крайних режимов: при номинальном и пониженном на 10 % напряжении. Также проверяется условие по-

вторного зажигания дуги для наиболее неблагоприятного режима – минимального сварочного тока при пониженном на 10 % напряжении. Если разброс в результатах полученных сварочных токов с заданными составляет более 10 %, или не выполняется проверка на устойчивость зажигания дуги в режиме минимального тока, то программа предлагает скорректировать конструкцию трансформатора. После этого весь расчет повторяется до тех пор, пока спроектированный трансформатор не будет соответствовать исходным данным. Для окончательного варианта определяются потери в стали магнитопровода, ток холостого хода, а также энергетические показатели. Кроме этого проводят проверку трансформатора по допустимой температуре нагрева в режимах заданного тока сварки. Данная система позволяет в режиме диалога, при экономии времени, произвести проектирование вариантов, которые отличаются конструктивными и массогабаритными показателями.

*А.В. Киселев, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПОСТОВОЙ СВАРКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «SWCAD»**

Представленная работа является продолжением исследования возможностей программного комплекса SWCAD для моделирования процессов, протекающих в электронных схемах [1].

Целью работы является изучение возможностей программы LTspice/Swither CAD для моделирования многопостовой сварки [2].

На машиностроительных предприятиях, где наблюдается большая концентрация сварочных рабочих мест, традиционно использовалась и используется многопостовая сварка постоянным и переменным током.

Достоинством данного типа сварки является простота, безопасность и возможность экономии производственных площадей. При многопостовой сварке несколько сварочных рабочих мест подключаются к одному многопостовому сварочному источнику.

Относительная независимость сварочных постов, работающих от одного общего источника, достигается тем, что каждый сварочный пост подключается через индивидуальный балластный реостат (БР), служащий для регулирования сварочного тока и получения необходимой крутопадающей нагрузочной характеристики (рис. 1).

Использование БР является, возможно, наиболее простым, но не лучшим решением, т. к. при этом сильно снижается КПД. Низкий КПД обусловлен тем, что часть мощности рассеивается в виде тепла на БР. Так

как напряжение сварочной дуги составляет 30 – 50% от напряжения многопостового источника, то таким же является и КПД такого способа проведения сварочных работ.

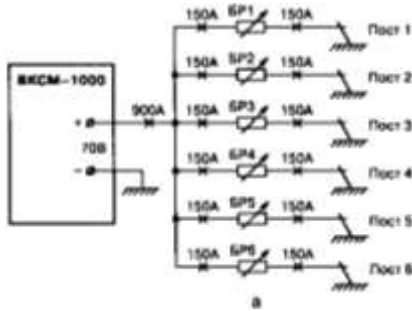


Рис. 1. Многопостовая сварка с использованием балластных реостатов

Достижения современной электроники позволяет изготовить электронный аналог БР, который имеет улучшенные эксплуатационные характеристики и обладает КПД, близким к 100 %.

На рис. 2 изображен вариант, когда к одному многопостовому источнику посредством ЭРСТ подключено большее количество рабочих мест, при этом многопостовой источник работает в обычном нагрузочном режиме.

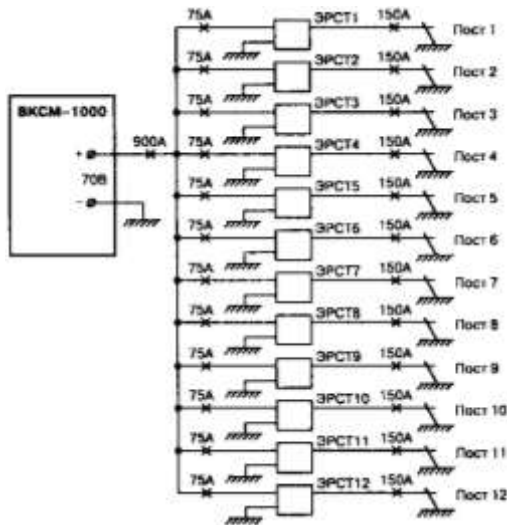


Рис. 2. Многопостовая сварка с использованием ЭРСТ

Выгода от такого решения очевидна, так как достигается одновременная экономия электроэнергии и оборудования при неизменном объеме сварочных работ. Если сравнивать ЭРСТ с инверторными сварочными источниками, то он имеет следующие преимущества:

- повышенная безопасность, которая связана с отсутствием высоковольтных цепей;
- меньшая масса;
- более высокий КПД за счет меньшего количества преобразований.

В данной работе описаны общие принципы конструирования и реальная конструкция простого ЭРСТ. Несмотря на свою простоту, благодаря идеальным внешним характеристикам ЭРСТ обеспечивает наилучшее формирование сварочного шва и практически исключает разбрызгивание металла. В ЭРСТ предусмотрена возможность регулировки наклона внешней характеристики от крутопадающей до жесткой. Данное обстоятельство позволяет использовать ЭРСТ как для ручной, так и для полуавтоматической сварки.

Принцип работы ЭРСТ основан на модуляции входного напряжения полупроводниковым (ПП) ключом с последующей фильтрацией среднего значения напряжения. Благодаря тому, что ПП ключ имеет малую мощность рассеивания в закрытом и открытом состояниях, его КПД близок к 100 %.

Основой ЭРСТ является импульсный понижающий преобразователь постоянного напряжения (ЧОППЕР).

Понижающий преобразователь показан на рис. 3. Он состоит из электронного ключа, роль которого в данном случае выполняет полевой транзистор VT, диода VD и дросселя сглаживающего фильтра L.

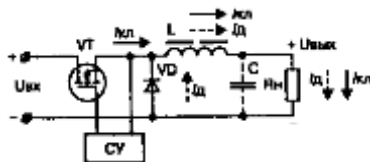


Рис. 3. Понижающий преобразователь постоянного напряжения

Наличие конденсатора С не является принципиальным. Схема управления может регулировать выходное напряжение  $U_{вых}$  на нагрузочном резисторе  $R_n$ , осуществляется с помощью ключа VT широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) входного напряжения  $U_{вх}$ .

Принцип действия ШИМ заключается в том, что транзистор открыт в течение времени  $t_{on}$ , которое меньше или равно периоду коммутации ключа T.

На рис. 4 изображена модель понижающего преобразователя, который понижает входное напряжение с  $U = 60$  (В) до напряжения 30 В на нагрузочном резисторе R1.

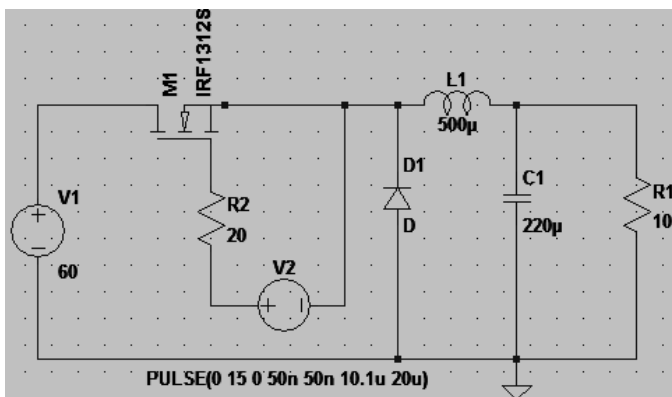


Рис. 4. Модель понижающего преобразователя постоянного напряжения

Первый этап работы заключался в исследованиях преобразователя в режиме непрерывного тока. При этом в качестве генератора ШИМ-сигнала использовался источник напряжения V2, который работал в расширенном режиме импульсного генератора. На рис. 5 приведены расчетные диаграммы токов через диод и через дроссель, и диаграмма мощности.

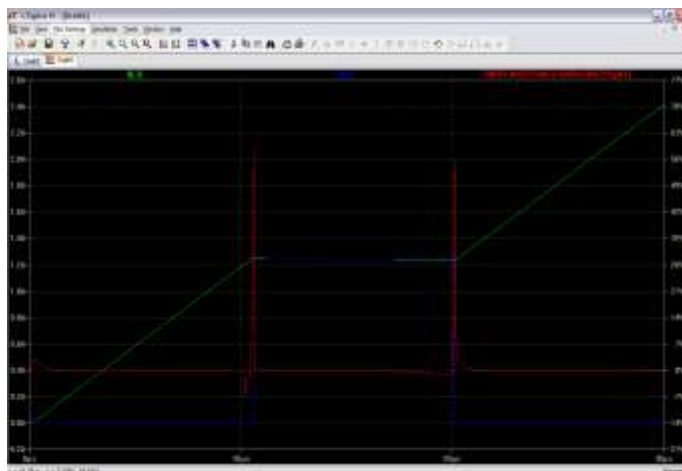


Рис. 5. Диаграммы токов и мощностей

При этом на транзисторе выделяется импульсная мощность. И это обстоятельство не может быть оправданным, т.к. большие импульсы мощности

вызывают локальные перегревы и деградацию полупроводниковой структуры, что, в конце концов, приведет к отказу транзистора или диода.

Из диаграммы токов, построенной для диода D1 видно, что в момент отпирания транзистора M1 через диод протекает короткий импульс сквозного тока (обратного тока восстановления). Он вызван процессом рассеивания избыточного заряда в области его « $p-n$ » перехода.

Второй этап работы состоял в исследовании преобразователя в режиме прерывистого тока. Добиться коммутации при нулевом токе можно, если ранее рассмотренный преобразователь заставить работать в режиме с прерывистым током дросселя. В этом случае при окончании периода ток дросселя уменьшится до 0 и диод D1 успеет восстановить высокое обратное сопротивление.

Для получения требуемого режима коммутации достаточно уменьшить индуктивность дросселя ниже минимального значения  $L_{min}$ , гарантирующего неразрывность тока дросселя  $L1$ .

В работе были рассмотрены и смоделированы режимы при разных нагрузочных сопротивлениях  $R1$  в диапазоне от 10 до 100 Ом и построены диаграммы токов и напряжений при этих значениях сопротивлений.

Проведенные исследования позволяют прогнозировать работу преобразователей, применяемых при многопостовой сварке в различных технологических режимах работы.

#### Библиографический список

1. Киселев А.В. Применение программной среды SWCAD для моделирования электротехнологического оборудования / Энергия 2009: мат-лы региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Т. III. – С. 86 – 89.
2. Володин В.Я. Современные сварочные аппараты своими руками. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 304 с.

*Д.Н. Кормилицын, студ.; рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Целью работы являлась разработка программы анализа установившихся режимов в линиях с распределенными параметрами. Программа реализована на языке программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Интерфейс программы приведен на рис. 1. Он включает в себя: схематичное изображение длинной линии, поля для ввода исходных данных и переключатели для выбора вводимых данных.

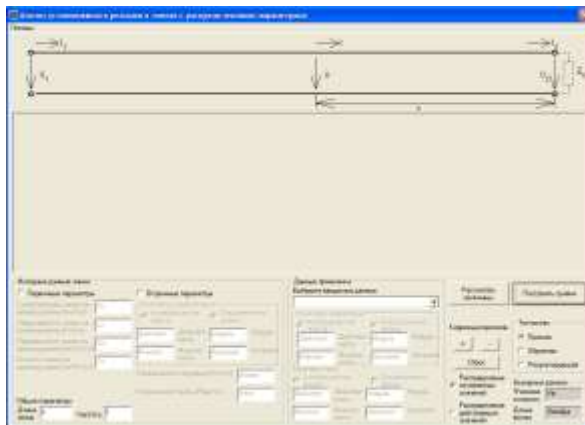


Рис. 1. Рабочий лист программы версии 1.1

Вводимые данные подразделяются на 2 типа: параметры длинной линии и параметры приемника. В качестве исходных данных реализована возможность вводить либо первичные, либо вторичные параметры линии. Вторичные параметры задаются в виде комплексных величин в алгебраической или в показательной формах записи по усмотрению пользователя. После ввода исходных данных можно рассчитать недостающие параметры, нажав на кнопку «Расчитать величины».

Аналогичным образом, параметры приемника могут быть введены поразному в зависимости от известных величин. Возможность представления параметров приемника приведена на рис. 2. Кроме комплексных токов и напряжений приемника, входящих в уравнения состояния длинной линии, можно вводить действующие значения величин, активную мощность приемника, его коэффициент мощности. После ввода необходимой информации необходимо нажать кнопку «Расчитать величины». После этого определяются недостающие переменные и готовятся функции к представлению на графике.





Рис. 2. Выбор вводимых данных приемника

На графике представлены прямые и обратные бегущие волны тока и напряжения, распределение мгновенных величин по линии в различные моменты времени, распределение действующих значений токов и напряжений по линии при различной нагрузке. Кроме того, возможно определить КПД линии. В качестве примера на рис. 3 показано распределение по линии прямой бегущей волны напряжения в заданный момент времени. В программе реализована возможность, как ускорения, так и замедления скорости движения прямых и обратных волн. Это достигается с помощью кнопок «+» и «-» в поле «Коррекция времени». Также во время построения графика можно сменить тип отображаемого графика: прямая, обратная и их сумма.



Рис. 3. График распределения мгновенных значений в линии

Таким образом, разработанная программа дает возможность исследовать установившиеся режимы в длинных линиях при различных режимах ее работы. При этом графики дают возможность наглядно увидеть распределение действующих значений токов и напряжений по линии, а также возможность отображения прямых и обратных волн в зависимости от характера нагрузки. Кроме того, возможность наглядного представления анимации прямых и обратных волн позволяет студентам лучше усвоить тему длинные линии при ее изучении. Она позволяет наглядно представить для студентов само понятие «бегущие волны».

*В.А. Баранов, асп.; рук. В.Д. Лебедев., к.т.н., доцент*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В МЕДИЦИНСКОМ ОБОРУДОВАНИИ**

Одной из приоритетных задач электротехники в настоящее время является повышение эффективности использования электрической энергии. Основными направлениями в этом являются снижение энергопотребления, повышение коэффициента полезного действия (КПД) электроустановок и источников вторичного электропитания, а также повышение коэффициента мощности электроустановок и связанное с этим снижение потерь мощности в линиях электропередач.

В современной медицине широко используется самая разнообразная электронная техника, в том числе, потребляющая значительную мощность из сети электроснабжения. В большинстве современных приборов применяются импульсные источники питания (ИИП), обеспечивающие лучшие массогабаритные показатели и эффективность. На входе они имеют выпрямитель сетевого напряжения с емкостным фильтром. Основной проблемой этого решения является то, что ток потребления из сети имеет форму коротких пиков значительной амплитуды (см. рис.). При значительной мощности ИИП уровень гармонических составляющих тока потребления может стать неприемлемо высоким, что приведет к несоответствию стандартам на электромагнитную совместимость [3]. К медицинскому оборудованию предъявляются повышенные требования по безопасности [1] и надежности, снижение нагрузки на питающие сети также влияет на безопасность медицинского учреждения в целом [4]. Именно поэтому применение технологий повышения коэффициента мощности является актуальным в сфере медицинских приложений.

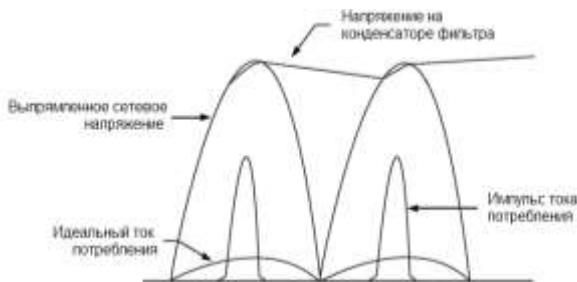


Рис. 1. Ток потребления ИИП

Коррекцию коэффициента мощности можно осуществлять различными способами. Наиболее очевидным и простым, с точки зрения схемотехники, является использование дросселя достаточно большой индуктивности, включенного последовательно во входную цепь ИИП. Однако, в виду низкой частоты питающего напряжения (50/60 Гц), этот дроссель потребует применения сердечника из электротехнической стали и значительного расхода меди для обмотки, а массогабаритные показатели его будут расти практически пропорционально квадрату тока потребления [4]. Практический предел мощности ИИП, когда применение пассивной коррекции коэффициента мощности является целесообразным, находится на уровне 300...400 Вт, размеры и вес дросселя при этом уже достаточно велики, чтобы сделать его неприемлемым для портативных приборов.

В настоящее время большое распространение получили активные корректоры коэффициента мощности (ККМ), представляющие собой повышающие импульсные стабилизаторы напряжения со специальной схемой управления, формирующей синусоидальную форму тока потребления из сети с одновременной стабилизацией выходного напряжения [4]. Такие схемы не обеспечивают гальванической развязки от сети и необходимые выходные напряжения затем получаются с помощью традиционных импульсных преобразователей с трансформаторами. Схемы ККМ на серийно выпускаемых элементах позволяют достигать коэффициента мощности до 0,95...0,99, достижим коэффициент гармоник не более 1 %. Активный ККМ в силу принципа построения также обеспечивает широкий диапазон рабочих входных напряжений ИИП, что позволяет отказаться от переключения диапазонов входного напряжения для оборудования, поставляемого в разные регионы мира.

Однако, наряду с очевидными преимуществами данная технология имеет и некоторые особенности, которые важно учитывать при проектировании. Основной является повышенный уровень высокочастотных

кондуктивных помех и помех в эфир, поскольку КKM представляет собой импульсный преобразователь, непосредственно связанный с сетью электропитания и работающий на высокой частоте (20...100 кГц). В виду отсутствия на входе емкостного фильтра (он переносится на выход преобразователя), уровень кондуктивных помех в большинстве случаев будет выше, чем у стандартного ИИП той же мощности, что во многих случаях приведет к несоответствию стандарту на электромагнитную совместимость [2]. Учитывая то, что требования к медицинскому оборудованию предъявляются более жесткие [1], потребуются применение более сложных сетевых помехоподавляющих LC-фильтров и более тщательная проработка конструкции прибора, что, в конечном счете, приводит к удорожанию прибора. При этом, эффективность сетевого фильтра необходимо повышать с помощью увеличения индуктивности катушек, а не емкости конденсаторов, поскольку последнее приведет к увеличению тока утечки на заземляющий провод выше допустимого стандартом на медицинское оборудование [1].

Также применение КKM приводит к некоторому снижению надежности прибора (в силу увеличения числа элементов) и снижению КПД (по причине двойного преобразования напряжения) [4]. Частично эти проблемы можно обойти, используя схемы на основе стандартных импульсных преобразователей, управляемых контроллерами КKM [4].

Таким образом, применение активных корректоров коэффициента мощности предоставляет возможность более полно и эффективно использовать сети электроснабжения, повысить безопасность и эффективность приборов, улучшить их показатели электромагнитной совместимости. Однако, эта технология ставит перед разработчиками новые сложные задачи, решение которых необходимо для обеспечения соответствия оборудования стандартам.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 50267.0.2-2005 (МЭК 60601-1-2:2001) Изделия медицинские электрические. Часть 1 – 2. Общие требования безопасности. Электромагнитная совместимость. Требования и методы испытаний.
2. ГОСТ Р 51318.22-99 (СИСПр 22-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи индустриальные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний.
3. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.
4. **Danis Carter**. Power-factor correction: Rx for medical power supplies. – EDN Journal, 1998 ([http://www.edn.com/archives/1998/050798/10df\\_03.pdf](http://www.edn.com/archives/1998/050798/10df_03.pdf)).

*А.А. Яблоков, студ.; рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГОЦЕПНОГО И ПОЛЕВОГО РАСЧЕТОВ**

Целью работы является создание модели измерительного трансформатора напряжения (ТН) 220 кВ с разомкнутыми стержневыми магнитопроводами [1], строение и принципиальная схема включения которого представлены на рис. 1.

Моделирование ТН проводилось в программном пакете Multiphysics COMSOL, предназначенном для решения большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных, методом конечных элементов.

Модель содержит в себе две модели геометрии (одна геометрия представляет нижний каскад трансформатора, вторая – один из трех верхних, так как они идентичны).

На полученных геометрических моделях построена сетка конечных элементов. При решении используется нестационарное уравнение магнитного поля

$$\left(\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) + \nabla \times \left(\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}\right) = \vec{J}, \quad (1)$$

записанное для всех четырех каскадов трансформатора, где  $\nabla$  – дифференциальный оператор Гамильтона,  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\vec{J}$  – вектор плотности сторонних токов,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость, которая для ферромагнитного сердечника является нелинейной величиной.

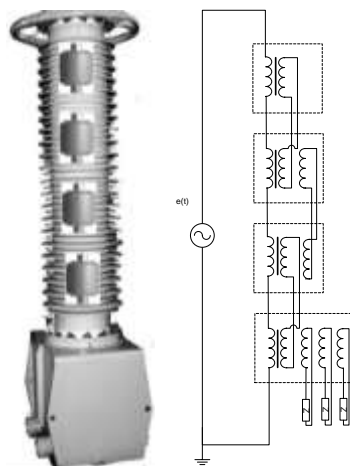


Рис. 1. Строение и схема трансформатора напряжения

Описание схемы соединения осуществлялось с применением редактора SPICE Sircuit, заложенного в программе COMSOL. Кроме того, описания цепи можно импортировать из других программ моделирующих электронные схемы, например PSpice. Импортируемый файл должен иметь расширение .cir. Пример результата расчета переходного процесса при включении трансформатора на синусоидальное напряжение представлен на рис. 2.

При исследовании трансформатора в статическом режиме, при определении метрологических характеристик, важно решать уравнения с высокой точностью. Поэтому были использованы уравнения электромагнитного поля записанные в пространственно-частотной области (для частоты 50 Гц), а именно:

$$(j\omega\sigma \bar{A}) + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \bar{A}) = \bar{J}, \quad (2)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота,  $\sigma$  – электропроводность. Описание электрической цепи осуществлялось линейными уравнениями с помощью комплексных переменных.

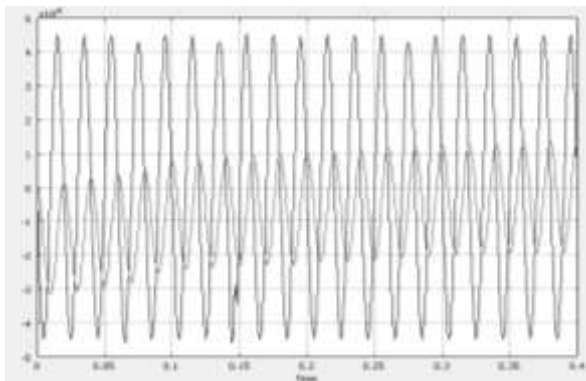


Рис. 2. График напряжения и тока одной из секций ТН

Важное значение имеет исследование трансформатора при его работе в схеме, представленной на рис. 3. Данная схема моделирует отключение трансформатора от сети, при этом возможно возникновение феррорезонанса возникающего в цепи НТ включенного через емкости выключателя  $C1$  к источнику напряжения [2].

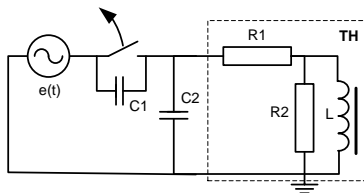


Рис. 3. Схема исследования феррорезонансных процессов:  $C1$  – емкости делителей напряжения коммутируемого выключателя;  $C2$  – суммарная емкость на землю ошиновки, и другой высоковольтной аппаратуры, подключенной к системе шин. Параметры ТН:  $R1$ ,  $R2$  и  $L$  представлены на схеме условно, так как зависят от режима и определяются в результате полевого расчета для каждого момента времени

Исследование режимов работы осуществляется при вариации параметров конденсаторов  $C1$  и  $C2$  в соответствии с теорией бифуркаций.

#### Библиографический список

1. Федотов С.П., Лебедев В.Д. Разработка антирезонансного индуктивного трансформатора напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 102 – 105.
2. Зайцев Е.С. Анализ устойчивости цепей с индуктивными трансформаторами напряжения средствами Matlab // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: пятнадцатая междунар. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. – Т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 343 – 344.

*Д.В. Рыжов, С.А. Самаринский, студенты;  
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО ШУНТА**

Проблема измерения тока возникает во многих областях науки и техники. Существует множество подходов к ее решению (использование трансформатора тока, датчиков на основе эффекта Холла и магнитооптических датчиков), однако, самым надежным, простым и пригодным для решения широкого круга задач является преобразование тока в напряжение. Поскольку измеряемый ток в большинстве случаев переменный либо импульсный сложной формы, существует необходимость использования безиндуктивного резистора (шунта) для данной цели.

При проектировании шунта необходимо принять во внимание следующие проблемы, ограничивающие область его применения.

1. Зависимость активного сопротивления от частоты тока, обусловленная поверхностным эффектом.

2. Наличие паразитной индуктивности.

3. Возможное наличие паразитной емкости.

4. Зависимость паразитных параметров от частоты тока.

5. Влияние внешнего электромагнитного поля шунта на измерительный преобразователь и другие установки, расположенные в непосредственной близости.

Простейшей конструкцией является цилиндрический или иной цельнометаллический шунт. Его применение, во многом, ограничено лишь цепями постоянного (либо медленно изменяющегося) тока, поскольку измерения в иных цепях приводят к возникновению практически всех названных выше проблем.

Одним из путей решения некоторых проблем является использование тонкостенных трубчатых шунтов. Влияние поверхностного эффекта на параметры в широком диапазоне частот достаточно мало для проведения точных измерений. Между тем, данная конструкция обладает недостаточной быстро убывающим в пространстве внешним магнитным полем, и при измерении импульсов тока значительной амплитуды возникает проблема экранирования шунта, требующая отдельного рассмотрения и решения.

Предлагается применять шунт коаксиальной структуры, состоящий из двух тонкостенных цилиндрических трубок.

Данная конструкция, в отличие от названных ранее, обладает большей паразитной емкостью, поскольку содержит две обкладки, однако, оценка величины этой емкости показала, что ее влияние пренебрежимо мало вплоть до высоких частот.



Математическая оценка параметров коаксиальной структуры показала, что применение шунтов данной конструкции не приводит к названным выше проблемам, и при выдерживании необходимого соотношения между геометрическими размерами и применении материалов с различным удельным сопротивлением полное сопротивление шунта стремится к чисто активному.

На основании изложенного предлагается следующий порядок расчета геометрических параметров коаксиального шунта.

1. Исходя из требуемой рассеиваемой активной мощности оценить внешние геометрические размеры шунта.

2. Определить максимальную толщину стенок, считая трубку шунта уединенной.

3. Выбрать радиусы трубок, и материалы, удовлетворяющие условию, выражающему равенство приповерхностных токов внутри структуры.

4. Уточнить длину шунта, исходя и требуемой рассеиваемой активной мощности.

Преимуществом данного подхода также является отсутствие необходимости экранировать шунт ввиду отсутствия у структуры сколь-либо значительного внешнего электромагнитного поля. Это позволяет располагать измерительное оборудование в непосредственной близости от шунта с целью повышения точности измерений.

*И.К. Бритов, Н.А. Библаев, студенты;  
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МАТЛАБ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Заземляющие устройства предназначены для защиты человека, оборудования и строений от воздействия токов молний и токов коротких замыканий в электрооборудовании.

При разработке заземляющих устройств (ЗУ) важным является определение параметров элементов заземляющих устройств основной частью, которых являются заземлители.

Особые требования, в соответствии с нормативными документами (СО 34.35.311-2004) и литературой [1 – 5] предъявляются к выполнению ЗУ электрических станций и подстанций. Для организации ЗУ важным является выполнение требований по величине сопротивления заземляющего контура, распределение напряжения по территории защищаемого объекта.

ЗУ является сложным сооружением и для его расчета необходимо точно задать геометрию в компьютер. Для этого в программе Matlab были разработаны специальные функции, входными аргументами которых, являются матрицы с координатами элементов ЗУ и их характеристиками. Функции позволяют отображать в формате 2D и 3D в интерактивном режиме контур всего ЗУ, номера узлов и элементов (рис. 1).

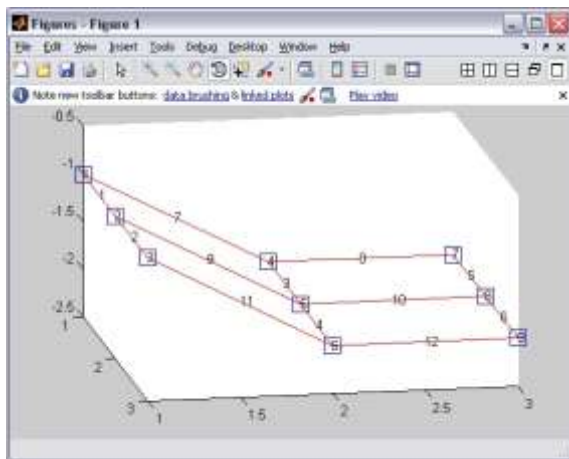


Рис. 1. Отображение элементов и узлов ЗУ в формате 3D

Вращая, приближая и удаляя модель ЗУ пользователь может исключить возможные ошибки задания матриц геометрии ЗУ.

