

## КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ЭКРАНА ОДНОФАЗНОГО КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.

*К. Б. Такырбашев, КГТУ им. И. Раззакова*

*Рассматривается методика расчета выбора способа заземления экрана кабеля и алгоритм контроля за состоянием экрана кабеля в зависимости от протекающего тока по жиле кабеля. Приведены практические расчеты для конкретного объекта и схема реализации алгоритма контроля за состоянием экрана кабеля.*

*The method of calculation of a choice of a way of grounding of the screen of a cable and algorithm of control of a condition of the screen of a cable depending on proceeding current on a cable vein is considered. Practical calculation for concrete object and the scheme of realization of algorithm of control of a condition of the screen of a cable are given.*

В настоящее время кабельные линии 6-10 кВ г. Бишкек с бумажной изоляцией меняют на новые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена однофазного исполнения.

Актуальность темы заключается в том, что в процессе эксплуатации кабельной сети, не контролируются состояние изоляции, температура вибрации, токи в экранах кабеля в режиме реального времени, т.е. он-лайн режиме.

В современных микропроцессорных терминалах защиты и автоматики отсутствуют функции диагностики контроля состояния экрана кабеля и температурного режима кабеля, а также регистрация частичных разрядов. Решение вышеперечисленных актуальных задач позволит устройствам релейной защиты стать профилактическим средством защиты.

Новизной данной статьи является контроль состояния заземления экрана кабелей 6, 10, 35 кВ в режиме он-лайн. Предложен алгоритм диагностирования состояния экрана кабеля, адаптированного в зависимости от проходящего тока по жиле кабеля.

**Цель исследования** заключается в том, чтобы создать новый алгоритм, диагностирующий состояние экрана кабеля.

Задача исследования:

- обеспечение отказа устойчивости,
- надежное электроснабжение потребителей,
- высокий уровень автоматизации,
- профилактическая защита с функцией диагностики кабельных линий,
- выявление дефектов в экране кабеля.

Особенностью однофазного силового кабеля 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена – это экран.

Рассмотрим поперечное сечение однофазного кабеля из сшитого полиэтилена (рис. 1).

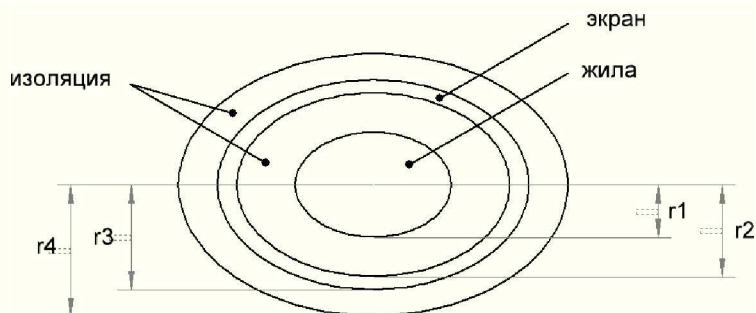


Рис. 1. Однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена.

При эксплуатации однофазного кабеля из сшитого полиэтилена возникает проблема заземления экрана. По нормативно-технической документации [1, 2] необходимо заземлять экран кабеля с 2-х сторон. В этом случае, в зависимости от протекающего тока по жиле кабеля, возникает ток экрана, примерно составляющий 80 % от протекающего тока по жиле кабеля. Отсюда возникают потери и нагрев изоляции и, как следствие, происходит пробой изоляции.

**Постановка задачи исследования.**

Контроль за состоянием заземления экрана кабеля влияет:

- на величину тока в экране в нормальных и аварийных режимах и при неправильном заземлении экрана, что может привести к повреждениям.
- на электрические потери в экране, а значит, на его тепловой режим и пропускную способность.
- на величину напряжения в экране в нормальных и аварийных режимах (при его заземлении), т.е. на надежность режима кабеля и безопасность его обслуживания.
- на основные электрические параметры кабеля (активное и индуктивное сопротивление).