Определение сопротивления контура заземляющего устройства основано на решении групп уравнений Максвелла, записанных в матричной форме. Элементы матриц уравнений определяются с использованием уже имеющихся матриц описывающих геометрию и численных расчетов интегралов параметрически заданных функций.

#### Библиографический список

1. Найфельд М.Р. Заземление и другие меры защиты. – М. Энергия, 1975. – 104 с.
2. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков [и др.]; под ред. А.Ф. Дьякова. – Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
3. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б. Имитационное моделирование растекания тока молнии по ЗУ ПС и ЭС // Энергоэксперт. – 2009. – № 4(15). – С. 95 – 101.
4. Борисов Р.К. Нормативная база по электромагнитной совместимости в электроэнергетике // Энергоэксперт. – 2009. – № 4(15). – С. 92 – 94.
5. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.

*В.С. Баженов, студ.; рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРИИ ВАКУУМНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ В СРЕДЕ «ELCUT»

Герметизаторы на основе магнитных наножидкостей (МНЖГ) нашли широкое применение для уплотнения вращающихся валов в различных областях техники, а именно: вакуумном, химическом, биологическом и электротехнологическом оборудовании [1, 2].

Основные преимущества МНЖГ, перед традиционными типами уплотнений заключаются в следующем:

- полное отсутствие утечек и натеканий герметизируемой среды;
- малый собственный момент трения при вращении и страгивании вала;
- являются экологически безопасными для окружающей среды и здоровья человека;
- имеют высокий ресурс работы (от 5 до 70 тыс. часов) и срок эксплуатации;

Принцип работы МНЖГ состоит в удержании магнитной наножидкости (МНЖ) поперечной силой, создаваемой полем постоянного магнита в рабочем зазоре герметизатора.

В работе проводилось моделирование картины распределения индукции магнитного поля в рабочих зазорах вакуумных герметизаторов для серии на диаметры уплотняемых валов от 20 до 100 мм с шагом 10 мм.

Зубец полюсной приставки (рис. 1) имел форму равнобедренной трапеции с углом при основании  $\alpha = 45^\circ$  и величиной площадки  $t = 0,3$  мм. В ходе выполнения расчетов изменялась величина рабочего зазора. Она составляла  $\delta = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$  мм.

В качестве постоянных магнитов был выбран сплав на основе соединения неодим-железо-бор с величинами остаточной индукции  $B_r = 0,9$  Тл и коэрцитивной силы  $H_c = 560$  кА/м. Материал магнитопровода – сталь 20 с индукцией насыщения  $B = 2,1$  Тл в поле с напряженностью  $H_c = 50$  кА/м.

Для моделирования магнитного поля в рабочем зазоре МНЖГ использовался программный комплекс «ELCUT». В автоматическом режиме производилась триангуляция расчет-

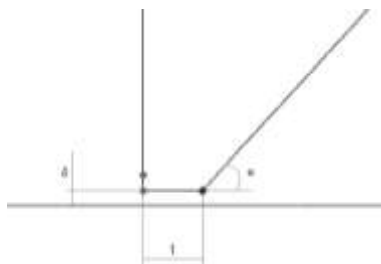


Рис. 1

ной области герметизатора с учетом граничных условий Дирихле–Неймана (рис. 2). Распределение магнитных силовых линий представлено на рис. 3.

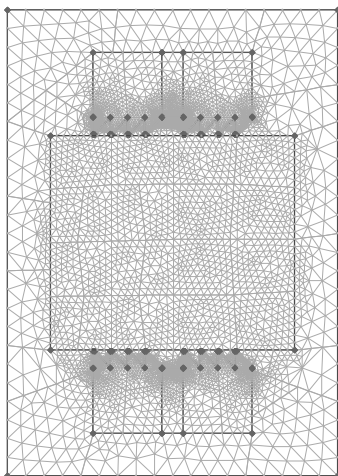


Рис. 2

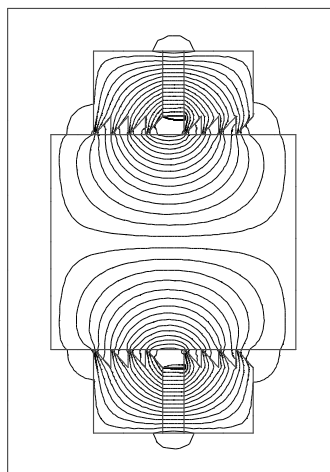


Рис. 3

Для каждой геометрии рабочего зазора получена картина распределения магнитной индукции в нем, что позволяет определить величину критического перепада давлений МНЖГ.

Получены графики изменения максимальной и минимальной магнитных индукций по высоте рабочего зазора в диапазоне  $\delta = 0,1 - 0,3$  мм (рис. 4, 5).

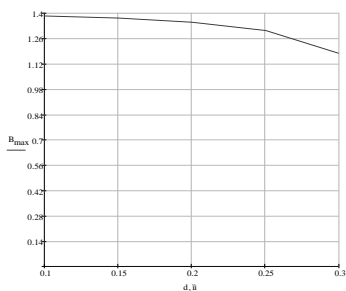


Рис. 4

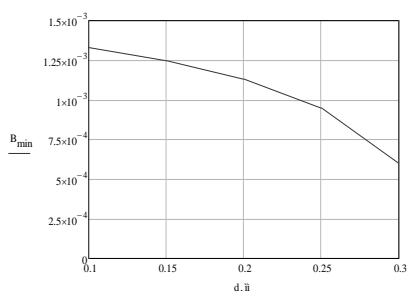


Рис. 5

С ростом величины зазора происходит снижение величины магнитных индукций, причем величина максимальной магнитной индукции

снижается значительно сильнее, чем минимальной. Это приводит к снижению величины критического перепада давлений МНЖГ.

На основании полученных результатов расчетов можно прогнозировать величину критического перепада давлений для МНЖГ с диаметрами уплотняемых валов в диапазоне от 20 до 100 мм и величинами рабочего зазора  $\delta = 0,1 - 0,3$  мм.

Даны рекомендации по выбору размеров постоянных магнитов изготовленных из сплава неодим-железо-бор.

#### Библиографический список

1. **Практическое** применение магнитоожидкостных уплотнений, разработанных в СКТБ «Полус» / Ю.О. Михалев [и др.] // 8-я междунар. конф. по магнитным жидкостям: тез. докл. – Плес, 1998. – С. 201 – 203.

2. **Орлов Д.В.,** Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. Магнитные жидкости в машиностроении; под общ. ред. Д.В.Орлова, В.В. Подгоркова. – М: Машиностроение, 1993. – 272 с.

*А.Е. Гудилко, А.И. Крюков, М.А. Луконин, студенты;  
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент*

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, разряд молнии и т.п.).

Заземление осуществляется с помощью специальных устройств – заземлителей. Они состоят из вертикальных стержней и соединяющих их горизонтальных полос. На рис. 1. приведена принципиальная схема заземления электроустановки.

В работе представлена методика определения коэффициентов поля тока в проводящей среде аналогичных коэффициентам собственной и взаимной электрической индукции электростатического поля групп уравнений Максвелла. Для их нахождения использовался программный комплекс MathCad.

В ходе работы, задавшись координатами концов токоведущих стержней, найдены их длины. Далее уравнения для трех координатных осей представляются в параметрическом виде:

$$x(t) = a1 \cdot t + x1, \text{ где } t = \{0; 1\}.$$

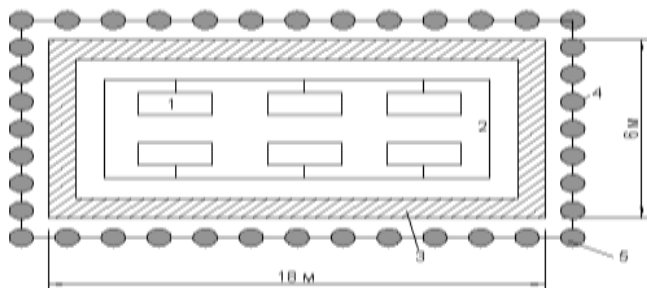


Рис. 1. 1 – заземляемое оборудование; 2 – заземлительный контур; 3 – стены здания; 4 – горизонтальный заземлитель; 5 – вертикальный заземлитель

Записав уравнения для нахождения расстояния между двумя произвольными точками, находящимися на разных прямых и задав величину диэлектрической проницаемости среды, можно рассчитать взаимные потенциальные коэффициенты между стержнями:

$$\alpha_{12} = k_{12} \cdot \iint_{t_1, s_1}^{t_2, s_2} \frac{dt ds}{r_{12}(t, s)}, \text{ где } k_{12} = \frac{l_1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l_1 \cdot l_2}$$

Воспользовавшись вышеизложенной методикой, можно рассчитать взаимные коэффициенты между прямой и плоскостью, а также между плоскостями. В этом случае уравнение плоскости заменяется уравнениями двух прямых в параметрическом виде.

Таким образом, данный подход позволяет определить взаимные коэффициенты составных частей заземления, состоящего из любого количества токопроводящих стержней и любой формы. Это позволяет найти узловые потенциалы и протекающие токи конструкции любой сложности и конфигурации.

*Н.М. Матросов, А.А. Селиванова, студенты;  
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент*

## СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Целью настоящей работы является создание математической модели петли гистерезиса в ферромагнетике.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

- Создать общую модель петли;
- Сопоставить полученные результаты с опытными данными.

Моделирование производилось в программе MathCAD, предназначенной для решения математических задач и построения графиков функций с использованием методов приближенных вычислений.

На первом этапе, после детального анализа поведения петли гистерезиса, без учета магнитной вязкости, на основе классической теории, предполагающей отсутствие доменной структуры и однородное значение магнитной проницаемости в случае слабого поверхностного эффекта, приходим к следующей формуле для динамической петли магнитного гистерезиса в ферромагнетике:

$$\underline{H(t)} := \text{Hst}(B(t)) + \frac{1}{3} \cdot \delta^2 \cdot \gamma \cdot \left( \frac{d}{dt} B(t) \right),$$

где  $\delta$  – толщина листа,  $\gamma$  – удельная электропроводность,  $H(t)$  – напряженность магнитного поля,  $B(t)$  – индукция,  $\text{Hst}(B)$  – статическая составляющая петли гистерезиса.

В ходе моделирования была смоделирована петля гистерезиса при синусоидальном изменении индукции магнитного поля (рис. 1).

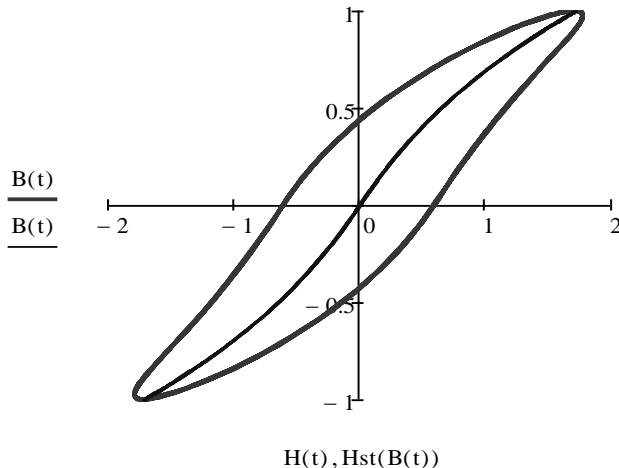


Рис. 1. Пример петли гистерезиса при  $B(t) := \sin(5t)$

На рис. 2 представлен тот же сердечник при перемагничивании не-синусоидальной функцией.

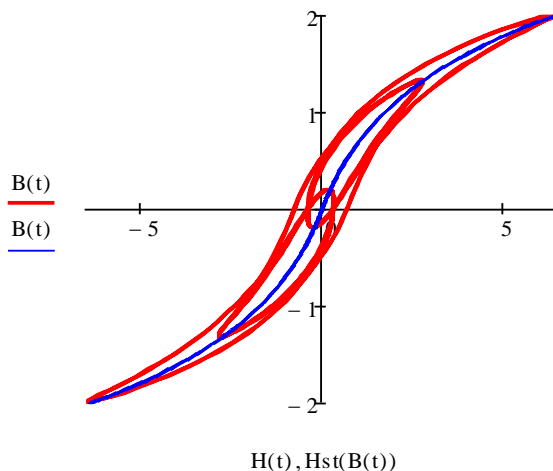


Рис. 2. Пример петли гистерезиса при  $B(t) := \sin(5t) + \sin(t)$

*С.Ю. Токарев, асп.; рук. С.Н. Кадников, д.т.н., проф.*

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

При математическом моделировании ЛЭП процесс распространения электромагнитных волн в длинных линиях ЛЭП обычно представляется состоящей из двух компонентов: собственного сопротивления проводов (зависящим от марки проводов и их числа в фазе) и взаимным сопротивлением (зависящим от геометрического расположения проводов). Данное представление не совсем справедливо, т.к. не учитывается факт того, что в действительности ЛЭП располагается над неидеальной (вызывающей потери) землей. Данный факт был известен достаточно давно (с начала 20-х прошлого века), но в силу сложности расчетов упускался. В последние годы полная модель линии, учитывающая том числе и потери в неидеальной земле, была введена в ведущие (АТР-EMTP, Simulink) программы моделирования энергосистем, что позволило повысить точность моделирования процессов.

Исторически, первые модели, учитывающие влияние конечной проводимости земли, были предложены в 20-х годах прошлого века американским ученым Дж. Р. Карсоном (для воздушных линий) и австрийским



ученым Ф. Поллачеком (для кабельных линий). В 30-х и 40-х интерес к этой теме несколько приутих, т.к. практически производить расчеты и, тем более применять их на практике, было не возможно в силу отсутствия в то время достаточных вычислительных мощностей. Позднее, лишь с начала 50-х, в эру появления первых компьютеров, начали предлагаться более точные модели как в частотной, так и во временной областях. Более того, в 80-х были получены аппроксимирующие формулы, не требующие громоздких расчетов несобственных интегралов. А в 90-х были разработаны модели для многослойной земли (применимых, например, для крайнего севера или горных районов). Помимо этого, была достаточно детально изучена зависимость влияния земли сопротивления на общее сопротивление ЛЭП от частоты и проводимости почвы.

В отечественной практике большой вклад в теорию внес в 50-х Г.А. Гринберг, а в практику в 70-х Перельман Л.С. Последний составил математические таблицы для упрощения расчетов.

Все эти работы по исследованию влияния конечной проводимости земли представляют значительный интерес для практического применения в РЗА в виду того, что на основе полной модели ЛЭП строятся все волновые алгоритмы.

Принципиальная значимость волновых алгоритмов заключается в том, что они являются в настоящее время единственным реальным способом получения высокоточных алгоритмов ОМП с абсолютной погрешностью (до 300 м), а не относительной ( $\sim 2 \div 5$  % от длины линии). Кроме того, именно волновые принципы лежат в основе современных быстродействующих алгоритмов защит абсолютной селективности воздушных линий 500 кВ и выше.

В силу наличия в нашей стране большого количества магистральных линий 500 кВ волновые методы представляют особую значимость. Линии этого класса напряжения имеют значительную протяженность и важность для энергосистемы в целом. Поэтому повреждения должны быть отключены максимально быстро, а время их отыскания минимальным. Более того, для сетей 6 ÷ 35 кВ (работающих в режиме изолированный нейтралли) вопросы отыскания места повреждения при замыканиях на землю решаются именно применением волновых методов.

Стоит отметить, что ряд зарубежных кампаний уже производят столь необходимые для нашей страны приборы РЗА, основанные на волновом принципе. Но их стоимость столь высока, что отечественные энергосистемы не могут себе позволить крупномасштабное применение таких приборов (особенно для сетей 6 ÷ 35 кВ). Поэтому актуальной задачей в настоящее время является создание собственных отечественных волновых алгоритмов и с их помощью (на базе отечественных разработ-

чиков приборов РЗиА) создавать приборы, стоимость которых будет, как минимум на порядок, ниже стоимости зарубежных аналогов.

*С.Ю. Токарев, асп.; рук. С.Н. Кадников, д.т.н., проф.*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ**

В данной работе рассматривается методика расчета процесса распространения электромагнитных волн сложной формы вдоль линии электропередачи, возникающих при обрыве одного из проводов или короткого замыкания. При моделировании таких процессов необходимо учитывать тот факт, что сопротивление линии и постоянная распространения сложным образом зависят от частоты. Для решения этой проблемы используется модель на основе решений уравнений Максвелла, которая сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка для каждой составляющей спектра сигнала. В математической модели линии, помимо учета влияния внутреннего и внешнего сопротивлений, во внимание принимается факт конечной проводимости земли. Стоит отметить, что обычно в моделях линий влияние земли не рассматривается, что вносит значительные погрешности в расчет волновых процессов. В данной же модели этот недостаток отсутствует. Особенностью распространения волн  $n$ -фазных системах является то, что в системе существует  $n$  постоянных распространения. Поэтому в нашем случае каждая гармоническая составляющая сигнала образует две волны (каждая волна будет иметь свою постоянную распространения), которые распространяются с разными скоростями и с разными затуханиями. Это обстоятельство можно использовать для измерения расстояния до места возникновения волны. Для этого в линию посылается импульс сигнала прямоугольной формы. В результате чего по расстояниям фронтов образовавшихся волн можно произвести суждение о расстоянии до места повреждения. Данная модель может быть использована в качестве основы для создания приборов определения места повреждения (ОМП) на волновом принципе для применения в РЗиА. Это принцип может позволить добиться абсолютной точности ОМП до  $\pm 150$  м, что крайне важно для протяженных магистральных линий, а учет влияния в модели конечной проводимости земли в значительной мере повышает точность ОМП в горных районах и районах крайнего севера. Данный метод представляется единственно возможным для применения в сетях с изолированной нейтралью.

*В.Д. Карачев, студ.; рук. В.Г. Белоногов,  
А.Н. Голубев, д.т.н., проф., В.А. Мартынов, д.т.н., проф.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ М-ФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ ELCUT**

Ускоренное развитие техники и технологии диктует ужесточение требований к качеству и производительности расчетно-проектировочных работ, вынуждая отказываться от старых подходов к конструкторским задачам в пользу современных, более продуктивных. Классические методы расчета с применением только математического аппарата успешно применяются вплоть до настоящего времени, однако, они либо весьма трудоемки, либо не обладают приемлемой точностью. Также часто в силу специфичности данные методы непригодны для решения всей задачи целиком, вынуждая вести несколько параллельных расчетов в рамках одной задачи.

Наличие адекватной математической модели электромеханического преобразователя энергии является неременным условием как для успешного исследования электромагнитных процессов, происходящих в реальном объекте, так и для синтеза САУ электроприводом (ЭП). Математическое описание должно отвечать таким основным требованиям, как универсальность, достаточная точность, удобство практического использования.

На данный момент существует несколько видов математической модели двигателя [1], решение их представляется очень трудоемким и недостаточно наглядным. В данной работе предложен метод моделирования с применением программы отечественной фирмы Elcomsoft ElCut, совмещающий в себе инструменты моделирования электромагнитного поля машины и его анализа. С помощью ElCut можно существенно оптимизировать алгоритм расчета, поскольку в нем реализована возможность создания надстроек для гибкого управления функционалом программы, позволяющим инженеру выбрать наиболее подходящую для него модель двигателя, имея техническое задание.

Проведенные исследования [2] показали, что одним из перспективных вариантов создания ЭП переменного тока с улучшенными энергетическими и регулировочными характеристиками является его построение на базе синхронного двигателя (СД) с увеличенным числом фаз статорной обмотки.

Особенности математического описания многофазного СД с постоянными магнитами (СДПМ) непосредственно связаны с характером конструктивного исполнения этого типа ЭПМ. Возбуждение здесь происходит не от электромагнитной обмотки возбуждения, а от постоянных магнитов. Рассмотрим один из возможных подходов к решению задачи создания математической модели  $m$ -фазного СДПМ, основанный на представлении магнитной системы машины. Магнит выполняет две функции:

источника МДС, который заменяет обмотку возбуждения машины с электромагнитным возбуждением, и участка магнитопровода с определенным магнитным сопротивлением.

Внутренняя магнитная проводимость  $\lambda_m = 1/R_m$  и фиктивная МДС магнита  $F_{m0}$  позволяют представить магнит в виде эквивалентной обмотки возбуждения без потерь, подключенной к источнику тока и создающей МДС  $F_{m0}$ .

Такой подход дает возможность записывать уравнения синхронной машины с постоянными магнитами аналогично уравнениям синхронной машины с электромагнитным возбуждением. В частности для эквивалентной 2-фазной машины они выглядят следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi}{dt} - \omega \psi_q; \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi}{dt} - \omega \psi_d; \\ \psi_d &= L_d i_d + L_{dm} I_{m0}; \\ \psi_q &= L_q i_q, I_{m0} = \text{const.} \end{aligned}$$

Здесь  $L_d = x_d / \omega$  и  $L_q = x_q / \omega$  – полные индуктивности фазной обмотки статора по осям  $d$  и  $q$ ;  $L_{dm} = x_{dm} / \omega$  – взаимная индуктивность между обмоткой статора и магнита.

Решение задачи велось для многофазного СД с цилиндрическим постоянным магнитом в качестве ротора. Выбор данной машины обусловлен интересом изучения способов управления многофазными СД.

На первом этапе с учетом указанных в техническом задании характеристик проектируемого двигателя были подобраны материалы исполнения и по справочникам определены коэффициенты, которые входят в определяющие геометрические параметры машины уравнения.

Вторым этапом являлось написание программы, автоматически осуществляющей управление модулями ElCut. В нее пользователь в диалоговом режиме заносит данные технического задания (номинальная и максимальная мощности, число фаз, номинальные напряжение и скорость). Исходя из полученных начальных данных, программа вычисляет необходимые геометрические параметры двигателя, затем подает команду на исполнение непосредственно графическому модулю ElCut. При этом производится построение сечения двигателя, создание меток материалов и присвоение их блокам. При графическом построении главным условием является сохранение расчетной площади паза. По ее значению вычисляются размеры паза и происходит его графическое представление.

Следующий шаг включал в себя разбиение элементов имеющейся модели на блоки с целью присвоения каждому элементарному блоку итерационно рассчитанного значения магнитной проницаемости  $\mu$ . Это позволит фиксировать данный параметр для каждого участка машины с целью расчета само- и взаимоиндуктивностей ее обмоток. Сопоставление результатов искусственного итерационного расчета с оптимизированным расчетом EICut показал предельные отклонения значений  $\mu$  в 8 %. Данная погрешность связана с ограничением числа блоков и является оптимальным результатом, так как увеличение числа блоков на 10 % увеличивает время расчета на 40 %.

Для определения индуктивностей была создана подпрограмма, которая использует средства EICut («интегральный калькулятор») и автоматически распределяет токи по обмоткам (в одну фазу подается номинальный ток, токи остальных фаз равны нулю). При определении индуктивностей обмоток статора намагничивающие свойства ротора не учитываются, то есть его коэрцитивная сила приравнивается к нулю при сохранении остальных параметров (магнитная проницаемость, размеры). Результатом расчета является матрица индуктивностей статора  $[L]$ . Учет намагничивающего действия магнита определяется на следующем этапе. Его реализация проходит по тому же алгоритму, что и расчет  $[L]$ , отличие заключается в механизме поворота ротора (изменение угла намагниченности в свойствах блока «магнит» на 20 градусов для каждого случая): он последовательно переориентируется по фазам статора, изменяя поток через них с нуля до максимума. Таким образом, формируется матрица  $[\varphi_n]$ . В результате все матрицы конструктивных параметров машины известны заранее и можно приступать непосредственно к этапу расчетов.

Для реализации этого направления разработаны математические модели  $m$ -фазного СД для квазистационарных и динамических режимов с учетом несинусоидального характера распределения магнитного поля в воздушном зазоре машины при произвольной форме питающего напряжения, удовлетворяющие задачам анализа и синтеза многофазных ЭМС. Предложение модели  $m$ -фазного СД позволяют аналитическими и численными методами исследовать электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе.

В матричной форме записи уравнение  $m$ -фазного СД имеют вид:

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [U] - [R][i]; \quad (1)$$

$$[\psi] = [L][i]. \quad (2)$$

При учете нелинейности характеристики магнитопровода получаем

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [i]; \quad (3)$$

$$[L] \frac{d[i]}{dt} = [U] - [R][i] - \frac{d[L]}{dt} [i]; \quad (4)$$

$$\frac{d[L]}{dt} = \frac{d[L]d\alpha}{d\alpha \cdot dt} = \left| \frac{d\alpha}{dt} \right| = \omega = \omega \frac{d[L]}{d\alpha}; \quad (5)$$

$$[L] \frac{d[i]}{dt} = [U] - [R][i] - \omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i]; \quad (6)$$

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left( [U] - [R][i] - \omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] \right), \quad (7)$$

где

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{1m} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \dots & M_{2m} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & \dots & M_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & M_{nm} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

При учете нелинейности магнитной характеристики алгоритм следующий:

1. Для всех зон задаем значения  $\mu$  на начальном участке зависимости  $B(H)$ .
2. Задаем поочередно малые (чтобы был начальный участок  $B(H)$ ), значения токов  $i_1, i_2, \dots, i_m$  и определяем поочередно столбцы матрицы  $[L]$ , учитывая при этом, что  $M_{ik} = M_{ki}$ .
3. Для получения матрицы  $[L]$  при  $i(0) = 0$  интегрируем уравнение (7), которое на данном этапе принимает вид

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} [U]. \quad (9)$$

В результате получаем значения  $[i]$  на 1-м шаге.

4. Для получения токов  $[i]$  итерационным методом определяем значения  $\mu$  во всех зонах.
5. Опять определяем матрицу  $[L]$  по столбцам.
6. Делаем поворот ротора на  $\Delta\alpha$ , и определяем по столбцам матрицу  $[L^1]$  для этого угла.

Тогда

$$\frac{d[L]}{dt} \approx \frac{[L^1] - [L]}{\Delta\alpha}. \quad (10)$$

Теперь известна вся правая часть (7), интегрируем (7), находим новые значения  $[i]$  и т.д.

В упрощенном варианте моделирования  $m$ -фазного СД ( $\mu = \text{const}$ ) может быть использован следующий алгоритм:

1. Определяются значения  $\mu$  в различных зонах (путем задания зависимости  $B(H)$  для номинального режима.

Затем эти  $\mu$  задаются константами для отдельных зон.

2. Задавая поочередно значения токов  $i_1, i_2, \dots$ , определяем поочередно столбцы матрицы

$$[L(\alpha)] = \begin{bmatrix} L_1(\alpha) & M_{12}(\alpha) & \dots & M_{1m}(\alpha) \\ M_{21}(\alpha) & L_2(\alpha) & \dots & M_{2m}(\alpha) \\ M_{31}(\alpha) & M_{32}(\alpha) & \dots & M_{3m}(\alpha) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1}(\alpha) & M_{n2}(\alpha) & \dots & L_{nm}(\alpha) \end{bmatrix} \quad (11)$$

в функции угла  $\alpha$  поворота ротора ( $\mu = \text{const}$ ). При этом  $M_{ik}(\alpha) = M_{ki}(\alpha)$ .

3. Определяются значения производных  $\frac{d[L(\alpha)]}{d\alpha}$ .

4. Полученные матрицы аппроксимируются выбранным полиномом.

5. Теперь в системе уравнений

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left( [U] - [R][i] - \omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] \right) \quad (12)$$

матрицы всех конструктивных параметров известны наперед.

6. Осуществляется интегрирование системы уравнений (2), и полученные токи  $[i]$  передаются в модель ElCut, где осуществляется расчет поля.

#### Библиографический список

1. **Маргын** В.А. Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств. – Иваново, 2000. – 140 с.

2. **Голубев А.Н.**, Лапин А.А. Многофазный синхронный регулируемый электропривод / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет В.И. Ленина». – Иваново, 2008.

3. **Слежановский О.В.**, Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

*А.С. Ялховских, студ.; рук. А.В. Макаров, к.т.н. доцент*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

Технический прогресс в различных отраслях народного хозяйства вызвал рост потребности кабельной продукции и необходимости создания новых типов кабелей и проводов с более высокими характеристиками.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в настоящее время активно замещают кабели с бумажной изоляцией в классах среднего и высокого напряжения и предназначены для передачи и распределения электроэнергии на объектах с чрезвычайно высокими уровнями энергопотребления и плотностью нагрузки

Своими уникальными свойствами СПЭ кабели обязаны применяемому изоляционному материалу. Способ вулканизации, применяемый при его изготовлении, позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции и обеспечить отсутствие воздушных включений. Помимо хороших диэлектрических свойств, изоляция из сшитого полиэтилена обладает большим, чем у других материалов, диапазоном рабочих температур и отличными механическими характеристиками.