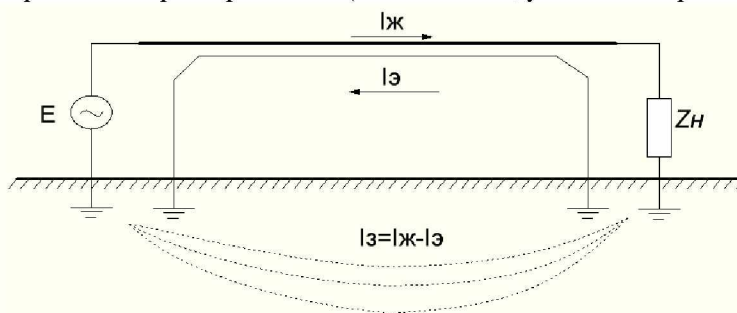


Рис. 2. Однофазная сеть, включающая источник, кабель, нагрузку.

Сегодня имеются многочисленные факторы неправильного заземления экранов однофазных кабелей, находящихся в эксплуатации.

**Исследование.**

Для исследования методики упрощенного расчета заземления экрана однофазного кабеля [3], основанных на известных формулах для собственных и взаимных активно-индуктивных сопротивлений многопроводной системы «провода – земля».

На основе этой методики можно создать функции диагностики УРЗА за состоянием экрана.

На основании методики упрощенного расчета экрана создан алгоритм диагностики: вводятся паспортные данные кабеля и в режиме он-лайн контролируется состояние экрана кабеля.

**Механизм появления токов и напряжений в экранах.**

Для объяснения рассмотрим однофазную сеть (рис. 2)  $I_{ж} = I_{э} + I_{з}$ .

Ток в земле  $I_3$  будет возвращаться от нагрузки в источник, занимая всю толщу земли, протекая через нагрузку, возвращается через толщу земли в источник. Распределенный ток в земле протекает на одной определенной эквивалентной глубине  $D_3$ , что составляет несколько сотен метров.

При определении параметров кабеля приняты следующие допущения:

- геометрия расположения в пространстве 3-х фазной системы кабелей такова, что  $s \gg r_3$ .
- если фазы кабеля расположены в вершинах равностороннего треугольника, то  $s = d_{AB} = d_{BC} = d_{AC}$ ; если фазы кабеля расположены на одном уровне, то  $d_{AC} = 2d_{AB} = 2d_{BC}$ ; в случае транспозиции жил кабеля  $s' = d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC} = 1,26 \cdot d_{AB}$ .
- экран кабеля упрощенно считаем  $r_3 \gg (r_3 - r_2)$ , это позволяет пренебречь конечной толщиной экрана и в расчетах использовать лишь внутренний радиус.
- пренебрегаем токами смещения в земле.
- пренебрегаем эффектом близости на промышленной частоте.

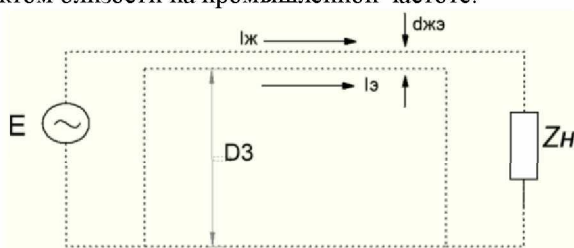


Рис. 3. Однофазная сеть, для которой показаны условные контуры с токами.

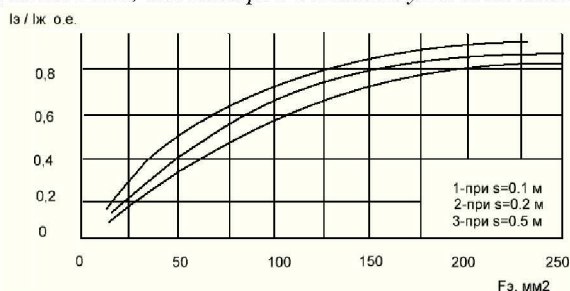


Рис. 4. Ток в экране однофазного кабеля по сравнению с током в жиле (в симметричном режиме) в зависимости от сечения экрана  $F_э$  и расстояния  $s$  между кабелями (между центрами) соседних фаз. Сечените жилы  $F_{жс} = 500 \text{ мм}^2$ , экран заземлен в обоих концах кабеля.