Основным преимуществом СПЭ-кабелей по сравнению другими типами изоляции является низкая повреждаемость. По данным из иностранных источников, процент электрических пробоев СПЭ кабелей на 2 – 3 порядка ниже.

К достоинствам СПЭ кабелей можно отнести:

- высокая стойкость к превышению допустимых токовых нагрузок;
- малые значения относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь;
- благодаря хорошей влагостойкости полиэтилена, отпадает необходимость в металлической оболочке кабеля;
- низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба;
- большая пропускная способность из-за увеличенной рабочей температуры жилы до 90°;
- возможность прокладки на участках с большим перепадом высот;
- возможность прокладки без предварительного подогрева при температурах до –20 °С;
- высокий ток термической устойчивости при коротком замыкании;
- большие строительные длины;
- увеличение срока службы кабеля.

В таблице приводятся некоторые сравнительные характеристики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и кабелей с бумажной изоляцией (БПИ).



<b>Сравнительная характеристика СПЭ-кабелей и с бумажной изоляцией</b>		
Основные показатели	Вид изоляции кабелей	
	БПИ	СПЭ
1. Длительно допустимая рабочая температура, °С	70	90
2. Температура при перегрузках, °С	75	130
3. Стойкость к токам КЗ, °С	200	250
4. Нагрузочная способность, %		
- при прокладке в земле	100	117
- при прокладке в воздухе	100	120
5. Разность уровней при прокладке, м	115	без ограничения
6. Трудоемкость при монтажах и ремонтах	высокая	низкая
7. Показатели надежности – удельная повреждаемость, шт./100 км год		
- в свинцовых оболочках	~ 6	
- в алюминиевых оболочках	~ 17	в 10 – 15 раз ниже

Обладая хорошими эксплуатационными свойствами в некоторых случаях лучшими, чем у кабелей БПИ, кабели СПЭ просты в монтаже, и имеют короткий цикл изготовления. Разработаны специальные муфты для осуществления соединений между кабелями с БПИ и СПЭ изоляциями, применение данных кабелей возможно не только при прокладке новых линий, но и при ремонте существующих.

Сравнивая традиционные и СПЭ кабели по технико-экономическим показателям, можно определить сферы, где применение СПЭ кабеля может быть наиболее целесообразно:

- кабельные трассы с напряжением 15, 20, 35 кВ;
- в схемах где требуется передача большой мощности, например вывод мощности от генератора на шины РУ тепловой электростанции;
- для схем, где кабель БПИ максимального сечения не проходит по пропускной способности (пропускная способность СПЭ кабеля выше и максимальное сечение жилы может достигать 800 мм<sup>2</sup>);
- при большой разнице уровней по трассе прокладки;
- особые требования надежности электроснабжения.

Наряду с широко разрекламированными достоинствами процессе эксплуатации СПЭ кабелей стали проявляться некоторые особенности о которых производители либо умалчивали, либо попросту скрывали.

Длительно допустимая рабочая температура токопроводящих жил кабеля с изоляцией из СПЭ составляет 90 °С, является завышенной для реальных условий эксплуатации. Повышение температуры в кабеле требует отвода выделившегося тепла от кабеля в окружающую среду. Некоторые мировые производители силовых кабелей с изоляцией из СПЭ в своих рекомендациях по эксплуатации упоминают о необходимости снижения допустимой температуры токопроводящей жилы при прокладке в земле, чтобы не подвергать изоляцию кабеля ускоренному тепловому старению.

Высокий уровень напряжения кабеля приводит к необходимости использования в конструкции кабеля металлического экрана. Способ заземления экрана влияет на:

- величину тока в экране в нормальных и аварийных режимах и при неправильном заземлении экрана может привести к повреждению кабеля;
- электрические потери в кабеле (в металлическом экране), а значит на его тепловой режим и пропускную способность;
- величину напряжения на экране в нормальных и аварийных режимах, т.е. на надежность работы кабеля и безопасность его обслуживания;
- основные электрические параметры кабеля.

Опыт эксплуатации КБПИ, а также мониторинг различных аномальных режимов эксплуатации в городских кабельных сетях показал, что электрический пробой изоляции при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в 60 – 70 % случаев самоликвидируется и эксплуатационный персонал эти аварийные режимы не фиксирует. Высокая «живучесть» КБПИ обусловлена спецификой диэлектрической среды. В рассматриваемом случае перемежающаяся дуга горит в замкнутом объеме изоляции в месте возникновения ОЗЗ и в зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю, скорости восстановления электрической прочности в месте горения дуги и восстанавливающегося напряжения (зависящего от параметров сети) аварийный режим может самоликвидироваться.

При электрическом пробое твердого диэлектрика кабель не сможет восстановить свою электрическую прочность, и любое ОЗЗ будет приводить к устойчивому аварийному режиму. В этом случае эксплуатационному персоналу каждое возникновение ОЗЗ в изоляционной системе кабельной линии необходимо будет устранять.

Отмеченные недостатки и особенности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена кабеле требуют дополнительных исследований первоочередными из которых это оценка теплового режима и расчет и анализ схем заземления их.

#### Библиографический список

1. **Справочник** по кабелям. – М.: Электроника, 2005.
2. **Правила** устройства электроустановок / Главгосэнергонадзор России. – 7-е изд. – М.: Энергосервис 2009. – 488 с.
3. **Кабели 6 – 10 кВ** с изоляцией из сшитого полиэтилена – требования к прокладке / К.П. Кадомская, С.А. Кандаков, Ю.А. Лавров // *Новости электротехники.* – 2005. – № 6 (36).

## СЕКЦИЯ 14

### ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Председатель – д.т.н., профессор **Назарычев А.Н.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Скоробогатов А.А.**

*И.И. Колесникова, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.*

#### НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ АСКУЭ В УСЛОВИЯХ ОПТОВОГО И РОЗНИЧНОГО РЫНКА

Переход к оптовому рынку в процессе реконструкции энергетики и введение в работу интегрированной информационной расчетной системы администрирования торговли влечет за собой значительное увеличение коммерческой информации на всех уровнях управления, предъявляет новые, более жесткие требования к учету электроэнергии и мощности субъектов рынка. Электроэнергия из категории социальных гарантий стала товаром. Для стабильной работы товарного рынка необходима система, которая обеспечивала бы точное измерение количества товарной продукции на всех уровнях – от производства до поставщика ее конечного потребителя. Такова автоматизированная система контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1].

Основные требования, предъявляемые к АСКУЭ:

- комплексный автоматизированный коммерческий технический учет электроэнергии;
- контроль энергопотребления по всем энергоносителям;
- фиксация отклонений контролируемых величин энергоучета;
- сигнализация об отклонений контролируемых величин с целью принятия оперативных решений;
- прогнозирование величин энергоучета с целью планирования энергопотребления.
- выполнение измерений 30-минутных приращений активной и реактивной электроэнергии, периодический (1 раз в сутки) или по запросу;
- прием результатов измерений от смежных по электрическим сетям субъектов оптового и розничного рынка;
- хранение данных об измеренных величинах в специализированной базе данных;

- передача в вышестоящую систему АСУ результатов измерений данных о состоянии объектов и средств измерений;

- предоставление контрольного доступа к результатам измерений, данных о состоянии объектов и средств измерений по запросу со стороны ИАСУ КУ;

- защита оборудования, программного обеспечения и данных от несанкционированного доступа на физическом и программном уровне.

При реконструкции к трансформаторам тока и напряжения предъявляются следующие требования:

- для воздушных и кабельных линий с номинальным напряжением 220 кВ и выше – не хуже 0,2S;

- присоединений с установленной мощностью 100 МВт и более – не хуже 0,2S.

Технические параметры и метрологические характеристики коммерческих счетчиков должны соответствовать требованиям ГОСТ 30206 (для реактивной энергии ГОСТ 26035):

- проводить реверсивный учет там, где возможны перетоки электроэнергии в двух направлениях, а также учет активной и реактивной энергии (интегрированной реактивной мощности);

- иметь класс точности не хуже 0,5S;

- обеспечивать возможность подключения резервного источника и автоматического переключения на источник резервного питания;

- обладать энергонезависимой памятью для хранения профиля нагрузки с получасовым интервалом;

- обеспечивать подключение по одному или нескольким цифровым интерфейсам компонентов АСКУЭ;

- иметь энергонезависимые часы, обеспечивающие ведение даты и времени.

В докладе рассмотрены вопросы проектирования АСКУЭ на примере реконструкции реальной подстанции которые включают в себя:

- определение сечения токовых цепей;

- определение потерь напряжения от трансформатора тока до счетчика;

- мероприятия по подготовке объекта;

- таблицу средств АСКУЭ.

#### Библиографический список

1. Цели, принципы организации и создания АСКУЭ субъектов рынка на примере МУП «Ивгорэлектросеть» / В.А. Савельев [и др.] // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. – Вып. 54. – Проблемы обеспечения надежности систем энергетики и методы их решения. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. – С. 84 – 96.

*Д.В. Шелудько, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.*

## **МОНИТОРИНГ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Важным элементом электрических сетей и систем, во многом определяющим надежность и экономичность их функционирования являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы. Неисправности трансформаторного оборудования, приводящие к отказам в работе или аварийным отключениям, могут приносить значительные убытки энергосистемам и потребителям.

Сегодня энергетические компании пытаются добиться наибольшего снижения капитальных вложений в обновление и как можно дольше эксплуатировать уже работающее оборудование. Отсюда первостепенное значение приобретает разработка новых и усовершенствование существующих методов диагностики силового маслянаполненного оборудования с применением оптимально подобранного комплекса контролируемых параметров.

Главная особенность силовых трансформаторов как объекта контроля, диагностирования и мониторинга – это использование бумажно-масляной изоляции с охлаждением циркулирующим маслом в баке, защищенном от окружающего воздуха. Большие мощности трансформаторов и классы напряжения определяют высокую степень использования активных материалов, способных выдерживать опасные тепловые воздействия и высокие напряженности электрического и магнитного полей, а также большие механические воздействия при КЗ в сети. Поэтому при эксплуатации возникает необходимость контроля факторов ведущих к быстрому старению бумажной изоляции и ее нагреву, к определению сроков периодической подпрессовки обмоток, тщательного изолирования масла от воздействия окружающего воздуха (защита от увлажнения). И все это – при недоступности к этим узлам.

Система мониторинга силовых трансформаторов (автотрансформаторов) представляет собой подсистему АСУ ТП подстанции, которая позволяет отслеживать состояние оборудования в процессе эксплуатации и давать информацию о необходимости выполнения профилактических и ремонтных работ в зависимости от реального состояния трансформатора. Таким образом, это первый уровень отслеживания состояния оборудования на подстанции [1].

Система мониторинга предоставляет информацию для контроля состояния основных узлов трансформатора (вводы, обмотки, изоляция, система охлаждения, переключатель напряжения и т. д.) и регулирования

режимов его работы, для своевременного принятия необходимых мер при предаварийных режимах и для анализа аварийных режимов.

В докладе рассмотрены основные задачи и функции систем мониторинга, а также статистика повреждений трансформаторов.

#### Библиографический список

1. **Методические** вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. – Вып. 60: Технологические особенности мониторинга силовых трансформаторов / В.А. Савельев [и др.]; под ред. В.А. Савельева. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – С. 50 – 62.

*Е.А. Новоселов, студ.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.*

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Энерговооруженность общества – основа его научно-технического прогресса, база развития производительных сил. Ее соответствие общественным потребностям – важнейший фактор экономического роста. В связи с этим необходимо шире внедрять нетрадиционные, альтернативные преобразователи АПЭ. К ним относят солнечную, геотермальную и ветровую энергию, а также энергию биомассы, океана и пр. Нетрадиционные источники они экологичны, возобновляемы, основой их служит энергия Солнца и Земли.

Преимущества таких источников следующие: бесконечность возобновляемых энергоресурсов, снижение эмиссии окиси углерода, децентрализация энергоснабжения, освоение новых высоких технологий, энергетическая эффективность

По прогнозу Мирового энергетического конгресса в 2020 году на долю альтернативных преобразователей энергии (АПЭ) придется 5,8 % общего энергопотребления. При этом в развитых странах (США, Великобритании и др.) планируется довести долю АПЭ до 20 % (20 % энергобаланса США – это примерно все сегодняшнее энергопотребление в России). В странах Европы планируется к 2020 г. обеспечить экологически чистое теплоснабжение 70 % жилищного фонда. Сегодня в мире действует 233 геотермальные электростанции (ГеоТЭС) суммарной мощностью 5136 мВт, строятся 117 ГеоТЭС мощностью 2017 мВт. Ведущее место в мире по ГеоТЭС занимают США (более 40 % действующих мощностей в мире). Там работает 8 крупных солнечных ЭС модульного типа общей мощностью около 450 мВт, энергия поступает в общую энергосистему

страны. Выпуск солнечных фотоэлектрических преобразователей (СФАП) достиг в мире 300 мВт в год, из них 40 % приходится на долю США. В настоящее время в мире работает более 2 млн гелиоустановок горячего водоснабжения. Площадь солнечных (тепловых) коллекторов в США составляет 10, а в Японии – 8 млн м<sup>2</sup>. В США и в Японии работают более 5 млн. тепловых насосов. За последние 15 лет в мире построено свыше 100 тыс. ветроустановок с суммарной мощностью 70000 мВт (10 % энергобаланса США). В большинстве стран приняты законы, создающие льготные условия, как для производителей, так и для потребителей альтернативной энергии, что является определяющим фактором успешного внедрения.

На АПЭ в России приходится приблизительно 0,05 % общего энергобаланса, в 1995 году – 0,14 %, на 2005 год было запланировано около 0,5 – 0,6 % энергобаланса страны (т.е. приблизительно в 30 раз меньше, чем в США, а если учесть соотношение энергобалансов, то у нас «запланировано» отставание примерно в 150 раз). Всего в России 1 ГеоТЭС (Паужекская, 11 МВт), и то технологически неперспективная, 1 приливная ЭС (Кислогубская, 400 кВт), 1500 ветроустановок (от 0,1 до 16 кВт), 50 микро ГЭС (от 1,5 до 10 кВт), 300 малых ГЭС (2 млрд кВт/ч), солнечные электростанции (в сумме приблизительно 100 кВт), солнечные коллекторы площадью 100 000 м<sup>2</sup>, 3000 тепловых насосов (от 10 кВт до 8 МВт).

Таким образом, по всем видам АПЭ Россия находится на одном из последних мест в мире.

Сегодня одной из бурно развивающихся отраслей является развитие ветроэнергетики. Так в конце 2008 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 120 ГВт, увеличившись вшестеро с 2000 года.

Наиболее перспективными местами для производства энергии из ветра считаются прибрежные зоны. В море, на расстоянии 10 – 12 км от берега (а иногда и дальше), строятся офшорные ветряные электростанции. Башни ветрогенераторов устанавливаются на фундаментах из свай, забитых на глубину до 30 метров.

Технический потенциал ветровой энергии России оценивается свыше 50 000 миллиардов кВт·ч/год. Экономический потенциал составляет примерно 260 млрд кВт·ч/год, то есть около 30 % производства электроэнергии всеми электростанциями России.

Установленная мощность ветровых электростанций в стране на 2007 год составила около 15 МВт.

Одна из самых больших ветроэлектростанций России (5,1 МВт) расположена в районе поселка Куликово Зеленоградского района Калининградской области. Ее среднегодовая выработка составляет около 6 млн кВт·ч.

Таким образом сегодня в России выделяется большое внимание развитию нетрадиционных источников среди которых особое место занимает ветроэнергетика.

**Библиографический список**

1. **Усманова Д.Е.** Приручение ветра // Энергетика. Наш регион. – 2004. – № 11.
2. **Новости** электротехники. –Режим доступа: [www.news.elteh.ru](http://www.news.elteh.ru).

*Д.С. Балин, студ.; рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент*

**РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ  
«МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ  
ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ»**

В настоящее время большую часть электрической энергии, которая вырабатывается в нашей стране, потребляют асинхронные электродвигатели.

Техническое состояние и надежность работы электродвигателей оказывает критическое влияние на уровень производственных рисков, а также на обеспечение безопасности жизни и здоровья людей.

Выявление повреждений короткозамкнутой обмотки ротора (ОР) асинхронного электродвигателя производится в основном во время ремонтов. Изучению ремонтных методов контроля посвящена лабораторная работа «Методы ремонтного контроля состояния короткозамкнутой ОР электродвигателя», внедренная в учебный процесс в 2008 году.

В последнее время все больше внимания уделяется методам оперативного контроля состояния «беличьей клетки», так как большая периодичность ремонтов не позволяет своевременно определить возникшие неисправности в обмотке ротора, что часто приводит к работе электродвигателя с оборванными стержнями.

Поэтому выпускники кафедры «Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования» должны иметь навык работы не только с устройствами ремонтного, но и оперативного контроля состояния ОР.

В данной работе использованы четыре из существующих методов оперативного функционального контроля состояния ОР [1], [2].

Основные цели лабораторной работы:

- 1) Изучение существующих методов оперативного контроля состояния «беличьих клеток».
- 2) Приобретение практических навыков выявления диагностических признаков оборванных стержней во время работы машины.



3) Приобретение практических навыков определения состояния короткозамкнутой ОП на работающем электродвигателе.

Основными частями лабораторного стенда являются асинхронный электродвигатель, нагрузка, которая моделируется генератором постоянного тока и лампами, трансформаторы тока (ТТ), установленные в каждой фазе, внутренний индуктивный датчик (ВИД), комплект контрольно-измерительных приборов К-505. Более подробно стенд описан в [3]. Сигналы со всех датчиков поступают в компьютер, через специальную плату L-780, которая оцифровывает сигнал. Обработка и вывод информации производится компьютером с помощью программного пакета MATLAB. Запись сигнала производится с помощью программы L-Graf. Стенд имеет три ротора одного типа. Первый ротор – исправный, второй имеет один оборванный стержень, третий – два стержня.

Данная лабораторная работа рассчитана на выполнение группой студентов в количестве четырех человек. Длительность работы составляет четыре часа. По своей структуре лабораторную работу можно разделить на три части:

1. Работа с лабораторным стендом. Получение экспериментальных данных;
2. Обработка экспериментальных данных. Выполнение индивидуального задания;
3. Домашнее задание.

Экспериментальными данными являются сигналы, записанные с ВИД и ТТ, паспортные данные двигателя и показания комплекта К-505.

Для более простой и удобной работы с экспериментальными данными в программном пакете MATLAB был создан специальный программный модуль с графическим интерфейсом. В нем представлены два метода контроля состояния ОП машины: дифференциальный (по магнитному полю в воздушном зазоре электродвигателя) и интегральный (по току статора электродвигателя).

При интегральном методе контроля по графику сигнала, снятого с ТТ (см. рис. 1), определяется его максимальная и минимальная амплитуда, затем рассчитывается коэффициент пульсации. Сильная пульсация тока в обмотке статора является одним из признаков наличия оборванных стержней. После построения зависимости величины коэффициента пульсации от мощности на валу электродвигателя делается предварительный вывод о наличии оборванных стержней в каждой из обмоток.

Затем, по спектральной плотности мощности сигнала (рис. 2) определяется частота сети, по частотам зубцовых гармонических ротора первого порядка вычисляется скольжение, определяется амплитуда и частота пятой гармоники, генерируемой фиктивной ОП (ФОР).

Оценка состояние обмотки ротора производится по величине амплитуды пятой гармоники, генерируемой ФОР, и по относительному отклонению скольжения.

Подобным образом производится обработка данных по дифференциальному методу, однако, в отличие от интегрального, его результатом является определение числа и месторасположения оборванных стержней. Расчет скольжения и определения частоты производится таким же способом, как и в интегральном методе.

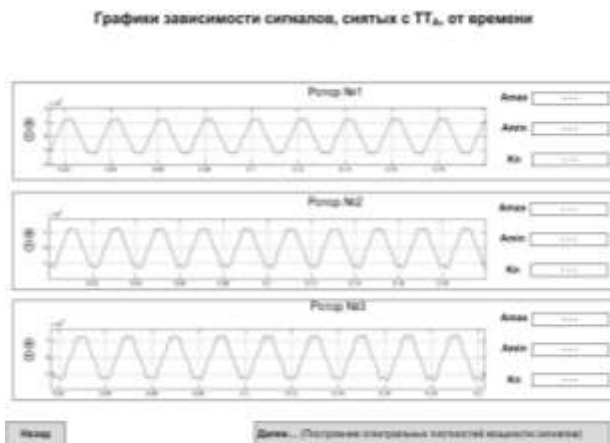


Рис.1. Зависимости сигналов, снятых с трансформатора тока

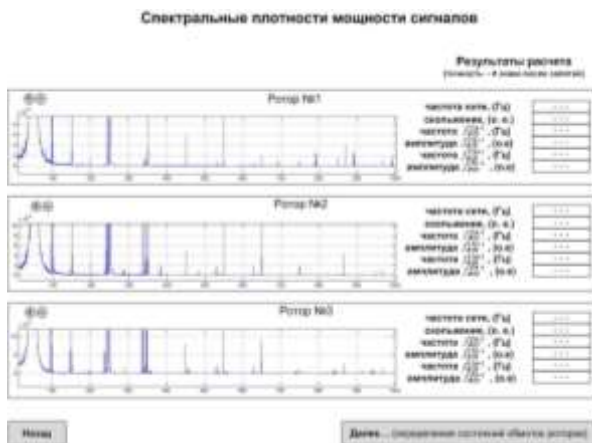


Рис. 2. Спектральные плотности мощности сигналов с трансформатора тока фазы А

По окончании обработки данных программа выдает электронный отчет. В качестве домашнего задания студентам предлагается оформить отчет в рукописном виде.

**Вывод.** Разработанная лабораторная работа позволяет студентам получить практические навыки выявления диагностических признаков оборванных стержней во время работы машины и навыки определения состояния короткозамкнутой ОР на работающем электродвигателе.

#### Библиографический список

1. Сахновский Н.Л. Испытание и проверка электрического оборудования. – М.: Энергия, 1975.
2. Скоробогатов А.А. Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – Иван. энерг. ун-т, Иваново, 2006. – С. 75 – 78.
3. Репринцев Р.А. Разработка лабораторного стенда «Исследование методов контроля состояния обмоток асинхронного двигателя» // Вестник ИГЭУ. – Вып. 3 – Иван. энерг. ун-т, Иваново, 2004. – С. 121 – 122.

*А.А. Прохоров, студ.; рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент*

### ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ «ВЕЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ» НА ОСНОВЕ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Проблема создания вечных двигателей многие столетия будоражит умы изобретателей и ученых всего мира и является по-прежнему актуальной. Интерес к постоянным магнитам усиливается в последние годы, в связи со значительным прогрессом в создании сильных постоянных магнитов, а отчасти, в связи с простотой предлагаемых конструкций магнитных двигателей.

Как и у обычных источников энергии, КПД магнита не будет сто процентным, к тому же у ферритового магнита срок жизни около 70 лет.

Классификация и принцип работы «вечных» магнитных двигателей, к которым в частности, относятся кольцевой магнитный двигатель, приведены в [1].

В работе предпринята попытка доказать невозможность создания «Вечных двигателей» на основе энергии постоянных магнитов, на примере кольцевого магнитного двигателя.

Конструкция такого простого магнитного двигателя показана на рис. 1 и 2: магнитный двигатель состоит из центрального неподвижного кольцевого магнита с радиальной намагниченностью 1 и двух кольцевых магнитов с осевой намагниченностью 2, 3, размещенных жестко на штанге 4 соосно с кольцевым магнитом 1.

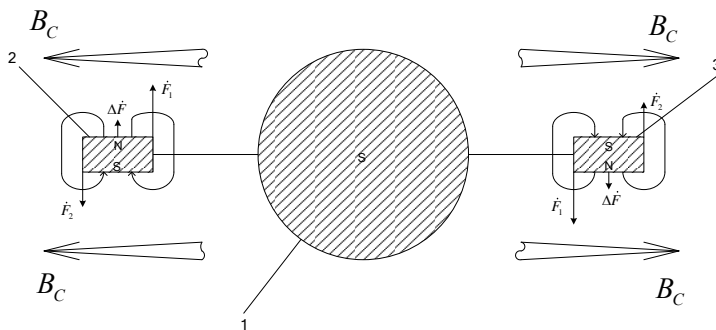


Рис. 1. Кольцевой магнитный двигатель (вид сверху)

Поместив в центр магнитное кольцо и закрепив на нем магниты 2, 3, мы создаем условия для вращения магнитов 2, 3 вокруг магнита 1. Магниты ротора находятся в одной плоскости с кольцом, и, следовательно с полем статора  $B_c$ . На магниты (и следовательно на штангу) будут действовать моменты  $M$  – на магниты. То есть говоря простым языком: сила  $F_1$  больше  $F_2$ , и результирующая сила  $\Delta F$  создает момент  $M$ , обуславливающий работу нашего двигателя.

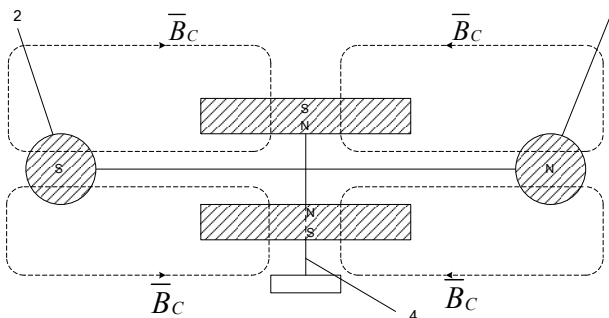


Рис. 2. Кольцевой магнитный двигатель (вид сбоку)

Конструкция такого простого магнитного двигателя показана на рис. 1 и 2: магнитный двигатель состоит из центрального неподвижного кольцевого магнита с радиальной намагниченностью 1 и двух кольцевых магнитов с осевой намагниченностью 2, 3, размещенных жестко на штанге 4 соосно с кольцевым магнитом 1.

Поместив в центр магнитное кольцо и закрепив на нем магниты 2, 3, мы создаем условия для вращения магнитов 2, 3 вокруг магнита 1. Маг-

ниты ротора находятся в одной плоскости с кольцом, и, следовательно с полем статора  $B_c$ . На магниты (и следовательно на штангу) будут действовать моменты  $M$  – на магниты. То есть говоря простым языком: сила  $F_1$  больше  $F_2$ , и результирующая сила  $\Delta F$  создает момент  $M$ , обуславливающий работу нашего двигателя.

**Причина неработоспособности.** Причина неработоспособности рассмотрена на рис. 3.

В данном случае индукции  $B_3$  и  $B_4$  будут создавать силы  $F_3$  и  $F_4$ , которые будут уравнивать силы  $F_1$  и  $F_2$ , и следовательно результирующая сила, действующая на магниты 2 и 3 равна 0 ( $F_{PE3} = 0$ ), не будет создаваться момент и наш двигатель работать не будет.

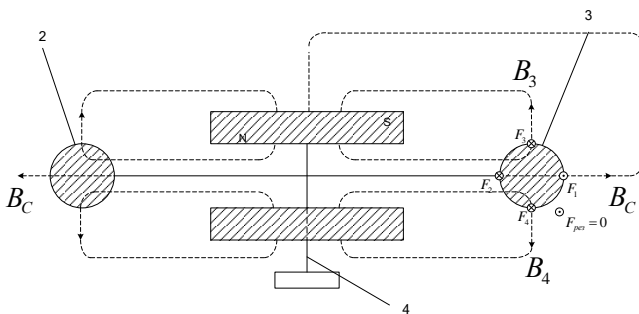


Рис. 3. Кольцевой магнитный двигатель (причина неработоспособности)

В данном случае индукции  $B_3$  и  $B_4$  будут создавать силы  $F_3$  и  $F_4$ , которые будут уравнивать силы  $F_1$  и  $F_2$ , и следовательно результирующая сила, действующая на магниты 2 и 3 равна 0 ( $F_{PE3} = 0$ ), не будет создаваться момент и наш двигатель работать не будет.

## Выводы

К сожалению, отсутствие общей теории преобразования энергии магнитных полей в иные виды энергии является до сих пор существенным препятствием для их развития и совершенствования.

Проблема создания «Вечного двигателя» на основе постоянных магнитов заключается в том, что силовые линии магнитного поля являются замкнутыми.

## Библиографический список

1. <http://www.dudishev2.narod.ru>.

*П.В. Жуков, студ., Е.М. Новоселов, асп.;  
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБМОТКИ РОТОРА НА СПЕКТР ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Надежность работы электрических станций в значительной мере зависит от надежности системы электроснабжения собственных нужд. Повреждаемость электрооборудования из года в год увеличивается, так как возрастает его износ.

Основную часть электрооборудования собственных нужд составляют асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором.