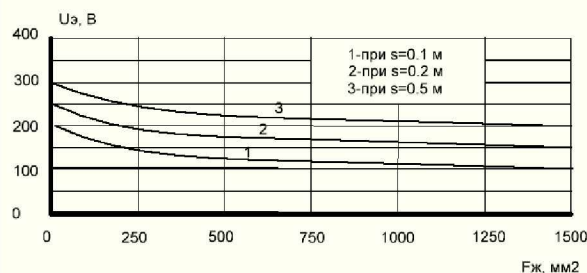


Рис. 5. Напряжение на экране однофазного кабеля (в симметричном режиме) в схеме рис. 7 в зависимости от сечения жилы  $F_{жс}$  и расстояния  $s$  между кабелями (между центрами) соседних фаз. Напаряжение дано в расчете на длину кабеля 1000 м в жиле 1 000 А. Сечение экрана  $F_э$  любое, экран заземлен только на одном конце кабеля.

Уравнение, описывающее взаимодействие контуров (рис. 2, 3) следующее:

$$\Delta \dot{U}_{жк} = \dot{I}_{жк} \cdot \dot{Z}_{жк} + \dot{Z}_{жкэ} \cdot \dot{I}_э$$

$$\Delta \dot{U}_э = \dot{I}_э \cdot \dot{Z}_э + \dot{I}_{жк} \cdot \dot{Z}_{жкэ}, \text{ где } \Delta \dot{U}_{жк} = \dot{E} - \dot{I}_{жк} \cdot \dot{Z}_{жк} - \text{ продольное напряжение на жиле.}$$

$\Delta \dot{U}_э$  - продольное напряжение на экране.

$R_{жк}, R_э, R_3$  - активное сопротивление жилы, экрана, земли.

В случае заземления экрана однофазного кабеля с двух сторон  $\Delta \dot{U}_э = 0$

$$0 = \dot{Z}_{\Delta} \dot{I}_{\Delta} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \cdot \dot{I}_{\text{Ж}}; \quad \dot{Z}_{\Delta} \dot{I}_{\Delta} = -\dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \cdot \dot{I}_{\text{Ж}} \quad \frac{\dot{I}_{\Delta}}{\dot{I}_{\text{Ж}}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{ЖЭ}}}{\dot{Z}_{\Delta}} = -\frac{R_3 + j \cdot \omega \cdot M_{\text{ЖЭ}}}{R_3 + R_{\Delta} + j \cdot \omega \cdot L_{\Delta}} \quad \left| \frac{I_{\Delta}}{I_{\text{Ж}}} \right| < 1$$

В случае, если экран однофазного кабеля заземлен с одной стороны:  $I_{\Delta} = 0 \quad \Delta \dot{U}_{\Delta} = \dot{Z}_{\text{Ж}} + \dot{I}_{\text{Ж}}$

В случае 3-х фазной группы однофазных кабелей, взаимодействие контуров будет относительно шести напряжений и шести токов