Одним из слабых узлов АД с тяжелым условием пуска является обмотка ротора, в которой часто происходят обрывы стержней. Данная неисправность не только ухудшает рабочие и пусковые характеристики машины, но и может привести к повреждению обмотки статора концом оборванного стержня.

Таким образом, оперативный контроль состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД является актуальной задачей.

Большинство существующих методов диагностики требуют установки датчика внутри машины, что может привести к выходу ее из строя.

Наиболее перспективные методы диагностики данного вида повреждения основаны на анализе тока статора и внешнего магнитного поля машины [1]. В первом случае диагностика производится с помощью штатных приборов (трансформаторов тока), во втором – с помощью наружного индукционного датчика.

Данная работа посвящена поиску нового диагностического признака наличия оборванного стержня в обмотке ротора АД путем исследования влияния обрыва стержней на гармонический состав внешнего магнитного поля машины.

С этой целью было проведено исследование влияния обрыва стержней на внешнее магнитное поле электродвигателя при различной нагрузке на валу машины. Принципиальная схема испытательной установки представлена на рис. 1.

В ходе эксперимента сначала снимались данные с наружного индукционного датчика (НИД) при полностью исправном двигателе. Затем моделировался обрыв стержней (одного и двух) и сбор данных повторялся. В результате были получены спектральные плотности мощности (СПМ) сигналов для исправного и неисправного двигателя, представленные на рис. 2.

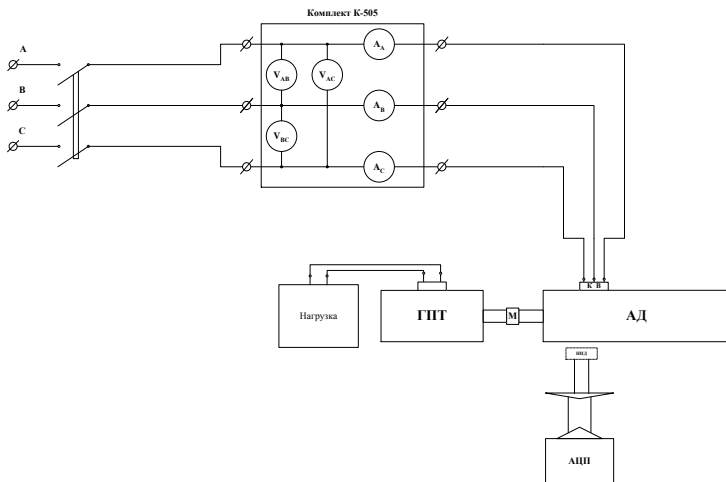


Рис. 1. Структурная схема испытания

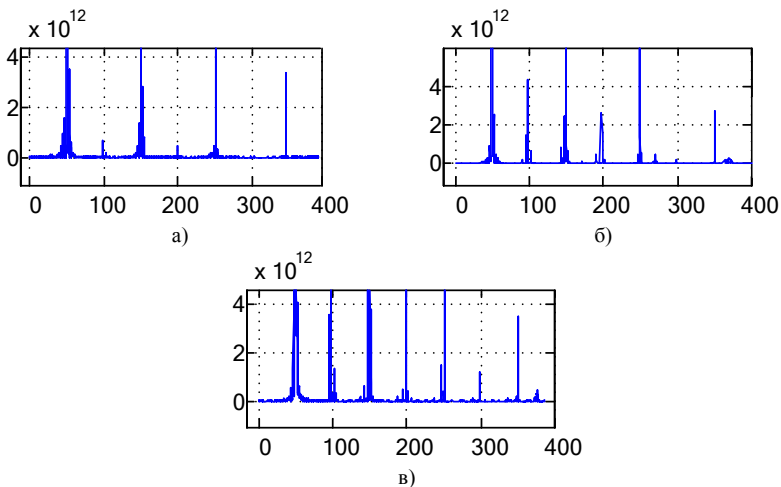


Рис. 2. Спектральные плотности мощности сигналов, снятых с НИД: а) ротор исправен; б) обрыв 1 стержня; в) 2 стержней

Сравнение СПМ двигателя с исправным ротором (рис. 2, а), с ротором, имеющим один (рис. 2, б) и два (рис. 2, в) оборванных стержня, показало, что на частотах 100 и 200 Гц резко повышается амплитуда сигнала, причем с увеличением количества поврежденных стержней амплитуда

увеличивается. Следовательно, данные сигналы могут служить диагностическим признаком обрыва стержней короткозамкнутого ротора АД.

#### Библиографический список

1. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 13 – 15.

*А.О. Комаров, студ.; рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доцент*

### **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ «ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ»**

Процессы модернизации методов систем образования студентов с использованием дистанционного обучения занимают все большую роль в современной методике обучения. На сегодняшний день существуют множество автоматизированных обучающих систем (АОС).

АОС представляет собой комплекс обучающего курса лекций (электронный учебник) и системы контроля (тестирование студентов).

Преимущества использования автоматизированной обучающей системы:

1. Позволяет осуществлять удаленное обучение:
  - удобно для студентов заочного отделения;
  - удобно для студентов пропустивших лекции.
2. Контроль знаний осуществляется с помощью системы тестирования:
  - однозначные вопросы;
  - удобно для преподавателя.
3. Позволяет упростить преподавательский труд:
  - web-учебник для заочников с системой самоконтроля ;
  - автоматическая проверка тестов и выставление оценок;
  - совместный (преподаватель и компьютер) контроль за студентом.

Недостатком является то, что в случае удаленного обучения нет полной уверенности в том, что студент самостоятельно выполняет тестирование.

Система позволит модернизировать существующий ранее процесс обучения. АОС позволяет проконтролировать теоретические знания студента.

В данной работе разработана АОС по первой части курса «Математические задачи электроэнергетики», читаемого студентам специальности «Электрические станции».

Создание АОС осуществлено на базе Гипертеста 2.0 (Hupertest 2.0) [1, 2]. На рис. 1 показано то, что будет доступно обучаемому (web-учебник).



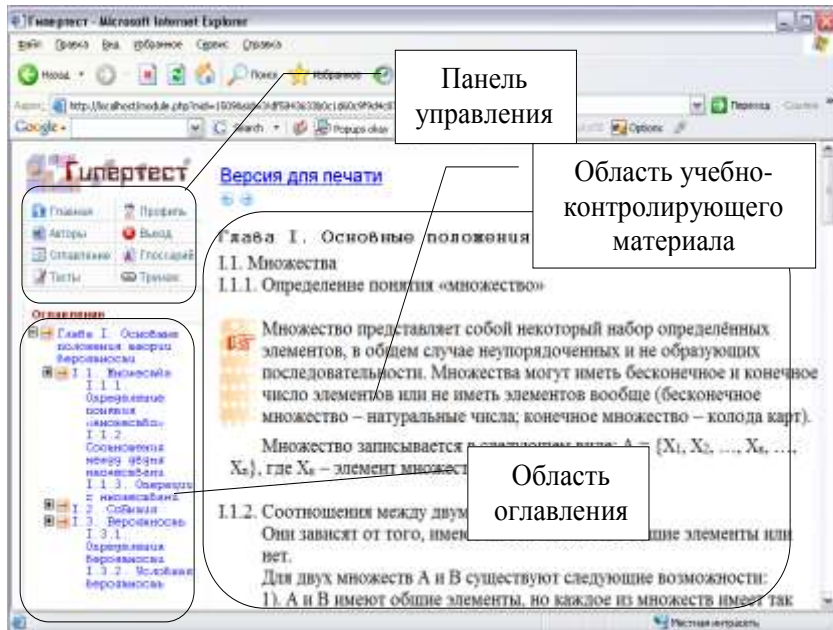


Рис. 1. Структура web-учебника

Панель управления обеспечивает следующие возможности:

Таблица 1. Функции управляющих ссылок

Наименование	Функция
Главная	Возврат на главную страницу
Профиль	Просмотр персонального профиля знаний
Авторы	Просмотр сведений об авторах учебной программы
Выход	Завершение сеанса работы
Оглавление	Просмотр структуры учебного материала в формате оглавления
Глоссарий	Просмотр структуры учебного материала в формате словаря
Тесты	Формирование списка тестов
Тренаж	Формирование списка процедур тренажа

Область оглавления предоставляет студенту доступ к следующим структурным единицам материала выбранной программы: модули (кнопка «Оглавление»), элементы знаний (кнопка «Глоссарий»), процедуры тренировки и контроля (кнопки «Тренаж» и «Тесты»).

На рис. 2 показан вариант вопроса на тестировании.

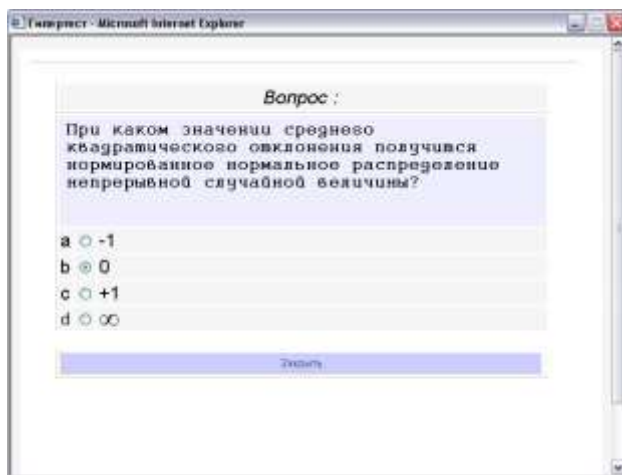


Рис. 2. Пример вопроса

На основе пройденного тестирования оцениваются знания и работа студента с АОС.

#### Библиографический список

1. **Пантелеев Е.Р.**, Суворов В.А. Сервер приложений среды Web-обучения ГИПЕРТЕСТ 2.0 (СП ГИПЕРТЕСТ). Св-во о регистрации в ОФАП №7809 от 26.02.07, номер ВНИИЦ – 50200700456 от 01.03.07

2. **Пантелеев Е.Р.** Средства поддержки жизненного цикла Web-обучения в инструментальном комплексе ГИПЕРТЕСТ 2.0 // Информационные технологии. – 2007. – № 2. – С. 39 – 45

*А.Л. Новоселов, студ.; рук. О.Н. Калачева, к.т.н., доцент*

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УПРОЩЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ УСПЕШНОСТИ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

При учебном проектировании электростанции (ЭС) производится оценка успешности самозапуска электродвигателей 6 кВ на секции собственных нужд. При этом используется инженерный метод «По величине  $U_{нач}$ ». Расчет с использованием этого метода предполагает составление расчетной схемы и схемы замещения, включающей элементы самой ЭС и

прилегающих энергосистем. В результате расчетов определяется  $U_{НАЧ}$  – начальное напряжение самозапуска [1, 2].

Схема станции и примыкающих систем может состоять из большого количества элементов, и расчет оказывается трудоемким. Хотя сам метод «По величине  $U_{НАЧ}$ » – это метод приближенной оценки. Поэтому, имеет смысл оценить необходимость учета всех элементов станции и энергосистем, сравнив результаты расчета  $U_{НАЧ}$  для двух вариантов:

1. при расчете учитываются все элементы расчетной схемы (рис. 1, а);

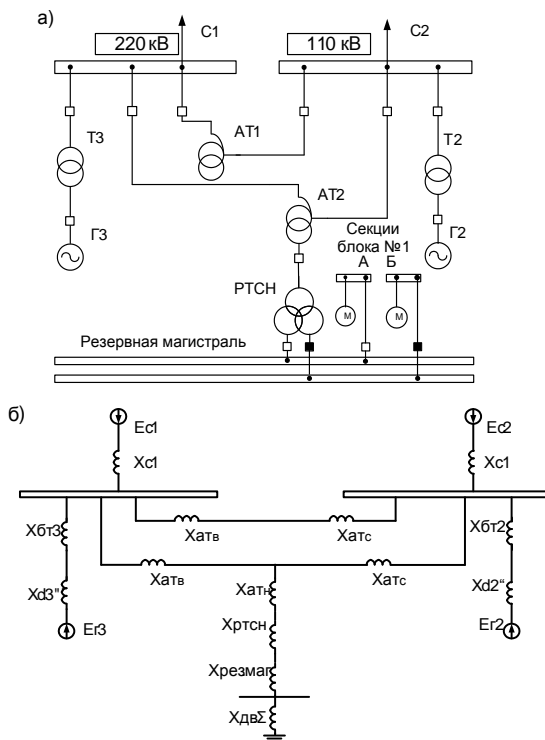


Рис. 1. Реальная расчетная схема самозапуска ЭД 6 кВ блока №1 КЭС (а) и схема замещения (б)

2. расчетная схема упрощается представлением части элементов реальной расчетной схемы в виде системы бесконечной мощности, подключенной непосредственно к обмотке высшего напряжения резервного трансформатора собственных нужд (РТСН) (рис. 2, а).

В данной статье рассматриваются результаты такого расчета по данным пылеугольной станции типа КЭС с тремя блоками 300 МВт.



Рис. 2. Упрощенная расчетная схема самозапуска (а) и схема замещения (б)

Для рассмотренных случаев составлены схемы замещения (рис. 1, б и рис. 2, б) и проведен расчет  $U_{НАЧ}$  для режима самозапуска по данным реального пылеугольного блока 300 МВт, который позволяет определить величину погрешности, возникающей при упрощении инженерного метода. Расчет произведен для РТСН мощностью 25000, 32000 и 40000 кВА. Трансформаторы такой мощности могут быть установлены в качестве РТСН на подобной станции.

Относительная погрешность расчета определялась по формуле:

$$\delta = \frac{|U_{НАЧ.1} - U_{НАЧ.2}|}{U_{НАЧ.1}} \cdot 100 \% .$$

Результаты расчета для двух вариантов применения инженерной методики «По величине  $U_{НАЧ}$ » для резервных трансформаторов трех различных мощностей приведены в таблице.

**Результаты оценки относительной погрешности при неучете реальной примыкающей схемы**

Варианты мощности РТСН	40000 кВА	32000 кВА	25000 кВА
$X_{РТСН}$ , Ом	0,236	0,295	0,313
$U_{НАЧ1}$ при расчете с учетом всех элементов схемы станции, о.е.	0,655	0,608	0,595
$U_{НАЧ2}$ при неучете реальной расчетной схемы, о.е.	0,693	0,641	0,627
$\delta$ , %	5,802 %	5,428 %	5,378 %

**Вывод.** Из таблицы видно, что величина погрешности, вносимая упрощением, не превышает 6 %. Причем на рассматриваемой ЭС в зависимости от вида применяемого топлива, а также от схемы выдачи мощности, в которой могут устанавливаться или не устанавливаться генераторные выключатели, на блоке 300 МВт могут использоваться РТСН раз-

ной мощности. По результатам расчета видно, что величина погрешности тем выше, чем мощнее установленный резервный трансформатор.

Поэтому можно рекомендовать для экономии времени вначале применять расчет  $U_{нач}$  по упрощенной расчетной схеме, и только в тех случаях, когда рассчитанное значение  $U_{нач}$  оказывается близким к допустимому значению  $U_{нач, доп}$ , провести уточненный расчет по полной расчетной схеме.

#### Библиографический список

1. **Рожкова Л.Д.,** Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: учеб. для техникумов. – М.: Энергия, 1980. – 600 с.
2. **Система** собственных нужд электрических станций: метод. указания для выполнения курсового проекта / В.С. Козулин, В.М. Лапшин // Иван. энэрг. ин-т им. В.И. Ленина, 1989.

*С.Н. Литвинов, студ.; рук. О.Н. Калачева, к.т.н., доцент*

### СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ЗАДАНИЯ МОМЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ И МЕХАНИЗМА

Один из основных вопросов, с которым сталкиваются проектировщики, – это вопрос выбора электродвигателей к механизмам собственных нужд. Большая часть механизмов, участвующих в производственном процессе, – это механизмы вентиляторной и насосной группы. Существует несколько методик, которые были созданы для данных расчетов, и которые используются в настоящее время. Отличие данных методик друг от друга заключается в способе задания моментных характеристик двигателя и механизма. В задачи данной работы входит систематизация различных подходов, а также выработка рекомендаций по процессу выбора привода.

В различных литературных источниках по-разному предлагается учитывать момент сопротивления механизма. В применяемой в проектной практике методике ОРГРЭС [2] предлагается формула для момента сопротивления механизма в о.е. вида

$$m_{c*} = m_{c,нач*} + (K_3 - m_{c,нач*}) \cdot (1-s)^2, \quad (1)$$

где  $m_{c,нач*}$  – начальный момент сопротивления;  $s$  – скольжение;  $K_3$  – коэффициент загрузки механизма.

Сыромятниковым И.А. [1] предлагается использовать следующее выражение

$$m_{c*} = a \cdot (m_{c.нач*} + (1 - m_{c.нач*}) \cdot (1 - s)^2), \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент загрузки электродвигателя расчетной мощностью механизма.

В [4] представлены результаты расчета с использованием выражений (1) и (2). Рассчитаны значения времени пуска ( $t_n$ , с), превышения температуры обмотки статора в конце первого пуска ( $\vartheta_1$ , °С) и в конце двух последовательных пусков ( $\vartheta_{II}$ , °С) для электродвигателей разной мощности. Полученные результаты сведены в табл. 1 для анализа.

Таблица 1. Результаты расчета параметров пусковых режимов при различном задании  $m_{c*}$

Использованное выражение для $m_{c*}$	$P_{\text{д.ном}}$ , кВт	$t_n$ , с	$\vartheta_1$ , °С	$\vartheta_{II}$ , °С
$m_{c*} = a \cdot (m_{c.нач*} + (1 - m_{c.нач*}) \cdot (1 - s)^2)$ , по [1]	1600	21,88	34,22	59
	2500	15,71	21,87	37,7
$m_{c*} = m_{c.нач*} + (K_3 - m_{c.нач*}) \cdot (1 - s)^2$ , по [2]	1600	22,8	35,66	61,5
	2500	17,03	23,7	40,87

Попарно сравнивая значения рассчитанных величин для одной мощности двигателя, видим, что при  $P_{\text{д.ном}} = 1600$  кВт  $t_n = 21,88$  и  $22,8$  с;  $\vartheta_1 = 34,22$  и  $35,66$  °С;  $\vartheta_{II} = 59$  и  $61,5$  °С, то есть разница в цифрах составляет  $\leq 4$  %.

При  $P_{\text{д.ном}} = 2500$  кВт  $t_n = 15,71$  и  $17,03$  с;  $\vartheta_1 = 21,87$  и  $23,7$  °С;  $\vartheta_{II} = 37,7$  и  $40,87$  °С, то есть разница в цифрах составляет  $\leq 7,76$  %.

Для моментной характеристики электродвигателя в вышеприведенных расчетах использовалась формула Клосса, с корректировкой момента электродвигателя при  $s < s_{кр}$ . Данная формула имеет следующий вид

$$m_{\text{дв}*} = \frac{2 \cdot m_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (3)$$

Но возможен и другой вариант задания моментной характеристики электродвигателя. В.Х. Георгиади в своей работе [3] предлагает при  $U_{\text{д}} = U_{\text{ном}}$  использовать аппроксимирующие аналитические выражения вида

$$m_{\text{дв}*} = \begin{cases} \frac{2 \cdot m_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \text{ при } s \leq s_{кр}; \\ \frac{2 \cdot m_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} + \left( \frac{m_n - 2 \cdot m_{\text{макс}} \cdot s_{кр}}{1 + s^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{s - s_{кр}}{1 - s_{кр}}} \text{ при } s > s_{кр}. \end{cases} \quad (4)$$

Для оценки возможности использования различных способов задания моментных характеристик электродвигателя и их влияния на результат расчета параметров пусковых режимов были проведены расчеты, в которых  $m_c^*$  механизма представляется выражением (2), а  $m_{де}^*$  представляется двумя способами, описанными выше. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета параметров пусковых режимов при различном задании  $m_{де}^*$

Использованное выражение для $m_{де}^*$	$P_{д.ном}$ , кВт	$t_n$ , с	$\vartheta$ , °С	$\vartheta_{п}$ , °С
Момент двигателя задается по формуле Клосса (3) с корректировкой	1600	21,88	34,22	59
Момент двигателя задается по выражению (4)	1600	35,5	55,52	95,73

Из табл. 2 видно, что использование аналитического аппроксимирующего выражения для  $m_{де}^*$  (второй расчет) дает затяжку пуска по времени и приводит к увеличению значений превышения температуры, причем отличия от первого расчета существенные.

### Выводы

1. Использование некорректного выражения (1) для момента сопротивления механизма приводит к ошибке расчета, которая тем больше, чем больше мощность ЭД по отношению к мощности механизма и может достигать 7,76 %. Поэтому в проектной практике при выборе электродвигателей по условиям пуска следует применять выражение (2), приводимое Сыромятниковым И.А. в [1].

2. Выбор двигателя с использованием выражения (4) для представления моментной характеристики электродвигателя может привести к разным результатам, т.к. расчетные значения температур получаются значительно более высокими. Поэтому для окончательного решения вопроса о возможности использования выражений (4) для  $m_{де}^*$  требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований, так как расхождение результатов по сравнению с оправдавшей себя в долговременных проектных расчетах инженерной методикой – существенное.

### Библиографический список

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Методические указания по испытаниям электродвигателей собственных нужд электростанций и расчетам режимов их работы при перерывах питания. Ч. 3. Приложение 2. – М.: Союзтехэнерго, 1983. – 80 с.
3. Георгиади В.Х. Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд. Ч. 1. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 80 с.

4. **Калачева О. Н.**, Литвинов С. Н., Рассказчиков А. В. О корректности выражений для момента сопротивления механизма, применяемых при выборе электродвигателей собственных нужд // Повышение эффективности работы энергосистем: тр. ИГЭУ. – Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009.

*А.Д. Новиков, И.М. Александров, студенты;  
рук. А.Н. Назарычев, д.т.н., проф.*

## **РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ПО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

В настоящее время состояние электрических станций, подстанций и сетей требует замены устаревшего морально и физически оборудования на современное. Имеющиеся учебные, справочные научные пособия не предоставляют полную и актуальную на данный момент информацию для учебного проектирования. Возникает потребность в разработке более новых справочных материалов по всем видам электрооборудования.

На кафедре ЭСПиДЭ разработан каталог, который предназначен для ознакомления с современными инновационными разработками в области электроэнергетики и использовании их на этапе проектирования новых или реконструкции устаревших элементов энергообъектов.

В настоящей работе до конца разработано два модуля: по силовому трансформаторному оборудованию и по выключателям. Каталог содержит основные, наиболее часто используемые при проектировании, данные, извлеченные из прейскурантов, каталогов и другой нормативно-технической документации заводов изготовителей, и представленные в удобной табличной форме.

Каталог Электрооборудования представлен в формате PDF (Portable Document Format), что позволяет производить просмотр и использование данного каталога на любом ПК, имеющим установленную свободно распространяемую программу Abode Reader.

Структура каталога (рис. 1) включает в себя шесть основных элементов:

- каталог трансформаторного оборудования (Силовые и автотрансформаторы) ведущих отечественных и мировых производителей, с возможностью выбора по классу номинального напряжения (6 – 750 кВ);
- каталог выключателей (Вакуумные и Элегазовые) ведущих отечественных и мировых производителей, с возможностью выбора по классу номинального напряжения (6 – 750 кВ), по значению номинального тока (630 – 4000 А), и по классу номинального тока отключения (5 – 50 кА);
- учебник – справочный материал по конструкции и основным характеристикам высоковольтного трансформаторного и коммутационного оборудования;



- контакты – список заводов-изготовителей, представленных в тексте каталога, с указанием адресов возможной обратной связи;
- установка – список программ, необходимых для более полного функционирования ресурсов каталога;
- справка – основные сведения о структуре и возможностях каталога.

Все каталожные (наиболее часто используемые при проектировании) данные по представленным видам оборудования изображаются в табличном виде (рис. 2), и включают в себя:

- для трансформаторного оборудования: □ тип,  $S_{ном}$ , напряжение обмоток, потери  $P_x$ , потери  $P_k$ ,  $I_{xx}$ , %,  $U_{xx}$ , %;
- для выключателей: тип, номинальное напряжение, наибольшее рабочее напряжение, номинальный ток, номинальный ток отключения, ток термической стойкости, ток динамической стойкости, собственное время отключения, собственное время включения.

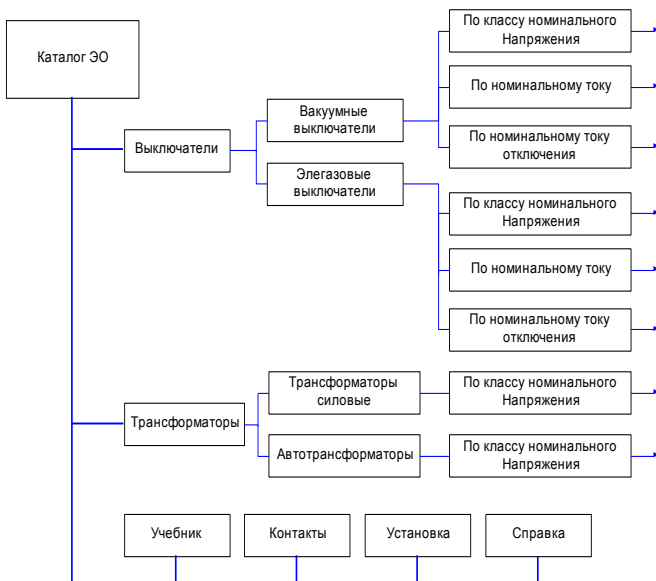


Рис. 1. Структурная схема КЭО

Навигация по телу каталога производится нажатием соответствующих клавиш, изображенных на каждой странице каталога, и имеет возможность перехода на последующую (необходимый информационный блок), предыдущую страницу или в основное меню, что на много упрощает использование данных, представленных в нем.

На каждой странице каталога имеется сопроводительная информация, разъясняющая назначение данного блока, для более легкого поиска.

Так же имеется возможность легкого переноса необходимой информации из таблиц каталога в другие текстовые редакторы методом копирования выделенного единичного текста, блока текста целиком, или изображения, с использованием буфера обмена.

В данном каталоге в настоящее время представлены наиболее необходимые при проектировании данные по двум видам высоковольтного оборудования, а так же справочные материалы по их конструкции и основным характеристикам. В перспективе же рассчитывается пополнение этой базы:

- функцией памяти;
- функциями автоматического поиска и подбора необходимой информации по заранее заданным характеристикам;
- пополнением более широкого ассортимента электрооборудование (добавления блоков капающих данных по трансформаторам тока, по трансформаторам напряжения, по разъединителям, реакторам и т.д.);
- внесение дополнительной информации по уже рассмотренным или вновь создаваемым видам оборудования:
  - ценами, заявленными заводом изготовителем;
  - изображениями, чертежами и разборными 3D моделями каждого из указанного оборудования, облегчающими не только его выбор, но и установку, эксплуатацию, а также проведения всех видов ремонтов;
  - а также функцией информационной защитой и индивидуализацией каждой из копий электронного каталога (самостоятельное введение комментариев или необходимой дополнительной информации в любой из блоков каталога.)

*А.С. Фаткулин, студ.; рук. А.Н. Назарычев, д.т.н., проф.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МАЛОМАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ВМТ**

За последнее десятилетие резко сократились объемы строительства электрических станций и сетей как взамен пришедших в негодность, так и для присоединения новых потребителей. Сократились объемы работ по техническому перевооружению и реконструкции, а также всех видов ремонтов, направленных на восстановление основных фондов и поддержки их в технически исправном состоянии. Сокращение объемов нового строительства электрических станций и сетей, взамен пришедших в негодность, увеличило долю оборудования, срок службы которого превы-

шает нормативный. Это относится и к масляным выключателям, которых на объектах энергетики установлено достаточно много. Выключатели высокого напряжения служат для коммутации электрических цепей во всех эксплуатационных режимах, включение и отключение токов нагрузки, токов намагничивания трансформаторов и зарядных токов линий и шин, отключение токов КЗ, а также при изменении схем электрических установок.

Как показала практика эксплуатации высоковольтных маломасляных выключателей, важнейшей частью, влияющей на надежность их работы, является качество исполнения фарфоровых покрышек, поломки которых приводят к отключениям потребителей и к повреждению оборудования. При этом требования, предъявленные к выключателям во всех режимах следующие: надежное отключение любых токов в пределах номинальных значений; быстрое действие при отключении, т.е. гашение дуги в возможно меньший промежуток времени, что вызывается необходимостью сохранения устойчивости параллельной работы станций при КЗ; пригодность для автоматического повторного включения, после отключения электрической цепи защитой; взрыво- и пожаробезопасность; удобство обслуживания.

Основными конструктивными частями выключателей являются токопроводящие и контактные системы с дугогасительными устройствами, изоляционные конструкции, корпуса и вспомогательные элементы (газотводы, предохранительные клапаны, указатели положения и т.д.) передаточные механизмы и привода.

Гашение дуги в масляных выключателях обеспечивается воздействием на нее дугогасящей среды – масла. Процесс сопровождается сильным нагревом, разложением масла и образованием газа в виде газового пузыря (температура газовой смеси в камере выключателя достигает значений 800 – 2500 К).

Был проведен анализ аварийности и некоторых случаев выхода из строя выключателей серии ВМТ-110 кВ в сетевой компании «МРСК Центра и Приволжья». Так например с февраля по апрель месяц 2009 года в нескольких филиалах МРСК «Центра и Приволжья» произошло несколько случаев повреждения масляных выключателей 110 кВ серии ВМТ-110Б. В ряде случаев повреждение выключателей сопровождалось отключением ПС с погашением потребителей. Аналогичные случаи произошли в других МРСК при схожих обстоятельствах и в тот же период времени.

Установлено, что отказы и повреждения выключателей происходят в основном из-за конструктивных недостатков, низкого качества изготовления отдельных узлов и деталей, неправильной регулировки и несоблюдения правил при монтаже, а также недостатков эксплуатации. Рассмотрим один из таких случаев.

На ПС «Пучеж» в филиале «Ивэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья» 12.04.2009 г. в 08 час 42 мин. на масляном выключателе 110 кВ серии ВМТ-110Б установленного в цепи трансформатора Т-1 произошло разрушение верхнего элемента (изолятора дугогасительной камеры) средней фазы «В» вдоль тела фарфорового изолятора. Масляный выключатель находился в отключенном (статическом) состоянии под АВР.

В тоже время в филиале МРСК «Центра» «Костромаэнерго» произошли аналогичные повреждения выключателей серии ВМТ из-за перепада температур в ночное и дневное время суток.

По информации ОАО «МРСК Центра и Приволжья» 24 февраля 2009 года в филиале «Кировэнерго» произошло технологическое нарушение, связанное с повреждением маломасляного выключателя серии ВМТ 110 кВ, а именно: отключилась ВЛ 110 кВ Селезиха – Талица из-за разрушения колонки секционного выключателя СВ-110 кВ (тип выключателя ВМТ-110Б) и повреждения трансформатора тока ТТ-1 СВ-110 кВ (тип ТФЗМ-110) ПС Талица. Отключенная мощность составила 4,2 МВт.

Опыт эксплуатации выключателей ВМТ выявил частую повреждаемость фарфоровых покрышек. По имеющейся у предприятия-изготовителя данным причинами разрушения покрышек выключателей являются недостатки их:

- около 80 % разрушений относится к покрышкам собственного производства завода Урализолятор (УИЗ, г. Камышлов) и существовавшего до 1990 года совместного производства УИЗ-ГДР (фарфоровое тело изготавливалось в ГДР, армировку проводил УИЗ). Фарфоровые тела этих покрышек изготавливались из массы марки С-110;

- около 20 % разрушений относится к покрышкам производства ВЗЭФ (г. В. Луки). Фарфоровые тела этих покрышек изготавливались из массы марки С-120.

- по покрышкам производства СЗВИ (г. Славянск) зафиксированы единичные случаи разрушения. Фарфоровые тела этих покрышек изготавливались из улучшенной массы марки С-120.

Практически при всех повреждениях обнаруживались кольцевые трещины на внутренней поверхности фарфора в узлах армировки покрышек, по которым и происходило разрушение. Причем повреждались как верхние, так и нижние узлы армировки. Были зафиксированы такие же случаи разрушения изоляторов на полюсах выключателей, которые находились в упаковке (без избыточного давления) в процессе их длительного хранения. Как правило, повреждения происходили в зимний период времени, особенно в периоды резких перепадов температур окружающей среды. Причиной этих повреждений послужила нестабильность механической прочности изоляторов, обусловленная низкими механиче-

скими характеристиками применяемой отечественными производителями массы фарфора, а также циклическими нарушениями технологии изготовления и армирования фарфора.

Основными методами контроля механического состояния фарфоровых крышек высоковольтных маломасляных выключателей являются:

1. Акустико-эмиссионный контроль выполняется с помощью АЭ прибора ПКП-1 и устройства гидравлического нагружения УГН-1. Прибор ПКП-1 непосредственно предназначен для выявления развивающейся трещины в фарфоровых крышках. Устройство гидравлического нагружения УГН-1 предназначено для задания гидравлической нагрузки.

2. Ультразвуковой контроль с использованием установки на базе прибора УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП

#### Библиографический список

1. Ц-02-91(э). О предупреждении отказов маломасляных выключателей серии ВМТ.
2. Инструкция по эксплуатации масляных выключателей 6 – 110 кВ на подстанциях филиала «Ивэнерго», Иваново, 2008 г.
3. Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 20.07.2006 № 209.
4. Правила устройства электроустановок. М., Изд-во НЦ ЭНАС, 1999 г.

*Е.А. Киреев, студ.; рук. А.Н. Назарычев, д.т.н., проф.*

### ОЦЕНКА РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Не секрет, что износ основных фондов энергопредприятий составляет более 60 %, что является катастрофической цифрой для фундаментальной отрасли страны. Скачкообразное изменение данного показателя в сторону уменьшения просто невозможно в силу нехватки денежных средств, а также ряда других причин. В связи с этим ближайшие десятилетия обеспечение потребителей электроэнергией будет происходить на том же самом советском электрооборудовании. Моральный износ основных фондов достиг своего предела. Физический износ электрооборудования остается загадкой. Здесь и возникает вопрос: а сколько еще проработает то или иное оборудование? Этот вопрос подчеркивает актуальность данной работы.

Как известно, на физический износ электрооборудования влияют множество факторов, в том числе и климатические, которые можно отнести к одним из основных (температура окружающей среды, влажность, агрессивные среды и др.).

Несмотря на проведение плановых ремонтов, отказы оборудования встречаются в практике эксплуатации все чаще. Система предупредительно-плановых ремонтов оборудования, исторически сложившаяся в отечественной электроэнергетике, не обладает достаточной гибкостью и универсальности в современных рыночных отношениях в электроэнергетической отрасли. Этими недостающими критериями обладает другая система – система технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию электрооборудования.

На сегодняшний день для оценки ресурса электрооборудования применяются различные диагностические комплексы (тепловизионный контроль, хроматографический анализ газов, вибромониторинг и др.), позволяющие судить о работоспособности и надежности оборудования на данный момент, но не дающие какого-либо математического описания его дальнейшей работы.

Степень влияния каждого климатического фактора на электрооборудование разная, поэтому для упрощения математического описания оценки ресурса принимается, что воздействие температуры на износ объекта является доминантным.

Целью настоящей работы является рассмотрение математической модели с учетом влияния температуры окружающей среды на ресурс электрооборудования.

Оценка ресурса электрооборудования с учетом температурного фактора [1]:

$$R^* = e^{-\frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (1)$$

где  $k_i = \frac{x_i}{x_i^{ном}}$  – коэффициент тяжести режима – отношение текущего и номинального значения  $i$ -го параметра (в данном случае отношение реальной и номинальной температуры);  $d_i$  – относительное отклонение температурного фактора, при котором ресурс электрооборудования меняется в  $e$  раз.

Рассмотрим пример для трансформатора типа ТДЦ-80000/110. Пусть он постоянно работает с номинальной мощностью  $S = 80$  МВА ( $S^* = 1$ ). В данном режиме трансформатор проработал все 25 лет своего нормативного срока службы  $R_0$ . Для трансформатора принимаем  $x = 1$ ;  $y = 1,8$ ;  $d = 5$ ;  $\Delta \vartheta_{м.ном} = 40$  °С (40 К) или  $\Delta \vartheta_{м.ном}^* = 0,408$  о.е. (0,108 о.е);  $\Delta \vartheta_{ННТ.ном} = 38$  °С (38 К) или  $\Delta \vartheta_{ННТ.ном}^* = 0,388$  о.е. (0,102 о.е);  $\Delta \vartheta = 98 - \vartheta_{окр}$  или  $\Delta \vartheta^* = (98 - \vartheta_{окр})/98$  о.е.

Произведем расчет ресурса трансформатора при изменении  $\vartheta_{окр}$  от –25 до 30 °С [1]:

$$R^*(\vartheta_{\text{окр}}^*) = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot \left( e^{\frac{\vartheta_{\text{окр}}^* + \Delta\vartheta_{\text{М,НОМ}}^* \left[ \frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right] + \Delta\vartheta_{\text{ННТ,НОМ}}^* (S^*)^{2j-1}}{\Delta\vartheta^*}} - 1 \right). \quad (2)$$

Таблица 1. Результаты расчета фактического и остаточного ресурса трансформатора

$\vartheta_{\text{окр}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	-25	-15	-5	0	5	15	20	25	30
$R_{\text{факт}}^*, \text{ о.е.}$	0,69	0,73	0,78	0,82	0,85	0,94	1	1,07	1,16
$R_{\text{факт}}^*, \text{ год}$	17,3	18,3	19,6	20,4	21,3	23,5	25	26,8	29
$R_{\text{ост}}^*, \text{ о.е.}$	0,31	0,27	0,22	0,18	0,15	0,06	0	–	–
$R_{\text{ост}}^*, \text{ год}$	7,7	6,7	5,4	4,6	3,7	1,5	0	–	–

Аналогичные результаты наблюдаются при использовании следующего выражения [2]:

$$L = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (3)$$

где  $L$  – срок службы или сохраняемость электрооборудования;  $T$  – температура, К;  $A, B$  – постоянные коэффициенты, зависящие от природы материала и условий применения, определяемые экспериментально для конкретного материала (группы, системы материалов) или изделия;

$$B = \frac{E_3}{R}, \quad (4)$$

где  $E_3$  – эффективная энергия активации процесса, вызывающего отказ, определяемая экспериментально для конкретного материала (группы, системы материалов) или изделия;  $R = 8,314$  [Дж/(моль·К)] – универсальная газовая постоянная.

В выражении (3) не учтено влияние влажности воздуха и воздействия агрессивных сред.

### Выводы

Таким образом, математические модели и расчеты, приведенные в [1], полностью подтверждаются эксплуатационной практикой, представленной в нормативном документе [2]. Теоретическая модель [1] позволяет рассчитать фактический сработанный и остаточный ресурс электрооборудования с учетом влияния температуры окружающей среды. Произведены расчеты для трансформатора в зависимости от данного фактора. Результаты расчета показали, что ресурс работы трансформаторов зависит от температуры окружающей среды, это же подтверждается и на практике. Срок службы трансформатора в районах с повышенной температурой снижается в среднем на 2,5 % при увеличении температуры на 10 °С. На основании выше изложенного можно сделать вывод о возможности реального, постепенного перехода ремонта электрообору-

дования от ППР к ремонтам на основании математических методов, моделей и средств диагностики с учетом температурного фактора.

#### Библиографический список

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.
2. ГОСТ 15150-69. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Введ. 01.01.71 – М.: Госстандарт СССР: ИПК Изд-во стандартов, 1969.

*С.В. Першонков, студ.; рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доцент*

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Режим короткого замыкания (КЗ) в электрических цепях системы собственных нужд (СН) электростанций имеет ряд особенностей, связанных с положением расчетных точек КЗ по отношению к источникам энергии, определяющим величину тока КЗ и процесс его изменения во времени. При КЗ в электрических цепях системы СН расчетные точки являются удаленными по отношению к синхронным генераторам электростанции и источникам энергии прилегающей части электроэнергетической системы, но в то же время расчетные точки приближены к группе электродвигателей (ЭД), используемых в качестве привода рабочих машин (механизмов) СН.

С ростом единичных мощностей блоков электростанций, а значит и увеличением мощности ЭД, используемых в качестве привода рабочих машин, неучет подпитки места КЗ группой ЭД приведет к серьезным ошибкам в расчете токов КЗ, а также термического и электродинамического воздействия токов КЗ на коммутационные аппараты и токоведущие части.

Данное исследование посвящено методам расчета токов подпитки ЭД при КЗ в системе СН и оценке термического воздействия токов КЗ в системе СН на коммутационные аппараты и токоведущие части (прежде всего, кабельные линии) и проведено на примере приводных ЭД механизмов СН наиболее загруженной секции блока ВВЭР-1000. Карта механизмов собственных нужд на секциях РУ 6 кВ блока ВВЭР-1000 представлена в [1].

При определении тока подпитки места КЗ от группы ЭД синхронные и асинхронные электрические машины в соответствии с [2] вводятся



в схему замещения сверхпереходными значениями сопротивления и ЭДС. Последние следует принимать численно равными значениям ЭДС в момент, предшествующий КЗ. Подобный расчет, однако, является весьма трудоемким. Поэтому при практических расчетах часто используют широко распространенное предположение [3], что прямое включение ЭД в сеть равносильно КЗ за сопротивлением ЭД. Такой подход приводит к некоторому завышению результата. Это объясняется тем, что пусковой ток ЭД при прямом пуске определяется номинальным напряжением на шинах СН электростанции, а ток подпитки – значением сверхпереходной ЭДС асинхронного ЭД (АД), которая меньше значения номинального напряжения. Погрешность при расчетах упрощенным методом для рассматриваемой группы ЭД превысила установленные [2] 5 – 10 %. Поэтому в рассматриваемом случае упрощенный метод расчета тока подпитки места КЗ от группы ЭД не применим.

Точки КЗ в системе СН электростанции делят расчетную схему на две независимые ветви. Если периодическая составляющая тока КЗ от удаленных источников не изменяет своего значения с течением времени, то периодическая составляющая тока КЗ от АД будет затухать со временем, поэтому необходимо знать величину действующего значения периодического тока от АД к моменту наступления ударного тока ( $t = 0,01$  с).

В общем случае периодическую составляющую тока КЗ от АД в произвольный момент времени следует определять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием вычислительной техники. Для приближенных расчетов в соответствии с [2] для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени рекомендуется пользоваться специальными типовыми (расчетными) кривыми.

При помощи специальной математической обработки результатов (метод экспоненциальной регрессии), полученных по типовым кривым для различных АД, применяемых в системе СН, можно получить значения постоянных времени затухания периодической составляющей тока подпитки. Погрешность при расчетах упрощенным методом не превысила установленные [2] 5 – 10 %. Поэтому в рассматриваемом случае данный метод расчета ударного тока КЗ от группы ЭД применим.

Суммарный ударный ток от группы ЭД может быть найден также с использованием модели эквивалентного двигателя. Погрешность в этом случае также не превысила установленные [2] 5 – 10 %. Поэтому в рассматриваемом случае данный метод расчета ударного тока КЗ от группы ЭД применим.

Степень термического воздействия тока КЗ на проводники и электрические аппараты определяется значением интеграла Джоуля. Методика расчета интеграла Джоуля зависит от вида расчетной схемы [4]. При

расчете в этом случае используются значения относительного интеграла от периодической составляющей тока в месте КЗ, обусловленного действием группы АД, и относительного интеграла Джоуля, определяемые по типовым кривым в [4]. Значения постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ определяются используемой методикой: модель эквивалентного ЭД или уточненная методика ЛПИ. Как показали расчеты, обе методики в рассматриваемом случае применимы.

Интеграл Джоуля может быть найден по упрощенной методике, изложенной в [3], также при использовании модели эквивалентного ЭД или уточненной методики ЛПИ. Произведенные расчеты, однако, показали невозможность использования в рассматриваемом случае уточненной методики ЛПИ ввиду большой погрешности результатов вычислений.

Таким образом, были получены четыре различных значения интеграла Джоуля, по которым возможно определение минимально допустимого по условиям термической стойкости сечения токоведущих частей. В качестве примера был произведен расчет сечения жилы кабеля с бумажной пропитанной изоляцией и кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Если в первом случае при расчете интеграла Джоуля всеми четырьмя способами было получено одно и то же минимально допустимое по термической стойкости сечение жилы кабеля, то есть применение любого метода не отразилось на результатах проверки кабеля, то во втором при расчете интеграла Джоуля по упрощенному методу с использованием уточненной методики ЛПИ было получено завышенное значение сечения жилы кабеля, то есть применение указанного метода привело к увеличению затрат на систему СН электростанции.

В ходе исследования выяснилось, что применение в каждом конкретном случае упрощенных методов требует проверки, так как не всегда допустимо, а значит целесообразнее во избежание больших погрешностей в расчетах использовать методики, приведенные в [1] и [4].

#### Библиографический список

1. **Обеспечение** невозгораемости и термической стойкости кабелей при воздействии тока короткого замыкания. Ч. 1. Роль кабельных коммуникаций в системах электроснабжения электрических станций: учеб. пособие / А.К. Черновец, К.Н. Семенов, А.А. Лapidус. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 70 с.
2. **ГОСТ Р 52735-2007.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М., 2007.
3. **Рожкова Л.Д.** Электрооборудование электрических станций и подстанций: учеб. для сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 448 с.
4. **ГОСТ Р 52736-2007.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М., 2007.

*Д.С. Мотовилов, студ., рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доцент*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КЗ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД В СООТВЕТСТВИИ С НАЦИОНАЛЬНЫМ И МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМИ**

Расчет токов короткого замыкания в электрических цепях переменного тока напряжением свыше 1 кВ регламентируется национальным стандартом Российской Федерации [1]. Наиболее сложными являются расчеты тока КЗ в цепях системы собственных нужд, так как в этом случае в большинстве расчетных схем необходим учет подпитки места КЗ группой электродвигателей, используемых в качестве привода рабочих машин и подключенных непосредственно в расчетной точке КЗ.

Сложность учета подпитки места КЗ от группы параллельно включенных электродвигателей объясняется особенностями переходного процесса, сопровождающего режим короткого замыкания.

Разнообразие индивидуальных характеристик электродвигателей, входящих в группу ( мощность двигателей от 200 кВт до 8 МВт ), отсутствие в каталогах и паспортных данных сведений о величинах сверхпереходных ЭДС и индуктивных сопротивлений не могут не влиять на процесс определения величин периодического и аperiodического тока КЗ, посылаемого в место КЗ каждым двигателем.

Стандарт Российской Федерации [1], регулирующий методы расчета тока КЗ, в том числе и в системе собственных нужд электростанций, как раз и предполагает учет индивидуальных характеристик электродвигателей.

Наряду с национальными стандартами в России широко используются и международные стандарты, разработанные и рекомендованные к использованию Международной электротехнической комиссией (МЭК). МЭК включает в свой состав ряд национальных комитетов и в качестве своей главной задачи видит всемерную поддержку международной кооперации в вопросах стандартизации в электроэнергетике и электронике.

Международные стандарты разрабатываются комитетами по направлениям деятельности в рамках МЭК и публикуются в качестве международных рекомендаций после одобрения национальными комитетами МЭК.

Достаточно часто в странах – членах МЭК после аутентичного перевода международные стандарты используются в качестве национальных. Таких примеров много и в России.

При разработке собственных (национальных) стандартов по тому или иному направлению, используя различные методики расчетов страны – члены МЭК базируются на той же самой научной базе, проповедуют ту же самую «научную и техническую идеологию».

В этой связи весьма интересно и полезно провести анализ результатов расчетов токов КЗ в системе собственных нужд электростанции, осуществленных по методике национального и международного стандартов. Работа была проделана для секции 6 кВ блока 300 МВт. Использовались национальный стандарт России [1] и стандарт МЭК [2].

Если в части определения начального действующего значения периодического тока подпитки от двигателей исследуемые стандарты весьма близки, то при определении токов к произвольному моменту времени и апериодической составляющей тока подпитки стандарт МЭК базируется на использовании характеристик эквивалентного двигателя.

Анализ результатов расчетов показал их близость, отклонения в результатах по всем расчетным показателям укладываются в допустимые 5 – 10 %.

Сравнительный анализ подтвердил правомерность использования в практических расчетах национальных и международных стандартов и целесообразность введения в расчеты характеристик эквивалентного электродвигателя, заменяющего группу двигателей, подключенных непосредственно к месту КЗ. В последнем случае точность расчетов полностью зависит от адекватности характеристик эквивалентного двигателя.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
2. СЕИ 60909-0. Courants de court-circuit dans les reseaux triphases a courant alternatif – Partie 0: Calcul des courants, 2001.

*И.Ф. Рзаева, студ.; рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доцент*

### НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ СВЯЗИ НА ТЭЦ

Типовые графики выдачи мощности через трансформаторы связи ТЭЦ, соединяющие шины распределительного устройства генераторного напряжения и РУ повышенного напряжения, отличаются высоким значением коэффициента заполнения (слабо выраженной неравномерностью) и несколькими практически равными по величине и продолжительности максимумами.

Выбор мощности трансформаторов связи, работающих по графику нагрузки с обозначенными особенностями, представляет определенный интерес и требует тщательного анализа нагрузочной способности трансформаторов, выбранных по максимальному значению мощности перетока.

Суммарная мощность трансформаторов связи на ТЭЦ определяется требованиями Норм технологического проектирования [1] и предполагает обеспечение экономически эффективного длительного режима работы (при параллельной работе двух трансформаторов связи) и допустимых параметров аварийной перегрузки при работе с одним трансформатором связи.

Нагрузочная способность трансформаторов определяется в соответствии с ГОСТ 14209-85 [2]. Действие указанного стандарта на территории России определено приказом Ростехрегулирования № 73-ст от 28.03.2008 г.

В соответствии с [2] допустимы упрощенные методы определения нагрузочной способности трансформаторов:

- по параметрам двухступенчатого эквивалентного графика нагрузки, который строится по нормам стандарта на основе реального многоступенчатого графика;

- по величине температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора в конце зоны перегрузки двухступенчатого графика.

В то же время ГОСТ 14209-85 вносит ряд ограничений по конфигурации реальных графиков нагрузки, неучет которых может привести к существенным погрешностям при построении двухступенчатого эквивалентного графика. Именно такими особенностями и обладают графики нагрузки, характерные для трансформаторов связи ТЭЦ.

В работе проведены сравнительные расчеты аварийной перегрузки трансформатора связи ТЭЦ с распределительным устройством генераторного напряжения, выявлены погрешности расчетов, возникающие при преобразовании многоступенчатого реального графика нагрузки с двумя одинаковыми по величине и продолжительности зонами перегрузки в двухступенчатый график.

Проведен анализ теплового состояния трансформатора в режиме аварийной перегрузки, определена температура обмотки, суммарный износ витковой изоляции, относительный «срок жизни» за расчетный период. Все расчеты проведены в полном соответствии ГОСТ с использованием реального многоступенчатого графика нагрузки.

Сравнительный анализ результатов позволил определить область применения того или иного метода расчета нагрузочной способности в зависимости от конфигурации исходного реального графика нагрузки.

#### Библиографический список

1. **Нормы** технологического проектирования тепловых электрических станций: ВНТП 81 Минэнерго СССР. – М.: ЦНТИ Информэнерго, 1981.
2. **Трансформаторы** силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209-85. – М.: Госстандарт СССР, 1985.

*А.А. Углов, студ.; рук. А.В. Рассказчиков, к.т.н., доцент*

## ПРИМЕНЕНИЕ И ВЫБОР КАБЕЛЕЙ ИЗ СПЭ

Схемы применения СПЭ кабелей условно делят на следующие группы:

- кабельная вставка 110 – 220кВ м/у ВЛ и КРУЭ длиной 0,5 – 3 км;
- кабель 220 – 500 кВ глубокого ввода мощности в город (ед. км.);
- кабель 220 – 500 кВ длиной 1 – 2 км вывода мощности на ГЭС;
- кабельная вставка длиной 0,3 – 0,5 км при пересечении ВЛ 500 кВ коридора нескольких цепей ВЛ 110 – 220 кВ;
- городская РКС ВН 110 – 220 кВ длиной 5 – 15 км, осуществляющая связь между генерирующими источниками и КРУЭ.

Основное назначение экрана: обеспечение равномерности эл. поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля.

Факторы, влияющие на величину сечения экранов:

- снижение потерь мощности в нормальном режиме работы;
- обеспечение термической стойкости экрана в аварийном режиме.

Заземление экранов в обоих концах кабеля приводит к наведению в экранах продольных токов промышленной частоты, которые, создавая потери мощности, снижают пропускную способность кабеля.

Оценим потери в экранах при заземлении кабеля с обеих сторон:

Активные сопротивления жилы и экрана

$$R_{Ж} = L_{К} \cdot \rho_{Ж} / F_{Ж}, \quad R_{Э} = L_{К} \cdot \rho_{Э} / F_{Э},$$

где  $L_{К}$  – длина кабеля;  $\rho_{Ж}$  и  $\rho_{Э}$  – удельное сопротивление материала жилы и экрана;  $F_{Ж}$  и  $F_{Э}$  – сечения жилы и экрана. Соотношение потерь в экране и потерь в жиле для случая заземления экрана по концам кабеля не зависимо от длины кабеля:

$$\frac{P_{Э}}{P_{Ж}} = \frac{R_{Э} / R_{Ж}}{\left[ 1 + \left( \frac{R_{Э}}{X} \right) \right]}, \quad (1)$$

где  $X = \omega L_{К} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2s}{d_{Э}} \right)$  – взаимное индуктивное сопротивление между жилой и экраном (Ом);  $d_{Э}$  – средний диаметр кабеля (м);  $s$  – среднее расстояние между соседними осями кабеля (м).

Из формулы (1) следует, что эффективного снижения паразитных потерь можно добиться, прокладывая фазы кабеля сомкнутым треугольником, так как в этом случае достигается минимальное  $s/d_{\text{э}}$ , а значит и  $X$ .

Приемлемое соотношение  $\frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{ж}}} \leq 0,1 \div 0,2$  характерно лишь для тонких

кабелей (сечение жилы до  $400 \text{ мм}^2$ , экрана – до  $50 \text{ мм}^2$ ), проложенных сомкнутым треугольником. В остальных случаях следует применять способы борьбы с токами в экранах:

- разземление экранов на одном из концов кабеля (рис. 1, а);
- транспозицию экранов (рис. 1, б).

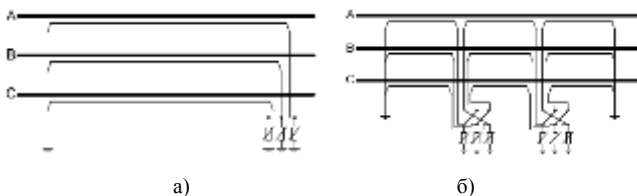


Рис. 1. Способы заземления экранов однофазных кабелей

Выбор сечения экрана в соответствии с таблицей приводит к тому, что в сетях 6 – 35 кВ преимущественно используются кабели с  $F_{\text{э}} \geq 70 \text{ мм}^2$ , а в сетях 110 – 500 кВ – сечение  $F_{\text{э}} \geq 185 \text{ мм}^2$ . Столь большие сечения экранов, согласно (1), делают нежелательной, а в сетях 110 – 500 кВ вовсе недопустимой схему заземления экранов с двух сторон кабеля.

Таблица 1. Основные расчетные случаи для выбора сечения экрана

Кабель	Расчетный случай
6 – 35 кВ	Двойное К(1,1) (одно из двух повреждений изоляции находится в рассматриваемом кабеле)
110 – 500 кВ	К(1) (повреждение находится в рассматриваемом кабеле)

## Выводы

1. Сечение экранов в сетях 110 – 500 кВ следует выбирать в расчете на весь ток однофазного короткого замыкания К(1).

2. Сечение экранов в сетях 6 – 35 кВ следует выбирать в расчете на ток двойного короткого замыкания К(1,1).

3. Соотношение  $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}}$  паразитных потерь мощности в экранах и неизбежных потерь мощности в жилах кабеля:

- никак не зависит от длины кабеля;
- снижается при прокладке фаз сомкнутым треугольником;

- увеличивается с ростом сечения жилы;
- увеличивается с ростом сечения экрана.

4. В сетях 110 – 500 кВ сечения экранов, выбранные исходя из токов однофазного короткого замыкания, и сечения жил, выбранные исходя из величины нагрузки, таковы, что по соображениям нормального режима без «транспозиции экранов» или их «одностороннего заземления» эксплуатация кабеля недопустима.

5. Даже при прокладке сомкнутым треугольником паразитные потери в кабелях с сечением жилы  $F_{ж} \geq 400 \text{ мм}^2$  или сечением экрана  $F_{э} > 50 \text{ мм}^2$  уже ощутимо снижают пропускную способность. В таких случаях требуется применение «транспозиции экранов» или «одностороннего заземления экранов».

6. В сетях 6 – 35 кВ сечения жил меньше, чем в сетях 110 – 500 кВ. Поэтому иногда достаточно снизить сечение экрана, что оказывается возможным при выполнении рекомендаций:

- ограничить токи короткого замыкания  $K(1,1)$ ;
- исключить  $K(1,1)$  как расчетный случай выбора сечения экрана, т.е. использовать низкоомное заземление нейтрали, строить новые надежные сети.

### Заключение

Если для кабелей с «большим» сечением жилы (условно  $F_{ж} \geq 240 \text{ мм}^2$ ) специальные мероприятия необходимы для снижения токов и потерь в экранах в нормальном режиме работы, то для кабелей с «малым» сечением жилы специальные мероприятия могут потребоваться в том числе для повышения термической стойкости экранов и снижения риска повреждения экрана кабеля на протяженном по длине участке.

Проблема	Кабели с «малым» сечением жилы	Кабели с «большим» сечением жилы
Проблема токов в экранах в нормальном режиме	В определенной мере решается за счет расположения фаз сомкнутым треугольником	Решается за счет секционирования экранов, применения транспозиции
Проблема термической стойкости при повреждениях изоляции кабеля	Решается выбором сечения экрана или отчасти облегчается применением «скрутки» экранов	Решается выбором сечения экрана

### Библиографический список

1. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6 – 500 кВ. – СПб.: Изд-во «ЗЭУ», 2008. – 104 с.
2. **МЭК 60287-1-1.** Кабели электрические. Расчет номинального тока. Ч. 1-1. Уравнения номинальных токовых нагрузок (при 100 %-ном коэффициенте нагрузок) и расчет потерь. Общие положения.



3. **Дмитриев М.В.**, Евдокин Г.А. Однофазные силовые кабели 6 – 500 кВ // Новости Электротехники. – 2007. – № 29440.

4. **Тодирка С.Н.**, Попов Л.В., Пельцер В.Б. Расчет термической стойкости экранов одножильных кабелей 10 кВ с полиэтиленовой изоляцией // Энергетик. – 2002. – № 4. – С. 30 – 31.

*Н.В. Глотова, студ.; рук. А.Н. Назарычев, д.т.н., проф.*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время износ основных фондов ФСК в среднем составляет 48,5 %, при этом оборудования ПС – 70 %, зданий и сооружений – 37,8 %, воздушных линий электропередач (ВЛЭП) – 40 %.

Наибольший износ имеет оборудование подстанций. Отработали свой нормативный срок 19,7 % автотрансформаторов, 10 % шунтирующих реакторов, 20 % синхронных компенсаторов, 27 % выключателей напряжением 330 – 750 кВ, свыше 50 % устройств релейной защиты и автоматики.

К 2011 году исчерпают ресурс около 30 % трансформаторов, 16 % шунтирующих реакторов, около 40 % выключателей. В магистральных сетях 220 кВ и выше АО-энерго износ оборудования еще выше, так износ трансформаторов составляет 49 %, а выключателей 110 кВ и выше – более 30 % [2].

Мониторинг электротехнического оборудования электростанций, зависит от его технического состояния. Современное электротехническое оборудование имеет достаточно высокие расчетные показатели надежности. В процессе эксплуатации под воздействием различных факторов, условий и режимов работы исходное состояние оборудования непрерывно ухудшается, снижается эксплуатационная надежность и увеличивается опасность возникновения отказов. Немаловажным фактором является определение необходимой информации, которая будет более полно характеризовать работоспособность электрооборудования, такой величиной является фактически сработанный ресурс.

В [1] предложена математическая модель для вычисления фактически сработанного ресурса процедуры составления плана-графика работ по техническому обслуживанию которая имеет вид:

$$R_j \geq [R_j], j = 1, \dots, k, \quad (1)$$

$$R_i \geq R_{i+1}, i = 1, \dots, k, \quad (2)$$

$$L_0 \leq [L_0], \quad (3)$$

где  $R_{ij}$  – относительный фактический сработанный ресурс  $i$ -го электрооборудования  $j$ -й группы, определяемый с помощью специализированных устройств контроля и диагностики, или рассчитанный аналитически по специальным алгоритмам;  $[R_j]$  – нормативная относительная сработка ресурса электрооборудования  $j$ -й группы между двумя осмотрами, в случае эксплуатации его при нормативных (расчетных) условиях;  $L_0$  – количество персонала, необходимого для проведения осмотров электрооборудования, которое вошло в составляемый план-график;  $[L_0]$  – значение величины располагаемой численности персонала, выделяемого для проведения осмотров на энергообъекте;  $i = 1, \dots, k$  – порядковый номер электрооборудования в  $j$ -й группе.

Основные положения, которые были приняты при разработке метода составления плана-графика осмотров (МСПГ-0) электрооборудования энергообъектов на основе определения его технического состояния с помощью средств технической диагностики (1) – (3).

Первое основное положение 1 МСПГ-0 заключается в том, что электрооборудованию назначаются осмотры (работы ТО) только в том случае, когда фактический сработанный им ресурс при существующих условиях работы не меньше нормативной сработки ресурса между двумя осмотрами при нормативных условиях.

Второе основное положение 2 МСПГ-0 заключается в том, что при составлении приоритетного списка электрооборудования, требующего проведения осмотров, используется критерий последовательной минимизации максимальных значений интегрального показателя технического состояния электрооборудования – сработанного ресурса.

Третье основное положение 3 МСПГ-0 заключается в том, что при составлении приоритетного списка электрооборудования, принимаемого в качестве плана-графика осмотров, необходимо учитывать ограничения по трудовым ресурсам, которыми располагает энергообъект для выполнения работ этого вида.

Исходя из [1] математическую модель МСПГ-О 1-3 для фактически сработанного ресурса можно записать:

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left( \int_0^{R_j^*} \exp \left( \sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_T j}^* - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_{\mathcal{E}}=1}^{N_{\mathcal{E}}} \frac{(X_{i_{\mathcal{E}} j}^* - 1)}{\Delta X_{i_{\mathcal{E}}}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_M j}^* - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_X j}^* - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} \right) dr^* - R_j^* \right), \quad (4)$$

где  $R_0^*$  – нормативный ресурс,  $R_0^* = 1$  о.е.;  $i_T = 1 \dots N_T$ ,  $i_{\mathcal{E}} = 1 \dots N_{\mathcal{E}}$ ,  $i_M = 1 \dots N_M$ ,  $i_X = 1 \dots N_X$  – количество тепловых, электрических, механиче-

ских и химических эксплуатационных факторов;  $X_{i_T}^*$ ,  $X_{i_{\mathcal{O}}}^*$ ,  $X_{i_M}^*$ ,  $X_{i_X}^*$  – величины  $i_T$ -го,  $i_{\mathcal{O}}$ -го,  $i_M$ -го,  $i_X$ -го эксплуатационных факторов, о.е.;  $\Delta X_{i_T}^*$ ,  $\Delta X_{i_{\mathcal{O}}}^*$ ,  $\Delta X_{i_M}^*$ ,  $\Delta X_{i_X}^*$  – относительное (отнесенное к нормативному значению соответствующего эксплуатационного фактора) отклонение  $i_T$ -го,  $i_{\mathcal{O}}$ -го,  $i_M$ -го,  $i_X$ -го теплового, электрического, механического, химического факторов, о.е.;  $R_j^*$  – фактический сработанный ресурс на  $j$ -м интервале наработки в нормативных условиях эксплуатации, о.е.;  $j = 1 \dots K$  – количество интервалов наработки объемом  $R_j^*$ .

Оценка сработанного ресурса при мониторинге электрооборудования обеспечивается снижением затрат на обслуживание (минимизируется количество сотрудников сервисной службы, уменьшаются затраты по выезду на ремонтные работы); анализ качества работы технологического оборудования; прогнозирование и предупреждение аварийных ситуаций. Мониторинг также позволяет оценивать качественные характеристики оборудования непосредственно в процессе его эксплуатации; прогнозировать и предупреждать аварийные ситуации; анализировать причины сбоев в инженерных системах и планировать реконструкцию систем, регламентные и ремонтные работы; уменьшать время простоя оборудования, централизовать сервисную службу, сократить численность обслуживающего персонала.

#### Библиографический список

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 224 с.
2. Назарычев А.Н., Глотова Н.В., Новоселов Е.М. Современные проблемы эксплуатации и ремонта в электроэнергетике // Комплексные решения компании CSoft для задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения и автоматики: мат-лы конф. 9 – 10 декабря 2009 года. – Иваново, 2009. – С. 11 – 14.

*С.Б. Гришин, асп.; В.А. Савельев, д.т.н., проф.*

### АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЯ ЧАСТОТНО-ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ

Частота переменного электрического тока является одним из главных показателей качества электрической энергии, вырабатываемой генераторами электростанций и поставляемой потребителям.

Небольшое снижение частоты (на несколько десятых герца) не представляет опасности для нормальной работы энергосистемы, хотя и

влечет за собой ухудшение экономических показателей. Снижение же частоты более чем на 1 – 2 Гц представляет серьезную опасность и может привести к полному расстройству работы энергосистемы.

При аварийном снижении частоты в энергосистеме автоматическая частотная разгрузка отключает часть фидеров заведенных под уставки ее срабатывания. Если же дефицит активной мощности большой и отключение нагрузки не нормализует ситуацию, то в действие вступает частотно-делительная автоматика (ЧДА). ЧДА отделяет электростанцию от системы для сохранения собственных нужд.

Для реализации действия автоматики необходимо настроить устройство срабатывания, так чтобы оно избирательно отключало нужные присоединения в зависимости от предшествующего режима. Для этого необходимо составление алгоритма работы программно аппаратного комплекса автоматики.

В докладе рассмотрено составление алгоритма работы автоматики на примере реальной ТЭЦ с нагрузкой подключенной к шинам 35 и 6 кВ.

Частотно-делительная автоматика работает по сценарию, показанному в таблице.

**Рекомендуемые варианты выделения оборудования при нормальной схеме 35 и 110кВ ТЭЦ и сетей прилегающего района**

№ п/п	Условия	Действие ЧДА
1	Суммарный переток активной мощности по ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3, ВЛ-4 и МВ-35 кВ Т-4 нулевой или отрицательный (от шин)	МВ ВЛ 1, 2, 3, 4, МВ-35 кВ Т-4
2	Суммарный переток активной мощности по ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3, ВЛ-4 и МВ-35 кВ Т-4 положительный (к шинам), но не более нагрузки ТГ-4	МВ ВЛ 1, 2, 3, 4, 5, СВ-110 кВ
3	Суммарный переток активной мощности по ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3, ВЛ-4 и МВ-35 кВ Т-4 положительный (к шинам) и более нагрузки ТГ-4 и:	
3.1	в работе ТГ-1 и (или) ТГ-2, направление активной мощности по Т-1 и Т-2 к шинам 35 кВ	МВ-6 кВ Т-1 и Т-2
3.2	в работе ТГ-1 и (или) ТГ-2, направление активной мощности по Т-1 и Т-2 к шинам ГРУ-6 кВ	МВ ВЛ 1, 2, 3, 4, 5, 6
3.3	ТГ-1 и ТГ-2 не в работе	

В соответствии с данной таблицей составим алгоритм работа автоматики.

Данный алгоритм составляется на принципе минимизации небаланса активной мощности в выделяемом районе.

В соответствии с данным алгоритмом настраивается программно аппаратный комплекс автоматики и в зависимости от режима работы района энергосистемы автоматика будет делить станцию в различных се-

чениях. При возможности расширения зоны действия ЧДА, данный алгоритм может быть существенно расширен, тем самым более точно можно подобрать сечение для минимизации небаланса активной мощности в выделяемом районе.

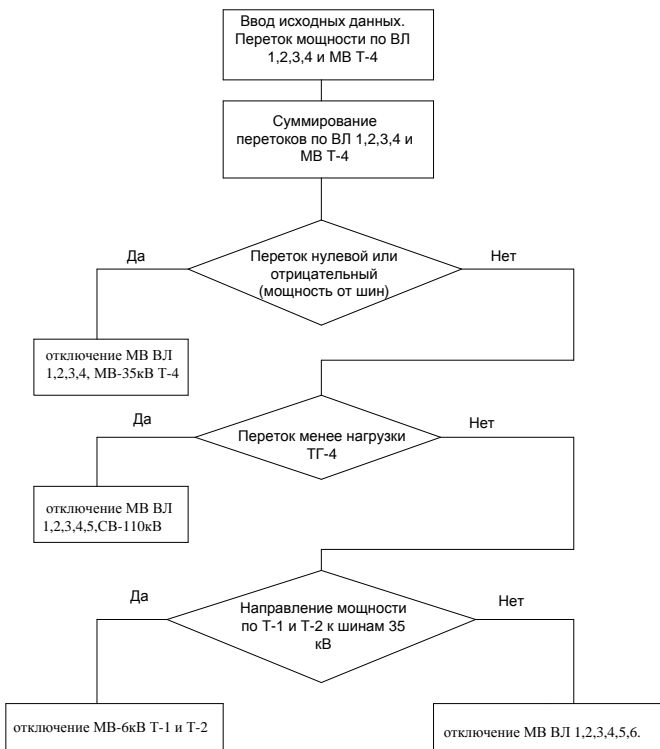


Рис. 1. Алгоритм действия частотно-делительной автоматики

## СЕКЦИЯ 15

### ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Председатель – к.т.н., доцент **Воробьев В.Ф.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Вихарев А.В.**

*Д.А. Миндовский, студ.; рук. Г.А. Филиппов, к.т.н., доцент*

#### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Одним из основных параметров, используемых для контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования в эксплуатационных условиях, являются тангенс угла диэлектрических потерь и емкость. Наибольшие ошибки в определении  $\operatorname{tg}\delta$  и  $C_x$  по результатам измерений возникают в условиях влияния внешних электрических полей.

В эксплуатационных условиях между объектом испытания и элементами распределительного устройства, которые во время испытания остаются под рабочим напряжением, существует емкостная связь. Если объект испытания заземляется через измерительную схему, то проходящий по этим емкостным связям ток попадает в измерительную схему, вызывая погрешность в измерении. Предполагается что вся измерительная схема, за исключением объекта испытания, заэкранирована. Тогда будем называть сумму всех токов, попадающих в измерительную схему извне через объект испытаний при ЭДС испытательной схемы, равной нулю, током влияния электрического поля и обозначим этот ток символом  $I_{вп}$ .

Ток влияния является суммой всех токов, проходящих по частичной емкости между влияющими элементами и той частью объекта испытания, которая связана с измерительной схемой. Наибольшую составляющую тока влияния при одинаковых напряжениях будут вызывать те элементы, которые образуют с объектом испытания наибольшую частичную емкость. В реальных условиях ток влияния формируется в большинстве случаев одним наиболее близким влияющим элементом (какой-либо шиной, соседним аппаратом и т.п.), однако в общем случае приходится учитывать все влияющие элементы, которые посылают в объект испытания токи различной величины и фазы.



где  $C_x$  и  $C_N$  – емкости соответственно испытуемой изоляции и эталонного конденсатора.

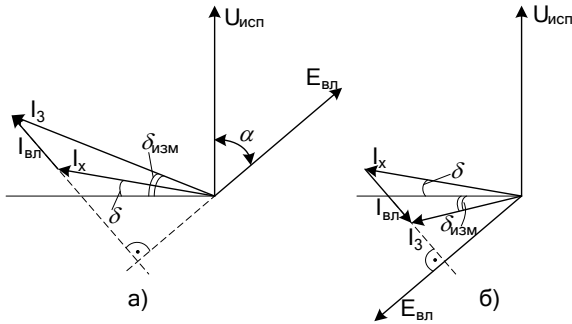


Рис. 2. Векторные диаграммы токов в плече моста  $R_3$  при наличии тока влияния  $I_{вл}$ : а –  $\text{tg} \delta_{изм} > 0$ ; б –  $\text{tg} \delta_{изм} < 0$

Чтобы уменьшить ошибку, обусловленную внешним влиянием, производят два измерения с измерением фазы испытательного напряжения на  $180^\circ$ . Величину  $\text{tg} \delta$  испытуемой изоляции определяют как среднее или средневзвешенное двух измерений, т.е. по формулам

$$\text{tg} \delta = \frac{\text{tg} \delta_{изм1} + \text{tg} \delta_{изм2}}{2}$$

или

$$\text{tg} \delta = \frac{\text{tg} \delta_{изм1} R_3'' + \text{tg} \delta_{изм2} R_3'}{R_3' + R_3''},$$

где  $R_3'$  и  $R_3''$  – значения сопротивления  $R_3$  соответственно при первом и втором измерениях.

Ошибки при таких измерениях имеют разные знаки и при усреднении результатов отчасти компенсируются. Если при одном из измерений получена отрицательная величина  $\text{tg} \delta$ , то перед усреднением этот результат следует пересчитать по формуле

$$\text{tg} \delta_{изм} = \frac{R_3}{R_4} \text{tg} \delta'_{изм}.$$

Полное устранение ошибки от внешнего влияния достигается при таком подборе фазы испытательного напряжения (с помощью фазорегулятора), когда  $\alpha = \delta$  или  $\alpha = \delta + \pi$ .



### Библиографический список

1. **Методические** рекомендации по диагностике силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов в эксплуатации на рабочем напряжении № РД ЭО-0189-00 – М.: Концерн Росэнергоатом, 1997.
2. **Локшин М.В.**, Сви П.М. Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции. – М.: Энергия, 1973.
3. **Локшин М.В.** Влияние постороннего электрического поля на погрешности при определении диэлектрических характеристик высоковольтной изоляции // Электричество. – 1976. – № 1. – С. 36 – 43.

*А.А. Улановская, студ.; рук. О.А. Баженов, к.т.н., доцент*

## ИСПЫТАНИЕ КАБЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕДВИЖНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии. Кабели с вязкой пропиткой на напряжения до 10 кВ включительно чаще всего выполняются трехжильными с поясной изоляцией и секторными жилами. При напряжениях 20 и 35 кВ применяются кабели с отдельно освинцованными или экранированными жилами. Для оконцевания кабелей, а также для соединения строительных длин кабелей применяются соответственно концевые, соединительные и стопорные муфты. Кабели, кабельные линии подвергаются механическим или коррозионным повреждениям защитных оболочек, что приводит к нарушению герметичности и попаданию влаги в изоляцию, осушению изоляции вследствие местных перегревов кабеля; старение изоляции. Для поиска мест повреждения в силовых кабелях, определения глубины залегания кабеля используют передвижные лаборатории высоковольтных испытаний.

В России выпуском передвижных высоковольтных лабораторий занимаются холдинговая компания «ЭМЗ» ОО «Ярославский электромеханический завод».

Все лаборатории подразделяются по комплектации в зависимости от назначения.

**Мобильная диагностическая лаборатория МЕГА-1.** Мобильная лаборатория предназначена для выезда специалистов к месту установки силовых трансформаторов и выполнения регламентных работ по их диагностике, а так же для испытаний повышенным напряжением оборудования распределительных устройств.

Основные функции:

- 1) измерение сопротивлений изоляции обмоток и вводов;

2) измерение диэлектрических характеристик изоляции обмоток и вводов;

4) измерение потерь холостого хода;

5) измерение сопротивлений короткого замыкания;

6) измерение коэффициента трансформации;

7) испытание изоляции обмоток трансформатора повышенным напряжением 50 Гц.

### **Мобильная диагностическая лаборатория МЕГА-2 и МЕГА-3.**

Эти лаборатории предназначены для высоковольтных испытаний силовых кабельных линий, оборудования распределительных устройств, а также определения места повреждения силовых кабелей напряжением до 10 кВ. Но в отличие от МЕГА-2, МЕГА-3 испытывает кабели напряжением до 35 кВ и проводит испытания электрооборудования подстанций, силовых кабельных линий напряжением 10 кВ.

Общие функции МЕГА-2 и МЕГА-3:

1) испытание изоляции силовых кабелей повышенным напряжением постоянного тока с контролем утечки;

2) испытание оборудования распределительных устройств повышенным напряжением 50 Гц;

3) измерение сопротивления изоляции кабеля и оборудования распределительных устройств;

4) предварительное определение места повреждения импульсным и акустическим методом;

5) прожиг изоляции кабеля;

6) определение трассы и глубины кабельной линии;

7) определение искомого кабеля в пучке кабелей.

Кроме общих функций МЕГА-3 проводит и другие измерения:

1) измерение временных характеристик выключателей при различных уровнях напряжения электромагнитных включения и отключения;

2) оценка наличия вакуума в камерах вакуумных выключателей;

3) измерение переходного сопротивления контактов выключателя;

5) вибромониторинг процессов включения и отключения;

6) диагностика состояния аккумуляторных батарей методом контрольного разряда с заданным параметром нагрузки.

Оборудование и приборы расположенные в лаборатории ЛВИ-3М. 1 – прожигающая установка УП – 7М; 2 – БВИ – 100М; 3 – блок вводной; 4 – блок для измерения тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции; 5 – управление генератором импульса; 6 – пульт сетевой; 7 – источник испытательного напряжения; 8 – регулятор напряжения; 9 – главный переключатель; 10 – блок переключателей; 11 – делитель высокого напряжения; 12 – синхронный генератор; 13 – барабан вы-

соковольтного провода (испытание повышенным переменным напряжением); 14 – барабан с кабелем для низковольтных измерений; 15 – барабан с кабелем питания; 16 – кабель заземления; 17 – барабан с кабелем высоковольтным (испытание повышенным выпрямленным напряжением).

Определить место повреждения в кабельной линии с помощью лаборатории можно акустическим методом.

Сущность акустического метода заключается в прослушивании над местом повреждения звуковых колебаний, вызванных искровым разрядом в канале повреждения, искровой электрической разряд сопровождается звуковым эффектом. Звуковые колебания, возникшие в месте искрового перекрытия, распространяются в окружающую среду и могут быть прослушаны на поверхности земли. Звуки искровых разрядов достигают максимальной громкости над местом повреждения.

Для определения места повреждения акустическим методом в лаборатории установлен генератор ГВИ. В качестве приемника акустических волн можно использовать приемник ПП-05 из индукционного поискового комплекта.

#### Библиографический список

1. **Руководство** по эксплуатации лаборатории высоковольтных испытаний ЛВИ. – Л.: Редакционно-издательский отдел холдинговой компании «ЭМЗ», 2001.

*О.С. Мельникова, асп., А.В. Костерин, студ.;  
рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., проф.*

### **АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 35 – 110 кВ**

Трансформатор является сложной технической системой, в которую входит множество связанных между собой подсистем, таких как главная изоляция, система охлаждения, газовая защита, переключающие устройства, система удаления влаги и т.д. В процессе эксплуатации в этих подсистемах развиваются различные дефекты, в результате чего нарушается нормальная работа трансформатора. Рассмотрим повреждения в силовых трансформаторах на примере данных Ростовских электрических сетей.

По этой сводке за 2009 год наиболее часто встречающиеся неполадки были в системе РПН. Данные неполадки были замечены у половины трансформаторов, работающих с отступлением от нормативно технических документов. Слабым звеном РПН оказалось пусковое устройство, в результате чего на трансформаторах Т-2, 110 кВ ПС Нила и Т-2, 35 кВ

ПС Прибрежная, расхождение сопротивления обмоток ВН постоянному току составляет соответственно 3 и 22 % при допустимой норме в 2 %. А на ПС Васильково Т-1, 110 кВ при измерении сопротивления происходит обрыв при переключении с четного на нечетное положение. Эти отклонения могут быть вызваны от неправильной работы контактов (недостаточное или чрезмерное нажатие, перекосы и др.), вследствие образования на контактах пленки окисла при редких переключениях и несвоевременно выполненных прокрутках устройства, при нарушениях в кинематической схеме.

Нередки отказы вследствие нарушений в работе приводов. Вследствие чего, на ПС Алешино, на обоих трансформаторах 35 кВ положение РПН не переключается от местного управления, а на Т-1 35 кВ ПС Семibrатово, не работает блокировка 1 положения РПН и не включается 9 положение. Из всех этих дефектов в системе РПН можно сделать вывод, что данная система наиболее подвержена повреждаемости вследствие переключения пар обмоток под нагрузкой, в результате чего в системе происходит кратковременное горение дуги. Во время горения искры в баке РПН появляются продукты разложения масла, они оказывают воздействия на дугогасящие свойства масла. Если масло потеряет эти свойства, процесс гашения дуги затягивается и соседние отпайки регулировочной обмотки трансформатора могут оказаться замкнутыми не через дугогасящий резистор, а через электрическую дугу, что приводит к тяжелым авариям с деформацией обмоток трансформатора. Поэтому периодичность отбора анализа проб масла из РПН на СХА чаще, чем из бака трансформатора.

Существенное влияние на работу трансформатора оказывает система удаления влаги. Это хорошо прослеживается на Т-2 ПС Воржа, где термосифонный фильтр был смонтирован с нарушениями, что повлекло к нарушению циркуляции масла через него. В результате масло трансформатора стало менее интенсивно осушаться, и влага из масла стала накапливаться в твердой изоляции обмоток. Вследствие этого общие характеристики изоляции стали ухудшаться.

Снижение пробивного напряжения на Т-1 110 кВ ПС Шурскол происходит вследствие увлажнения трансформаторного масла (рис. 1) и увеличивается при полной замене масла. Влагосодержание как показатель состояния масла контролируется в процессе эксплуатации. Увеличение влагосодержания масла возможно при попадании атмосферной влаги в масло из-за неисправности или отсутствия осушителей у трансформаторов со свободным дыханием, а также из-за засасывания влажного воздуха или дождевой воды в масло у трансформаторов с принудительной системой охлаждения при ее негерметичности. Увеличение влагосодержания

трансформаторного масла у Т-1 110 кВ ПС Шурскол привело к снижению электрической прочности масла и изоляции трансформатора в целом.

Таблица 1

Дата отбора	Влагосодержание	$U_{пр}$ , кВ	Примечание
27.03.00	нет	70	Замена масла
22.04.04	есть	25,8	контроль
25.05.04	есть	20	контроль
28.05.04	есть	23	контроль
22.06.04	есть	35,6	контроль
24.06.04	нет	68	Замена масла

Значения тангенса диэлектрических потерь твердой изоляции на обмотках ВН и НН (рис. 2) увеличиваются на протяжении 2 лет со значения 2,7 и 2,4 соответственно до 4,13 и 3,57 процента. С увеличением тангенса увеличиваются нагрев твердой изоляции, что мы и видим из данных АРГ, которые приведены ниже.

Таблица 2

Газ	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO	CO2
Количество	Отс.	0,0012	Отс.	0,0027	0,00012	0,0355	0,408

По этим данным видно присутствие окиси углерода и двуокиси углерода, свидетельствующие о пиролизе (нагреве) целлюлозной изоляции и ее постепенном разрушении, а также газ этан который в свою очередь указывает на локальный нагрев масляной изоляции. Отборы проб масла показывают о снижении пробивного напряжения до 40,3 кВ. Все эти показатели указывают на то, что если в ближайшее будущее не будут приняты меры по выводу в ремонт трансформатора, есть риск возникновения аварийной ситуации. На данный момент на ПС Воржа планируется реконструкция, со сменой трансформаторов.

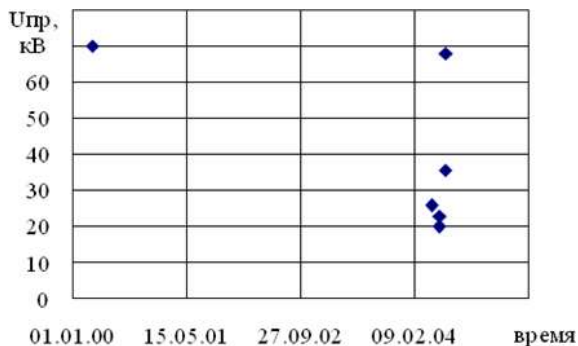


Рис. 1. Значение пробивного напряжения с увеличением влагосодержания в течение времени

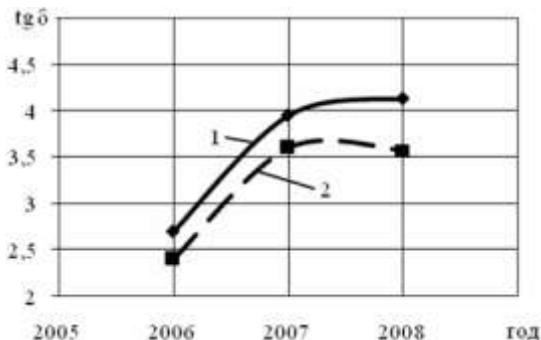


Рис. 2. Значение тангенса диэлектрических потерь в течение времени: 1 – зависимость для изоляции обмоток ВН; 2 – зависимость для изоляции обмоток НН

Приведенный краткий обзор основных видов повреждений в электрических сетях показывает, что в большинстве случаев они развиваются постепенно. Следовательно, если правильно поставить работу по проверке состояния трансформаторов, возникающие дефекты можно выявить до того момента, когда будет превышена какая-то критическая точка. Тогда можно будет своевременно вывести трансформатор в ремонт, предотвратить возникновение аварии или отказа, не допустить недоотпуск электроэнергии, снизить время и расходы на ремонт.

*С.Е. Максимов, магистр; рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доцент,  
С.Г. Сидоров, к.т.н., доцент*

### ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Нейронные сети – это одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, основанное на попытках воспроизвести нервную систему человека. А именно: способность нервной системы обучаться и исправлять ошибки, что должно позволить смоделировать, хотя и достаточно грубо, работу человеческого мозга.

Нейронная сеть или нервная система человека – это сложная сеть структур человека, обеспечивающая взаимосвязанное поведение всех систем организма.

Биологический нейрон – это специальная клетка, которая структурно состоит из ядра, тела клетки и отростков. От тела клетки ответвляется

множество коротких волокон, называемых дендритами. Длинные дендриты называются аксонами.

Биологическая нейронная сеть обладает высокой степенью связности: на один нейрон может приходиться несколько тысяч связей с другими нейронами. Но, это приблизительное значение и в каждом конкретном случае оно разное. Передача импульсов от одного нейрона к другому порождает определенное возбуждение всей нейронной сети. Величина этого возбуждения определяет реакцию нейронной сети на какие-то входные сигналы.

В 60 – 80 годах XX века приоритетным направлением исследований в области искусственного интеллекта были экспертные системы. Экспертные системы хорошо себя зарекомендовали, но только в узкоспециализированных областях. Для создания более универсальных интеллектуальных систем требовался другой подход. Наверное, это привело к тому, что исследователи искусственного интеллекта обратили внимание на биологические нейронные сети, которые лежат в основе человеческого мозга.

В искусственном интеллекте нейронная сеть – это упрощенная модель биологической нейронной сети. У нейронных сетей много важных свойств, но ключевое из них – это способность к обучению. Обучение нейронной сети в первую очередь заключается в изменении «силы» синаптических связей между нейронами. На сегодняшний день нейронные сети являются одним из приоритетных направлений исследований в области искусственного интеллекта.

Нейронные сети находят применение и в промышленности. К примеру, для контроля качества и прогнозирования срока службы электрической изоляции, а также для диагностики электрооборудования. В каждой отрасли ее применение специфично.

В данной работе была поставлена задача спрогнозировать электрические характеристики маслосодержащей изоляции трансформаторов через произвольное время  $\tau$ , с учетом изменения ее влажности, тангенса угла диэлектрических потерь, степени полимеризации и пробивного напряжения с помощью однослойной и двухслойной нейронных сетей, а также выявление более точного прогноза.

Для этой цели были использованы результаты научно-исследовательской работы «Исследование закономерностей старения маслосодержащей изоляции трансформаторов и разработка рекомендаций для оценки степени старения изоляции трансформаторов применительно к условиям эксплуатации», проведенной на кафедре ВЭТФ ИГЭУ.

В вышеописанной работе применялась масло по ГОСТ 982-68 ( $W = 2$  г/т, кислотное число 0,007 мг КОН) и кабельная бумага К-120. Образцы бумаги и масла помещались в герметичные сосуды. Сосуды выдерживались при постоянном температурном режиме,  $t = 110$  °С. Через определен-

ный промежуток времени проводился отбор проб кабельной бумаги и масла для оценки их электрических характеристик, для определения кислотного числа и влажности масла, а также степени полимеризации бумаги.

Тангенс угла диэлектрических потерь масла и бумаги определялся при помощи моста переменного тока Р 525. Пробивное напряжение масла определялось с помощью аппарата АИМ-80 при электродах грибовидной формы и расстоянии между ними 2,5 мм.

Пробивное напряжение бумаги определялось по схеме, приведенной на рис. 1 (цилиндрические электроды диаметром 25 мм). Удельное объемное и поверхностное сопротивление бумаги определялось на установке постоянного тока при напряжении 2 кВ (рис. 2). Удельное объемное сопротивление масла определялось с помощью тераомметра Е6-3, в качестве измерительных электродов использовались электроды типа СИМ-2 конструкции ОРГЭС.

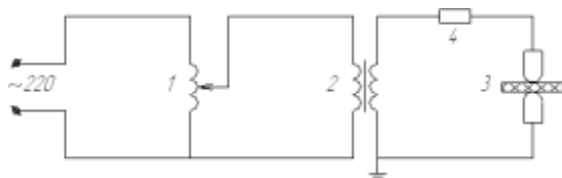


Рис. 1. Схема установки измерения пробивного напряжения твердых образцов бумажно-масляной изоляции: 1 – регулятор напряжения; 2 – испытательный трансформатор; 3 – испытуемый образец; 4 – защитное сопротивление

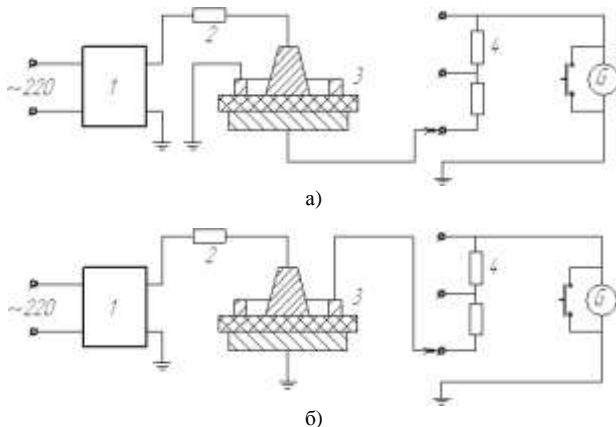


Рис. 2. Схема установки для измерения удельного объемного (а) и удельного поверхностного (б) сопротивлений электрокартона и кабельной бумаги: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – защитное сопротивление; 3 – испытуемый образец; 4 – шунтирующее сопротивление



В ходе этих исследований был получен большой объем экспериментальных данных, которые и были использованы для обучения программируемой нейронной сети.

В рамках исследовательской работы предстоит спрограммировать два варианта нейронной сети. Первый вариант включает в себя однослойную нейронную сеть, без группировки исходных данных по физическому смыслу. Схема данной нейронной сети представлена ниже, рис. 3.

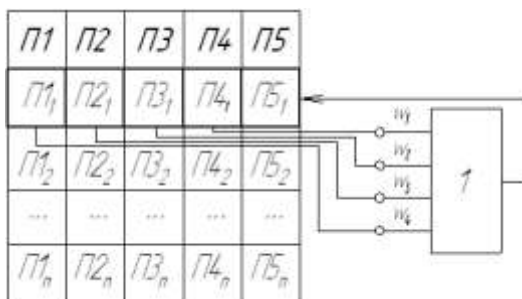


Рис. 3. Схема однослойной нейронной сети в рамках данного исследования: 1 – сумматор; П1, П2, ..., П5 – контролируемые параметры; П11, П12, ..., П1n – значения контролируемых параметров;  $w_1, w_2, \dots, w_4$  – веса параметров

Для правильной работы нейронной сети необходимо свести исходные данные (в данном случае контролируемые параметры) в общую таблицу, показанную на рис. 3.

После подготовки исходных данных и запуска программы начинается процесс обучения нейронной сети: формируется, т.н. «скользящее окно», в котором отображаются соответствующие друг другу в данный момент времени контролируемые параметры (кроме параметра, который необходимо спрогнозировать), т.е. формируется срез данных в определенный момент времени.

Их значения умножаются на свой вес и обобщаются в сумматоре. Затем полученное в сумматоре значение сравнивается с параметром, который необходимо прогнозировать. Если разница этих значений превышает допустимую погрешность, то «виноватые» веса корректируются, а количество ошибочных прогнозов увеличивается на единицу, в противном случае увеличивается количество верных прогнозов. Затем происходит смещение «скользящего окна» на следующий ряд данных. Так происходит до тех пор, пока вероятность правильных прогнозов не будет близка к 100 %, а веса не перестанут корректироваться в значительной степени (они могут колебаться около одного значения).

После окончания обучения нейронной сети и имея полученные в ходе него значения весов можно приступить к дальнейшему прогнозированию, выходящему за рамки обучающей выборки.

Второй вариант нейронной сети в рамках исследовательской работы включает в себя двухслойную нейронную сеть с группировкой исходных данных по физическому смыслу. Схема данной сети представлена ниже, рис. 4.

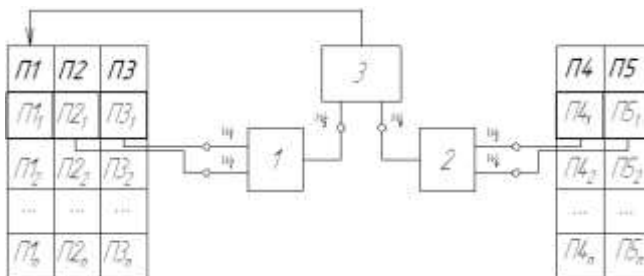


Рис. 4 Схема двухслойной нейронной сети в рамках данного исследования: 1 – сумматор по физическому смыслу; 2 – сумматор по химическому смыслу; 3 – общий сумматор; П1, П2, ..., П5 – контролируемые параметры; П11, П12, ..., П1л – значения контролируемых параметров;  $w_1, w_2, \dots, w_4$  – веса параметров;  $w_5, w_6$  – веса сумматоров 1 и 2

Принцип действия двухслойной нейронной сети тот же, что и у однослойной, разница состоит лишь в ее обучении. Дополнительный слой весов вносит определенные трудности: становится сложнее отыскать «виноватые» веса.

В первом варианте нейронной сети при корректировке веса используется алгоритм случайной подстановки. При обнаружении «виноватого» веса его значение выбирается случайным образом. Если ошибка при новом значении веса снижается – вес запоминается. Далее процедура повторяется.

Для обучения двухслойной нейронной сети будет либо использован метод обратного распространения ошибки, либо генетический метод обучения.

Таким образом, с помощью нейронных сетей становится возможным прогнозирование ресурса изоляции. Многослойные нейронные сети позволят прогнозировать более сложные системы. А так, как точный ручной расчет таких систем, как, например, трансформатор (у которого более 40 контролируемых параметров) не представляется возможным, актуальность применения для этой цели нейронных сетей все больше возрастает.

*С.В. Воробьев, студ.; рук. Ю.М. Степанова, асп.*

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗРЯДА В ГАЗЕ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

В процессе формирования электрического разряда в газе происходят сложные процессы: диссоциация молекул на атомы, различные виды ионизации, рекомбинация и т.д. Генерация заряженных частиц (ионов и электронов), их движение в разрядном промежутке приводит к изменению распределения напряжения вдоль разрядного промежутка. При моделировании разрядных процессов требуется расчет распределения электрического поля вдоль промежутка, поскольку его величина влияет на процессы ионизации и движение заряженных частиц.

Для оценки влияния объемного заряда на характер распределения электрического поля в промежутке рассмотрим простейший случай плоскопараллельного поля, образованного двумя бесконечными плоскими электродами с равномерно распределенным объемным зарядом одного знака между ними (см. рис. 1).

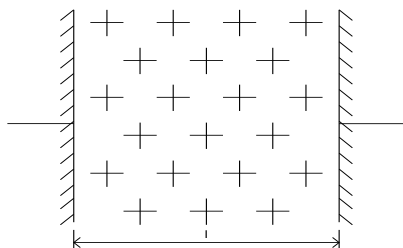


Рис. 1. Расчетная схема электродной системы с равномерным распределением объемного заряда одного знака

Для рассматриваемого случая запишем уравнение Пуассона [3]:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (1)$$

Выполним интегрирование выражения (1):

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}x + C_1. \quad (2)$$

После второго интегрирования получим:

$$\varphi(x) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2. \quad (3)$$

Для определения констант  $C_1$  и  $C_2$  рассмотрим граничные условия:

$$x=0 \rightarrow \varphi(x=0)=0 \quad 0 = -\frac{\rho}{2\varepsilon_0} \cdot 0^2 + C_1 \cdot 0 + C_2 \quad C_2 = 0, \quad (4)$$

$$x=l \rightarrow \varphi(x=l)=U \quad U = -\frac{\rho}{2\varepsilon_0} \cdot \frac{l^2}{2} + C_1 \cdot l + 0 \quad C_1 = \frac{U}{l} + \frac{\rho}{\varepsilon_0} \frac{l}{2}. \quad (5)$$

Подставляя (4), (5) в (3) окончательно получим:

$$\varphi(x) = \frac{U}{l} \cdot x + \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{\varepsilon_0} \cdot x \cdot (l-x). \quad (6)$$

Изменение напряженности электрического поля вдоль промежутка, можно получить взяв производную (6) по  $x$

$$E(x) = E_{cp} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\varepsilon_0} (l-2x), \quad (7)$$

где  $E_{cp} = \frac{U}{l}$  – средняя напряженность электрического поля между электродами без учета объемного заряда.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета распределения потенциала между электродами при разных значениях плотности положительного объемного заряда  $\rho$ .

Из рис. 2 видно, что наличие объемного заряда может привести к значительному искажению распределения электрического поля в межэлектродном промежутке.

В последние годы при моделировании разрядных процессов часто стали использовать численные модели. К таким моделям относится метод крупных частиц [1, 2]. В этом методе группы частиц, обладающие сходными свойствами объединяются в ансамбли и анализ разрядных процессов ведут для этих объединенных групп. Для плоскопараллельного поля ансамбли частиц с одинаковыми свойствами представляются в виде плоскостей, параллельных электродам (см. рис. 3.). При моделировании разрядных процессов в газах на этих плоскостях («облаках») располага-

ются молекулы, атомы, ионы и электроны. Каждое «облако» обладает своими свойствами (положением в пространстве, скоростью вдоль координаты  $x$ , плотностью частиц и т.д.). «Облака» с заряженными частицами (ионами и электронами) имеют значение плотности заряда  $\sigma_i$ .

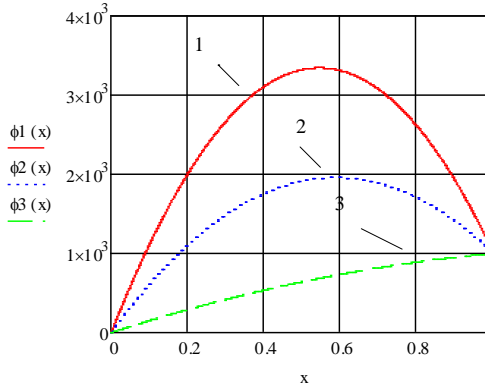


Рис. 2. Распределение потенциала между электродами при разных значениях плотности положительного объемного заряда  $\rho$ , ( $U = 1000$  В;  $l = 1$  м): 1 –  $\rho = 0,2 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>3</sup>; 2 –  $\rho = 10^{-7}$  Кл/м<sup>3</sup>; 3 –  $\rho = 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>

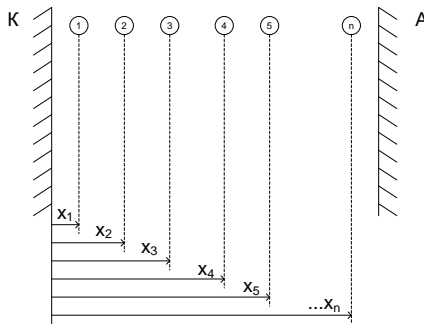


Рис. 3. Модель заряда по методу крупных частиц для плоскопараллельного поля: 1, 2, 3, ...,  $n$  – номера «облаков», расположенных вдоль оси  $x$

Для создания алгоритма расчета распределения электрического поля проанализируем модель, представленную на рис. 3 и допустим, что каждое «облако» обладает зарядом с плотностью  $\sigma_i$ . Тогда можно записать уравнение:

$$E_1 \cdot \Delta x_1 + E_2 \cdot \Delta x_2 + E_3 \cdot \Delta x_3 + E_4 \cdot \Delta x_4 + E_5 \cdot \Delta x_5 + E_n \cdot \Delta x_n = E_{cp} \cdot l. \quad (8)$$

В левой части уравнения (8) записана сумма падений напряжений на участках между «облаками» при постоянных значениях напряженностей электрического поля, а в правой части уравнения – разность потенциалов между электродами. Учитывая, что

$$E_2 = E_1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0}, \quad E_3 = E_2 + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0} = E_1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0}, \quad E_{n+1} = E_1 + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

получим

$$E_1 \cdot \Delta x_1 + \left( E_1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} \right) \cdot \Delta x_2 + \left( E_1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0} \right) \cdot \Delta x_3 + \dots + \left( E_1 + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} + \dots + \frac{\sigma_{n-1}}{\varepsilon_0} \right) \cdot \Delta x_n = E_{cp} \cdot l. \quad (10)$$

Преобразовывая (10) путем группировки слагаемых с  $\Delta x$ , получим:

$$E_1 \cdot \underbrace{(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n)}_L + \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} \cdot \underbrace{(\Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n)}_{L-x_1} + \dots + \frac{\sigma_{n-1}}{\varepsilon_0} \cdot \underbrace{(\Delta x_n)}_{L-x_{n-1}} = E_{cp} \cdot L. \quad (11)$$

Из уравнения (11) легко определяется напряженность электрического поля на поверхности первого электрода по известным  $\sigma_1$  и  $E_{cp}$

$$E_1 = E_{cp} - \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0} \cdot \left( 1 - \frac{x_i}{L} \right). \quad (12)$$

Для других  $j$ -ых участков межэлектродного пространства ( $j \geq 2$ ) напряженность электрического поля  $E_j$  можно определить по формуле (9) с учетом (12)

$$E_j = E_1 + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0}. \quad (13)$$

Проверка приведенного алгоритма расчета распределения электрического поля при моделировании разрядных процессов в газах по методу крупных частиц показала хорошее совпадение результатов с теоретическим расчетом. На рис. 4 представлены графики изменения напряженно-

сти электрического поля вдоль разрядного промежутка для случая модели с равномерно распределенными «облаками» вдоль оси  $x$  и для теоретического случая, когда объемный заряд такой же величины располагался между электродами равномерно



Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля вдоль разрядного промежутка для модели и теоретического случая

#### Библиографический список

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
2. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 452 с.
3. Бессонов Л. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1963. – 730 с.

*А.А. Лазаева, студ.; рук. В.Ф. Воробьев, к.т.н., доцент,  
Ю.М. Степанова, асп.*

#### МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

Исследование различных явлений с помощью моделирования на ЭВМ стало в настоящее время признанным и быстро развивающимся направлением в науке и технике.

В условиях, когда теоретические методы наталкиваются на серьезные трудности, а эксперименты либо чрезмерно трудоемки, либо принципиально невозможны, численное моделирование часто оказывается единственным способом изучения рассматриваемых процессов. Таким образом, одним из наиболее эффективных современных методов является численный, или машинный, эксперимент, т. е. моделирование (расчет)

на ЭВМ аналога исследуемого физического процесса на основе фундаментальных законов, управляющих этим процессом.

Секрет успеха вычислительных экспериментов заключается в разработке модели, которая достаточно детализирована, чтобы точно воспроизвести важные физические эффекты, и все же не настолько подробно, чтобы сделать расчеты неосуществимыми. Эффективность численных методов, предназначенных для получения качественных или количественных результатов, определяется их общностью. Т.е. областью применимости и возможностью учета разнообразных явлений в рамках выбранного метода, затратами ресурсов ЭВМ при заданной точности (основными ресурсами ЭВМ считаются машинное время и объем оперативной памяти), результативностью (полнотой и качеством доставляемых результатов) и другими критериями [1].

Итак, численный эксперимент на ЭВМ в определенном смысле представляет собой совершенный эксперимент, так как позволяет независимо менять параметры задачи, более детально изучать те или иные этапы эволюции процесса, уменьшая шаг счета по времени, извлекать информацию о процессе без вмешательства в него и т. д.

Идея получения правильного физического описания плазмы с помощью использования компьютера для вычисления взаимодействия между заряженными частицами пришла в голову одновременно нескольким ученым: знаменитому Джону Даусону в Принстонском университете и Оскару Бунеману в Кембриджском университете США в конце 50-х – начале 60-х годов [2].

Плазма представляет собой горячий ионизированный газ, состоящий из ионов, электронов и нейтральных атомов.

Методы моделирования плазмы, прежде всего, можно разделить на «микро» и «макро» метод [3]. При «микромоделировании» рассчитывают положение и скорость каждой частицы. В «макрометодах» «следят» за макропараметрами (за функциями распределения, плотностями и т.п.). На рис. 1. схематично представлены методы моделирования плазмы.

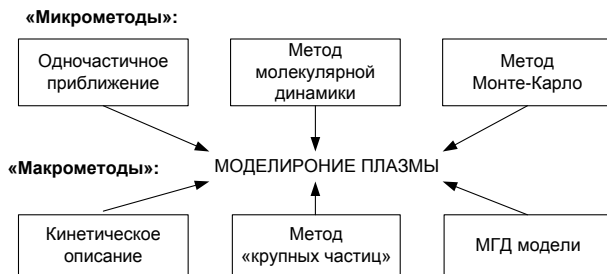


Рис. 1. Методы моделирования плазмы



**Одночастичное приближение** используется для расчета областей удержания плазмы, расчета фокусировки пучков и т.п. Условие применимости – настолько редкая плазма, что нет влияния заряженных частиц друг на друга, то есть при расчете движения заряженных частиц учитываются только внешние э/м поля, которые не зависят от потоков заряженных частиц. Этот метод может описывать процесс в плазме с очень маленьким количеством частиц.

**Метод молекулярной динамики (ММД)** используется там, где надо учесть взаимодействие отдельных частиц, причем в комплексе. Например, при формировании плазменного кристалла в пылевой плазме. Метод состоит в непосредственном численном расчете уравнений движения  $N$  частиц с учетом взаимодействия каждой частицы со всеми остальными. Это наиболее прямой, так сказать, «лобовой» метод расчета систем многих тел. Цена точности – количество операций пропорционально квадрату числа частиц ( $\sim N^2$ ), так как на каждом временном шаге помимо расчета положения каждой частицы рассчитывать  $N^2$  взаимодействий, имея в виду, что каждая из  $N$  частиц взаимодействует с  $N - 1$  частицей. Понятно, что даже для современного уровня вычислительной техники моделирование этим методом даже редкой плазмы (скажем, плотности  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) это достаточно трудоемкая задача для сколько-нибудь значимых объемов плазмы. Помимо большой длительности расчетов есть и методологические ограничения данного метода. При моделировании методом МД выбирается только один тип взаимодействий, для плазмы это кулоновские взаимодействия, то есть частицы представляются химически инертными шариками. Каждое взаимодействие считается строго детерминированным зарядом частиц и расстоянием между частицами, при этом исключен всякий вероятностный фактор.

**Метод Монте-Карло** – это общее название разнообразных способов решения различных задач с использованием случайных чисел. Метод статистических испытаний, предложенный впервые в 1948 году американским математиком фон Нейманом, заключается в том, что с помощью большого числа испытаний моделируется математическое ожидание некоторой случайной величины. Математическое ожидание ищется как среднее арифметическое  $N$  реализаций случайной величины. Метод статистических испытаний широко применяется для моделирования взаимодействия частиц с чем-либо, когда нужно учесть вероятностный характер взаимодействия. Метод основан на систематическом использовании генератора случайных чисел для определения дальнейшей истории каждой частицы. Метод Монте-Карло алгоритмически прост в реализации, но, как правило, достаточно трудоемок с точки зрения машинного времени, так как погрешность обратно пропорциональна обратному корню из чис-

ла частиц ( $\varepsilon \sim 1/\sqrt{N}$ ) и для увеличения точности на порядок приходится увеличивать число частиц на два порядка. Другим существенным ограничением применения метода Монте-Карло является необходимость знать вероятности всех рассматриваемых процессов для широкого диапазона энергий частиц, углов и расстояний взаимодействия. К тому же эти вероятности, как правило, получены эмпирически, а значит, уже изначально вносят ошибку моделирования.

**МГД описание.** Теорию магнитогидродинамического (МГД) метода разработал шведский физик Альфвен (Alfvén) в 1942 году для описания космической плазмы. Магнитогидродинамическое описание рассматривает плазму как среду, состоящую из двух или более типов жидкостей. Это приближение можно использовать, только если есть равновесное распределение частиц, например, в МГД моделях часто используется бoльцмановское распределение. Это выполняется, например, при моделирование динамики плазмы в плазменных ускорителях, при моделировании космической плазмы и т.п.

**Кинетическое описание** чаще всего используется для моделирования именно коллективных явлений, таких как колебания в плазме, неустойчивости и т.п. При этом следят не за отдельными частицами плазмы, а за функцией распределения, как она меняется во времени. Для этого решается дифференциальное уравнение Больцмана для функции распределения. В бесстолкновительном случае уравнение Больцмана превращается в уравнение Власова, которое численно решается достаточно просто. При учете столкновений возникают сложности не только с вычислением интеграла столкновений (правой части уравнения Больцмана), но и с численным решением систем уравнений с ненулевыми правыми частями.

**Метод крупных частиц**, на данный момент, это очень широко используемый метод дискретного моделирования плазмы. Этот метод можно считать промежуточным между методом молекулярной динамики и кинетическим описанием, потому что слежение происходит не за отдельными частицами и не за всеми частицами одновременно, а за группами находящихся в одном единичном объеме фазового пространства частиц. Каждая из таких групп рассматривается как одна макрочастица. По местоположению в фазовом пространстве достаточно большого количества макрочастиц восстанавливаются функция распределения и макропараметры плазмы. При этом необходимо следить за масштабом укрупнения, то есть числом макрочастиц, с тем, чтобы не нарушались критерии плазменного состояния.

В численной модели метода укрупненных частиц вся совокупность взаимодействующих компонентов в разрядном промежутке разделяется на ансамбли с одинаковыми свойствами. Для плоскопараллельного поля такие ансамбли представляются в виде перемещающихся вдоль разрядного промежутка плоскостей с частицами – «облаками». В начальный момент времени все «облака» случайным образом распределяются вдоль разрядного промежутка. Плотность частиц на «облаке», его скорость и направление движения выбираются из условия сохранения принятого закона распределения составляющих газовой смеси по скоростям. Вблизи катода располагаются «облака» электронов, исполняющих роль начальных электронов. Под действием внешнего электрического поля «облака» электронов ускоряются и вступают во взаимодействие с «облаками» нейтральной компоненты. В программе моделируются процессы ударной ионизации и не упругие удары электронов с рассеянием энергии. При взаимодействии «облака» электронов с анодом происходит его полная компенсация («облака» уничтожается). Взаимодействие «облака» положительно заряженных ионов с катодом моделируется с учетом частичного рассеяния их энергии, изменения направления движения после удара на противоположное, нейтрализации заряда и выбивания вторичных электронов. Принцип моделирования поясняется на рис. 2.

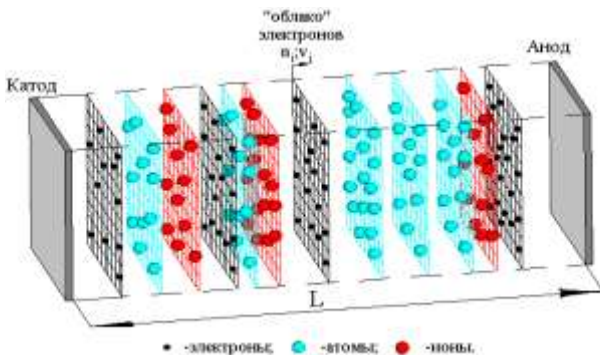


Рис. 2. Пояснение к принципу моделирования процессов в газоразрядном промежутке по методу крупных частиц

Идеализированная модель плазмы описывается уравнением Власова, характеризующим распределение электронов  $f$  и имеющим вид:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = 0. \quad (1)$$

В методе крупных частиц фазовое пространство  $(x, v)$  для каждой компоненты в начальный момент времени разбивается на ячейки. В соответствии с начальной функцией распределения каждой компоненты  $f_{\alpha}(x, v, 0)$  считается число частиц в каждой ячейке. Затем суммируются заряды и массы всех частиц данного сорта, содержащиеся в одной ячейке, суммарный заряд и масса присваиваются одной модельной частице данного сорта, которую помещают в узел сетки. Значит, есть не только начальное распределение макрочастиц, но и есть в каждом узле начальное значение плотности заряда и тока. Далее рассчитываются электрическое и магнитное поле по имеющимся значениям заряда и тока в узлах. После этого рассчитывается движение макрочастиц, их новое положение в фазовом пространстве в следующий момент времени [3]. Таким образом, определяется текущая функция распределения. Затем заряды частиц вновь разносятся по узлам фазового пространства, и процесс повторяется. Данный процесс можно представить в виде схемы, связывающей семь задач (см. рис. 3.).

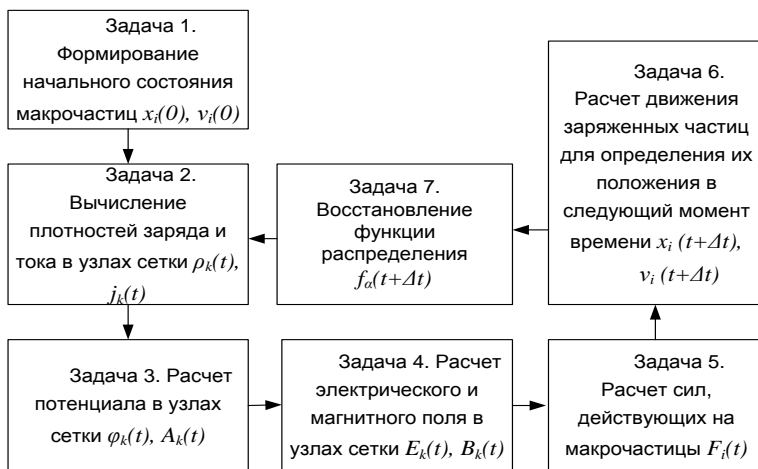


Рис. 3. Общая схема метода крупных частиц

Метод крупных частиц по сравнению с методом молекулярной динамики позволяет, во-первых, существенно уменьшить число частиц, во-вторых, избежать сингулярности кулоновских сил, обратно пропорциональных квадрату расстояний между частицами ( $\sim 1/r^2$ ).

Высокая эффективность этого метода обусловлена его универсальностью, относительно невысокой стоимостью вычислительных экспери-

ментов по сравнению с натурными и практически неограниченными возможностями диагностики моделируемых явлений.

**Библиографический список**

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с..
2. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 452 с.
3. Цветков И.В. Применение численных методов для моделирования процессов в плазме.
4. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда: пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1963. – 323 с.

*И.А. Бобонов, студ.; рук. С.А. Словесный, к.т.н., доцент*

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ**

В условиях современной российской энергетики, когда большая часть основного силового оборудования выработало свой ресурс, надежность функционирования электрических систем в значительной степени определяется эффективностью контроля его состояния. При своевременном выявлении и устранении дефектов можно значительно продлить срок службы оборудования, а также снизить затраты на ремонт, исключить отказы и в конечном итоге – повысить надежность работы энергетической системы в целом.

Среди многообразия методов контроля состояния оборудования предпочтение должно отдаваться методам, позволяющим контролировать текущее состояние изоляции непосредственно на месте установки и под рабочим напряжением. Подобные методы основываются на измерении ряда физико-химических величин, которые характеризуют процессы, развивающиеся в изоляции, с последующим анализом этих данных, позволяющим сделать вывод о состоянии изоляции.

Одним из самых эффективных способов контроля изоляции является измерение характеристик частичных разрядов. Преимущество этого способа в том, что он позволяет обнаружить дефект и его локализацию на раннем этапе развития, задолго до пробоя изоляционной конструкции, а также помогает спрогнозировать время развития дефекта.

Частичный разряд представляет собой искровой разряд малой мощности, возникающий внутри изоляции или на ее поверхности в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. С течением времени пе-

риодически повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию и приводят к ее пробое. Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит в течение многих месяцев и даже лет. Таким образом, регистрация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация их места возникновения, позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции.

Частичные разряды в изоляции характеризуются рядом физических параметров. В этот ряд входят: кажущийся заряд частичного разряда (ЧР), частота повторений импульсов ЧР, фазовый угол местонахождения (в периоде переменного напряжения) или время возникновения импульса, средний ток частичных разрядов, мощность разрядов, напряжение возникновения и напряжения погасания ЧР.

Подавляющее большинство частичных разрядов возникает в газовых полостях в толще изоляции, поэтому характеристики частичных разрядов зависят от емкости газового включения и емкости участков изоляции, расположенных над и под включением, а также геометрической емкости изоляционной конструкции в целом. Пояснить механизм формирования частичного разряда можно на примере образца изоляции, схема замещения которого представлена на рис. 1. На рис. 2 изображена схема подключения испытуемого объекта к измерительной установке.



Рис. 1. Эквивалентная схема замещения участка изоляции при рассмотрении механизма возникновения ЧР в толще диэлектрика

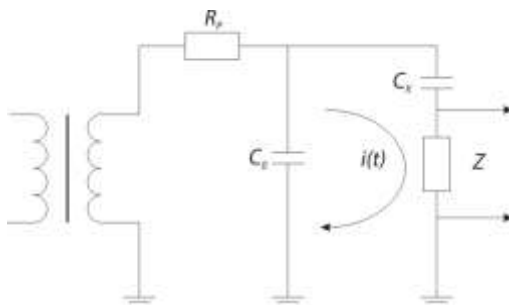


Рис. 2. Схема подключения объекта к измерительному устройству

На рис. 1:  $C_B$  – емкость участвующего в ЧР диэлектрика (емкость включения),  $C_D$  – емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно с включением,  $C_A$  – емкость остальной части диэлектрика без включений. На рис. 2:  $R_p$  – развязывающий резистор, ограничивающий ток в обмотке испытательного трансформатора при пробое исследуемого объекта и уменьшающий влияние внешних помех;  $C_0$  – соединительный конденсатор, служащий для создания пути замыкания импульсов ЧР;  $C_X$  – испытуемый объект;  $Z$  – измерительный элемент.

Частичный разряд, возникающий в тот момент, когда напряжение на включении достигает пробивного значения, сопровождается падением напряжения на электродах изоляционной конструкции, при этом напряжение источника высокого испытательного напряжения остается неизменным. Падение напряжения на объекте компенсируется источником питания, что сопровождается прохождением тока ЧР, который можно зарегистрировать. Однако само измерение величины падения напряжения на выводах объекта не представляет информационной ценности, так как его значение зависит от соотношения емкости включения  $C_B$  и емкостей других участков образца изоляции или изоляционной конструкции. Поэтому главной задачей измерений и регистрации частичных разрядов является определение так называемого кажущегося разряда.

Принцип работы используемой в настоящее время высоковольтной испытательной установки для исследования изоляционных материалов и конструкций базируется на реализации одного из электрических методов оценки количественных характеристик частичных разрядов.

Состав установки и схема подключения к ней испытуемого объекта изображены на рис. 3.

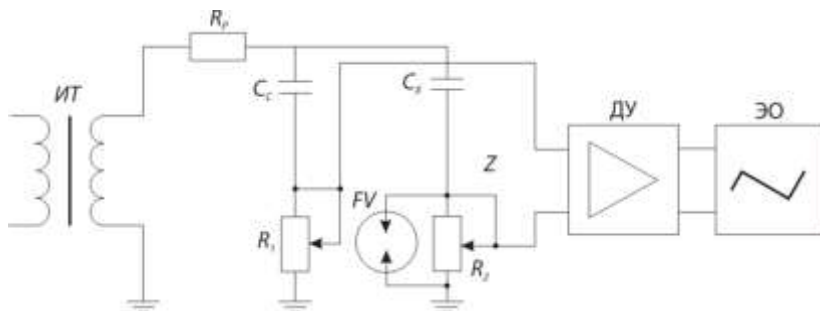


Рис. 3. Схема подключения объекта к измерительному устройству

В схему входят:

- 1) *ИТ* – испытательный трансформатор;
- 2)  $R_p$  – развязывающий резистор, ограничивающий ток в обмотке испытательного трансформатора при пробое исследуемого объекта и уменьшающий влияние внешних помех на результаты измерения ЧР;
- 3)  $C_x$  – испытуемый объект;
- 4)  $R_1, R_2$  – измерительные элементы (регулируемые сопротивления);
- 5)  $C_0$  – соединительный конденсатор, служащий для создания пути замыкания импульсов тока ЧР;
- 6) *FV* – вакуумный разрядник (предназначен для ограничения напряжения на входе комплекта измерительной аппаратуры при пробое исследуемого объекта);
- 7) *ДУ* – дифференциальный широкополосный усилитель, предназначенный для усиления импульсов частичных разрядов до значений, достаточных для регистрации их индикаторным устройством (в данном случае электронным осциллографом);
- 8) *ЭО* – электронный осциллограф.

Источник высокого напряжения и соединительный конденсатор не должны иметь ЧР, мешающих измерениям характеристик в испытуемом объекте. Измерительный элемент может представлять собой резистор или катушку.

При возникновении частичного разряда в  $C_x$ , напряжение на электродах, между которыми находится объект, снижается. Это снижение напряжения на объекте компенсируется действием соединительного конденсатора. Заряд на этом конденсаторе перераспределяется между емкостью объекта и емкостью соединительного конденсатора, что сопровождается возникновением тока в контуре измерительного элемента. Этот кратковременный ток и является измеряемым током частичного разряда.



При условии  $C_C \gg C_X \gg C_D$  ток будет наибольшим, а переносимый им заряд:  $q = \Delta q_B(C_D/C_B)$  и представляет собой кажущийся заряд частичного разряда, измеряемый при испытании объекта.

Основной проблемой, возникаемой при измерении ЧР, является отстройка от помех. При создании установки в качестве наиболее оптимального способа уменьшения влияния внешних помех с точки зрения получаемых результатов и затрат на реализацию представляется выбор рациональной схемы измерения.

Чтобы избавиться от большинства помех, в данном случае наиболее подходящей может считаться мостовая схема, обладающая высокой помехоустойчивостью.

Соединение элементов по мостовой схеме представлено на рис. 4.

Принцип ослабления сигнала от внешних шумов и помех (главным образом, от помех короны) состоит в следующем: так как источник внешних помех обладает преимущественно емкостью на землю, то токи от источника помех ( $I_{nc}, I_{nx}$ ), проходя на землю через емкости объекта и соединительного конденсатора, создают встречные (синфазные) падения напряжения на измерительных элементах ( $R_1, R_4$ ). Эти синфазные напряжения помех достаточно легко устраняются с помощью дифференциальных схем. В то же время ток частичных разрядов вызывает согласное падение напряжения на измерительных элементах, которое регистрируется измерительным устройством.

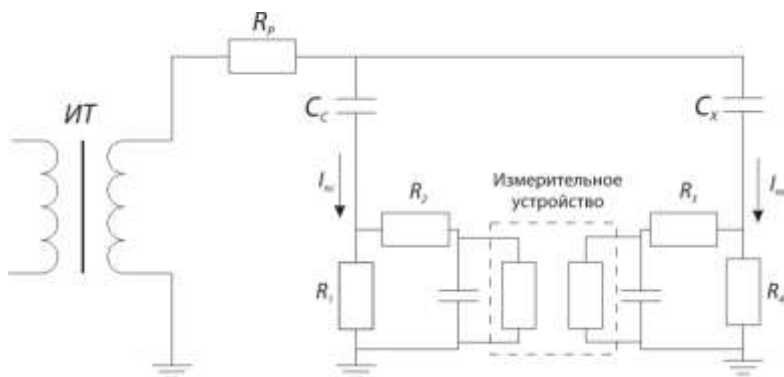


Рис. 4. Мостовая схема измерения характеристик ЧР

Использование мостовой схемы измерения характеристик частичных разрядов с использованием элементов согласования позволяет избавиться от большей части помех, обусловленных воздействием внешних

факторов. Однако от влияния помех, возникающих в контуре заземления, такая схема не защищает.

Совершенствование испытательной установки с целью повышения ее помехоустойчивости и помехозащищенности является одной из основных задач рассматриваемой работы.

*Е.А. Осташова, студ.; рук. И.Е. Шишкова, к.т.н., доцент*

### **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В качестве одного из перспективных направлений улучшения технических характеристик и надежности работы распределительных электрических сетей можно рассматривать создание воздушных линий электропередачи напряжением до 110 кВ на базе применения изолированных проводов. Исследования параметров и технических характеристик ВЛ напряжением до 110 кВ с изолированными проводами проводились в Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики Академии наук Республики Молдова. Исследовались изменения размеров зоны отчуждения от междуфазного расстояния для горизонтального расположения проводов на высоте 8,3 м.

Конструкция изолированных проводов представляет собой пучок из 3 изолированных жил, скрученных вокруг несущего троса таким образом, чтобы механическая нагрузка смонтированного провода воспринималась только несущим проводом. Жилы выполнены из одной или нескольких скрученных алюминиевых проволок круглого сечения. В качестве изоляции применяют светостабилизированный сшитый полиэтилен черного цвета. Несущий трос круглого сечения скручен из 7 проволок, изготовленных из алюминиевого сплава, и может использоваться как нулевой провод.

Успехи в области освоения трекингоустойчивого светостабилизированного сшитого полиэтилена открывают возможности организации производства изолированных проводов различных сечений на разные классы напряжения и применения их для создания линий электропередач нового типа для распределительных электрических сетей в одноцепном и многоцепном исполнении.

Основными преимуществами таких технических решений являются новые возможности сооружения воздушных линий компактной конструкции, обладающих повышенной пропускной способностью и улуч-

шенными показателями надежности и безопасности. При использовании изолированных проводов расстояния между фазами могут быть приняты в 3 – 4 раза меньшими (рис. 1), чем на линиях с голыми проводами. Это позволяет улучшить электрические параметры линий, повысить их пропускную способность и улучшить параметры режимов. Кроме того, применение изолированных проводов снижает опасность гололедообразования, а также уменьшает аварийность от кратковременных соприкосновений проводов при их пляске и качаниях при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов; практически исключается возможность короткого замыкания между проводами фаз или на землю; снижаются габариты подвески, что может дать экономию по материалу опор; сокращаются эксплуатационные расходы за счет исключения систематической расчистки трасс, сокращения объемов аварийно-восстановительных работ, замены поврежденных изоляторов.

Стоимость изолированных проводов высока, но срок окупаемости капитальных затрат значительно ниже нормативного благодаря перечисленным преимуществам.

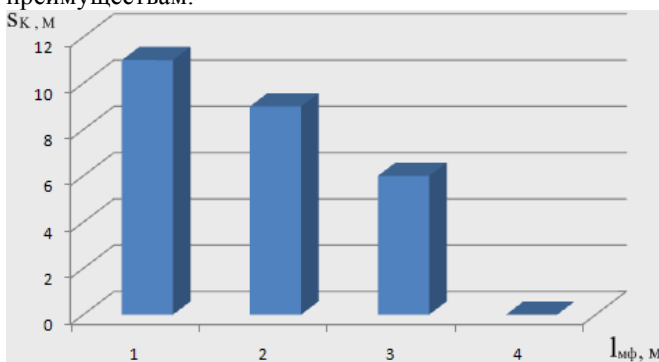


Рис. 1. Зависимость размеров зоны отчуждения от междуфазного расстояния  $l_{мф}$ : 1 – 4 м; 2 – 3 м; 3 – 2,5 м; 4 – 1 м.

Создание воздушных линий на базе использования изолированных проводов ставит перед электротехнической промышленностью новые задачи по производству как изолированных проводов различных сечений и для различных классов напряжений, так и соответствующей линейной арматуры, новой защитной и коммутирующей аппаратуры и регулирующих устройств.

**Библиографический список**

1. **Быкова Е.В.** Возможности создания и технические характеристики одноцепных и многоцепных воздушных линий электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности с изолированными проводами для распределительных сетей / Е.В. Быкова, В.М. Постолатий, В.М. Сулов // Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: VI Симпозиум Электротехника 2010 год. – М., 2001. – С. 68.

2. **Магазинник Л.Т.** Монтаж электрической сети самонесущими изолированными проводами и кабелями / Л.Т. Магазинник // Электрика. – 2008. – № 11. – С. 18 – 21.

*А.С. Шильников, магистрант; рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., проф.*

**ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ  
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В настоящее время в России значительная часть силовых трансформаторов 110 кВ и выше отработала нормативный срок службы 25 лет. В эксплуатации находятся трансформаторы, которым 40, 50 и даже 60 лет. Экономическая ситуация, а также общее количество оборудования с длительным сроком службы не позволяют в ближайшие годы провести замену большинства таких трансформаторов. Поэтому для поддержания требуемой эксплуатационной надежности трансформаторов очень важными являются диагностический контроль и при необходимости проведение капитальных ремонтов.

Вместе с тем, необоснованное решение о проведении капитального ремонта, его объеме и технологии в лучшем случае приводит к неоправданным затратам, в худшем к снижению надежности, ресурса и даже отказам, а в итоге к значительным материальным потерям. Для снижения рисков возможных отказов, обеспечения возможности управления из удаленных центров общемировой практикой становится применение различных автоматизированных систем управления, мониторинга и оперативной диагностики. Целью внедрения этих систем является получить ответы на основные вопросы:

1. Какое текущее техническое состояние трансформатора, какие проблемы и дефекты подсистем обусловили ухудшение состояния.

2. Какой, на данный момент времени, остаточный ресурс работы трансформатора, как долго еще возможна его безаварийная эксплуатация.

3. Какие регламентные и ремонтные работы должны быть применены к данному трансформатору для продления его безаварийной эксплуатации.

Наиболее сложной и основополагающей является задача оперативного определения текущего технического состояния трансформатора.

Решения этой задачи возможно как проведением разовых комплексных обследований трансформаторов, так и внедрением систем непрерывного контроля. Практическому применению того или иного метода должен предшествовать этап аналитического сравнения их возможностей и оценки экономической эффективности.

Таким образом, повышение эффективности совокупности этих подходов возможно только путем проведения анализа функциональной важности и информативной ценности каждого из нормативных, дополнительных и внедряемых методов по контролю состояния трансформатора. На основании, которого и будет сформирован регламент испытаний силового трансформатора.

## Содержание

### Секция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

<i>Чекан Г.В.; рук. Слышалов В.К.</i> Расчет показателей надежности подстанций при наличии АВР . . . . .	3
<i>Кандалов Ю.В.; рук. Слышалов В.К.</i> Математическая модель электромагнитных процессов в системе трубопровод – земля при синусоидальном токе . . . . .	5
<i>Кандалов Ю.В.; рук. Слышалов В.К.</i> Расчет параметров заземлителей трубопроводного типа . . . . .	11
<i>Беликова Я.А.; рук. Голов В.П., Мартиросян А.А.</i> Моделирование установившихся режимов с трехфазной регулируемой емкостью УПК в электроэнергетической системе . . .	18
<i>Полкошиников Д.А.; рук. Слышалов В.К.</i> Влияние способа заземления экрана одножильного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на электрическое и тепловое поле кабеля . . . . .	20
<i>Кулыгин П.А.; рук. Соколов М.И.</i> Разработка программного продукта для автоматизированной адаптации DOS-программ под современные операционные системы .	21
<i>Москвин И.А.; рук. Слышалов В.К.</i> Математическая модель многомашинной электроэнергетической системы в простейшем представлении . . . . .	24
<i>Гаврилова М.В.; Макарина М.В.</i> Управление качеством электроэнергии в электрических сетях . . . . .	28
<i>Вермаховский А.Н., Бекасов Д.С.; рук. Шульпин А.А.</i> Организация электросбережения на текстильных предприятиях . . . . .	31
<i>Макарова Е.В., Пацунина А.А.; рук. Шульпин А.А.</i> Применение компенсирующих устройств на вводах различных потребителей электроэнергии . . . . .	35
<i>Тимофеева М.В.; рук. Бушуева О.А.</i> Организация контроля показателей качества электрической энергии в филиале ОАО «МРСК Центра» – «Ярэнерго» . . . . .	37
<i>Беликова К.С.; рук. Бушуева О.А.</i> Компенсация реактивной мощности в сетях коммунально-бытовых потребителей . . . . .	40
<i>Максимова С.Н., Богомолов А.Е., Наумов П.В.; рук. Братолобов А.А., Огорелышев Н.А.</i> Исследование наведенного напряжения на отключенной ВЛ . . . . .	43
<i>Волков Е.Н.; рук. Бушуева О.А.</i> Тепловизионный контроль работы электрооборудования в электрических сетях . . . . .	45

### Секция 12. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Чугрова Е.С.; рук. Шуин В.А.</i> Моделирование защиты генераторов от замыканий на землю в обмотке статора типа БРЭ 1301.02 (ЗЗГ-12) . . . . .	48
<i>Горбачев И.Е.; рук. Коротков В.Ф.</i> Разработка программ интерактивного решения и контроля аналитических задач в системе автоматизированного обучения . . . . .	66
<i>Боталов Е.В., Киселев Д.И.; рук. Фролова О.В.</i> Разработка лабораторного практикума «Расчет ступенчатых токовых направленных защит линий кольцевой сети с одним источником питания» . . . . .	69
<i>Князева А.А., Котлова А.В.; рук. Коротков В.Ф.</i> Статический источник реактивной мощности СТАТКОМ . . . . .	76
<i>Стойкова И.Ю.; рук. Фролова О.В.</i> Устройство автоматики ликвидации асинхронного режима «АЛАР-М» . . . . .	81
<i>Мазнев Е.А.; рук. Коротков В.Ф.</i> Адаптация программы исследования АЧР ЭЭС к системе автоматизированного обучения по дисциплине «Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах» . . . . .	84
<i>Вятский И.Е.; рук. Алексинский С.О.</i> Разработка алгоритма расчета параметров воздушных линий 110 – 220 кВ для задачи определения места короткого замыкания . . . . .	87

<i>Козлов С.В.; рук. Алексинский С.О.</i> Алгоритм определения места короткого замыкания для терминала ВЛ 110 – 220 кВ . . . . .	90
<i>Кокорулин Д.Н.; рук. Колесов Л.М., Шуин В.А.</i> Анализ алгоритмов выделения аварийных составляющих в устройствах релейной защиты и автоматики линий . . . . .	95
<i>Макаров Ю.В.; рук. Гусенков А.В.</i> Виртуальная лабораторная работа «Исследование токовых ступенчатых защит» с использованием среды графического программирования LABVIEW . . . . .	99
<i>Сарбеева О.А., Чугрова Е.С.; рук. Шуин В.А.</i> Информационные характеристики переходных токов при замыканиях на землю в сетях 6 – 10 кВ . . . . .	105

Секция 13. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

<i>Снегирев В.М.; рук. Мартынов В.А.</i> Технология сварки дистанционирующих направляющих решеток . . . . .	119
<i>Титов Д.И.; рук. Сайкин М.С.</i> Технология изготовления пояса стационарного подъемного крана . . . . .	121
<i>Архангельский Н.В., Кузьмин А.Е., Шерихов А.В.; рук. Королев А.Н., Марков М.Г.</i> Исследование информационных возможностей катушек индуктивности . . . . .	123
<i>Репниев С.И.; рук. Мартынов В.А.</i> Система автоматизированного проектирования сварочных трансформаторов с механическим регулированием . . . . .	125
<i>Киселев А.В.; рук. Сайкин М.С.</i> Моделирование многопостовой сварки в программном комплексе «SWCAD» . . . . .	127
<i>Кормилицын Д.Н.; рук. Мартынов В.А.</i> Математическое моделирование процессов в цепях с распределенными параметрами . . . . .	131
<i>Баранов В.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Особенности применения корректоров коэффициента мощности в медицинском оборудовании . . . . .	133
<i>Яблоков А.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование электромагнитных процессов на основе совместного цепного и полевого расчетов . . . . .	136
<i>Рыжов Д.В., Самаринский С.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Определение параметров коаксиального шунта . . . . .	139
<i>Бритов И.К., Библаев Н.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Применение программного комплекса MATLAB для моделирования и расчета заземляющего устройства . . . . .	140
<i>Баженов В.С.; рук. Сайкин М.С.</i> Моделирование серии вакуумных герметизаторов на основе магнитных наножидкостей в среде «ELCUT» . . . . .	142
<i>Гудилко А.Е., Крюков А.И., Луконин М.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Расчет параметров заземления подстанции . . . . .	144
<i>Матросов Н.М., Селиванова А.А.; рук. Лебедев В.Д.</i> Создание математической модели петли гистерезиса . . . . .	145
<i>Токарев С.Ю.; рук. Кадников С.Н.</i> Основные результаты исследования процесса распространения электромагнитных волн в длинных линиях . . . . .	147
<i>Токарев С.Ю.; рук. Кадников С.Н.</i> Методика расчета электромагнитных волн в длинных линиях . . . . .	149
<i>Карачев В.Д.; рук. Белоногов В.Г., Голубев А.Н., Мартынов В.А.</i> Моделирование т-фазного синхронного двигателя в среде ELCUT . . . . .	150
<i>Ялховских А.С.; рук. Макаров А.В.</i> Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена . . . . .	155

Секция 14. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

<i>Колесникова И.И.; рук. Савельев В.А.</i> Новая концепция АСКУЭ в условиях оптового и розничного рынка . . . . .	158
--	-----

<i>Шелудько Д.В.; рук. Савельев В.А.</i> Мониторинг силовых трансформаторов . . . . .	160
<i>Новоселов Е.А.; рук. Савельев В.А.</i> Перспективы развития альтернативных преобразователей энергии . . . . .	161
<i>Балин Д.С.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка лабораторной работы «Методы оперативного контроля обмоток электродвигателей» . . . . .	163
<i>Прохоров А.А.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Проблема создания «вечного двигателя» на основе энергии постоянных магнитов . . . . .	166
<i>Жуков П.В., Новоселов Е.М.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Исследование влияния повреждений обмотки ротора на спектр внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя . . . . .	169
<i>Комаров А.О.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка автоматизированной обучающей системы «Теория надежности электроэнергетики» . . . . .	171
<i>Новоселов А.Л.; рук. Калачева О.Н.</i> Анализ возможности упрощения инженерного метода оценки успешности самозапуска электродвигателей собственных нужд электростанций . . . . .	173
<i>Литвинов С.Н.; рук. Калачева О.Н.</i> Сопоставление методик выбора электродвигателя собственных нужд, использующих различные методы задания моментных характеристик двигателя и механизма . . . . .	176
<i>Новиков А.Д., Александров И.М.; рук. Назарычев А.Н.</i> Разработка базы данных по электрооборудованию электростанций и подстанций . . . . .	179
<i>Фаткуллин А.С.; рук. Назарычев А.Н.</i> Исследование причин повреждения и оценка надежности маломасляных выключателей ВМТ . . . . .	181
<i>Киреев Е.А.; рук. Назарычев А.Н.</i> Оценка ресурса электрооборудования с учетом влияния климатических факторов . . . . .	184
<i>Перионков С.В.; рук. Лапшин В.М.</i> Сравнительный анализ методов расчета токов коротких замыканий в системе собственных нужд атомных электростанций . . . . .	187
<i>Мотовилов Д.С., рук. Лапшин В.М.</i> Сравнительный анализ расчетов токов КЗ в системе собственных нужд в соответствии с национальным и международным стандартами . . . . .	190
<i>Рзаева И.Ф.; рук. Лапшин В.М.</i> Нагрузочная способность трансформаторов связи на ТЭЦ . . . . .	191
<i>Углов А.А.; рук. Рассказчиков А.В.</i> Применение и выбор кабелей из СПЭ . . . . .	193
<i>Глотова Н.В.; рук. Назарычев А.Н.</i> Применение методов технического состояния при мониторинге электрооборудования . . . . .	196
<i>Гришин С.Б.; Савельев В.А.</i> Алгоритм действия частотно-делительной автоматики . . . . .	198

#### Секция 15. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Миндовский Д.А.; рук. Филиппов Г.А.</i> Влияние внешних электрических полей на результаты измерения диэлектрических потерь . . . . .	201
<i>Улановская А.А.; рук. Баженов О.А.</i> Испытание кабеля с помощью передвижной лаборатории высоковольтных испытаний . . . . .	204
<i>Мельникова О.С., Костерин А.В.; рук. Митькин Ю.А.</i> Анализ повреждаемости технических подсистем силовых трансформаторов 35 – 110 кВ . . . . .	207
<i>Максимов С.Е.; рук. Вихарев А.В., Сидоров С.Г.</i> Применение нейронных сетей для прогнозирования изменения характеристик электрической изоляции . . . . .	209
<i>Воробьев С.В.; рук. Степанова Ю.М.</i> Расчет распределения электрического поля в плоскопараллельной электродной системе при моделировании разряда в газе методом крупных частиц . . . . .	214
<i>Лазарева А.А.; рук. Воробьев В.Ф., Степанова Ю.М.</i> Методы моделирования плазмы . . . . .	218
<i>Бобонов И.А.; рук. Словесный С.А.</i> Высоковольтная установка для измерения характеристик электроизоляционных материалов и конструкций . . . . .	224
<i>Осташова Е.А.; рук. Шишкова И.Е.</i> Анализ факторов влияния высоковольтных линий электропередачи на инфраструктуру электрических сетей . . . . .	228



*Шильников А.С.; рук. Митькин Ю.А.* Продление срока службы силовых трансформаторов .....

230

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ  
«ЭНЕРГИЯ-2010»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ  
Том 3

*Составитель Макаров А.В.  
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.  
Подписано в печать 28.04.2010. Формат 60x84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,72.  
Тираж 100 экз. Заказ №  
ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
Университет им. В.И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в РИО ИГЭУ.