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{ЖА}} &= \dot{Z}_{\text{Ж}} I_{\text{ЖА}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\Delta\text{А}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖВ}} + \dot{I}_{\Delta\text{В}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖС}} + \dot{I}_{\Delta\text{С}}) \cdot \\ \Delta \dot{U}_{\text{ЖВ}} &= \dot{Z}_{\text{Ж}} I_{\text{ЖВ}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\Delta\text{В}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖА}} + \dot{I}_{\Delta\text{А}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖС}} + \dot{I}_{\Delta\text{С}}) \cdot \\ \Delta \dot{U}_{\text{ЖС}} &= \dot{Z}_{\text{Ж}} I_{\text{ЖС}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\Delta\text{С}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖА}} + \dot{I}_{\Delta\text{А}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖВ}} + \dot{I}_{\Delta\text{В}}) \cdot \\ \Delta \dot{U}_{\Delta\text{А}} &= \dot{Z}_{\Delta} I_{\Delta\text{А}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\text{ЖА}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖВ}} + \dot{I}_{\Delta\text{В}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖС}} + \dot{I}_{\Delta\text{С}}) \cdot \\ \Delta \dot{U}_{\Delta\text{В}} &= \dot{Z}_{\Delta} I_{\Delta\text{В}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\text{ЖВ}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖА}} + \dot{I}_{\Delta\text{А}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖС}} + \dot{I}_{\Delta\text{С}}) \cdot \\ \Delta \dot{U}_{\Delta\text{С}} &= \dot{Z}_{\Delta} I_{\Delta\text{С}} + \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\Delta\text{С}} + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖА}} + \dot{I}_{\Delta\text{А}}) + \dot{Z}_{\text{К}} (\dot{I}_{\text{ЖВ}} + \dot{I}_{\Delta\text{В}}) \cdot \end{aligned}$$

Таким образом, справедливо  $(I_{\text{ЖВ}} + I_{\Delta\text{В}}) \approx 0$  и  $(I_{\text{ЖС}} + I_{\Delta\text{С}}) \approx 0$ , т.е. фазы В, С не могут компенсировать влияние тока жилы фазы А на ток в экране фазы А.

Следовательно, механизм возникновения токов в экранах остается справедливым и для групп из 3-х однофазных кабелей. Для определения погонных продольных активно-индуктивных сопротивлений 3-фазной системы однофазных кабелей токами прямой и нулевой последовательностей, которые используются в расчетах нормальных и аварийных режимов работы сети необходимо указать граничные условия и состояния экрана, от которого зависят параметры кабеля ([3]).

Таблица 1. Состояние экрана и граничные условия.

№	Состояние экрана	Схема	Граничные условия
1	Разземлен		$I_{\Delta\text{А}} = 0$ $I_{\Delta\text{В}} = 0$ $I_{\Delta\text{С}} = 0$
2	Заземлен с одной стороны		$I_{\Delta\text{А}} = 0$ $I_{\Delta\text{В}} = 0$ $I_{\Delta\text{С}} = 0$
3	Заземлен с двух сторон		$\Delta \dot{U}_{\Delta\text{А}} = 0$ $\Delta \dot{U}_{\Delta\text{В}} = 0$ $\Delta \dot{U}_{\Delta\text{С}} = 0$

4	Применена Транспозиция экранов (N полных циклов, на рис. показано N=1)		$\Delta \dot{U}_{\text{ЭА}} = 0$ $\Delta \dot{U}_{\text{ЭВ}} = 0$ $\Delta \dot{U}_{\text{ЭС}} = 0$ См. примечание 3.
<p><i>Примечания.</i>                  В п. 2 таблицы пренебрегаем емкостными токами в начале кабеля.                  В п. 3, 4 пренебрегаем сопротивлениями заземления экрана.                  В п. 4 необходимо учесть граничные условия для токов в узлах транспозиции, для чего система (1) записывается для каждого участка между узлами транспозиции (т.е. 3 раза при N=1) и токи в экранах (а также напряжения) в конце участка приравняются к токам (и напряжениям) в начале другого участка в соответствии с рисунком.</p>			

**Результаты расчета КЛ- 35 кВ от ПС Южная до ПС Центральная-2**

В расчетах необходимо задать геометрию кабеля рис. 1, сечение жилы  $F_{ж}$  и сечение экрана  $F_{э}$ , а также толщину  $d_{жэ}$  изоляции  $\ll$  жила-экран.

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_{ж}}{\pi}}; \quad r_2 = r_1 + d_{жэ}; \quad r_3 = \sqrt{r_2^2 + \frac{F_{э}}{\pi}}$$

Принимаем  $d_{жэ} = 3,4 \text{ мм}$

По упрощенной методике расчета получены расчетные кривые для кабеля 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена рис. 4, рис. 5. [4].

Паспортные заводские данные для расчета

$F_{ж} = 240 \text{ мм}^2$  - сечение жил кабеля (алюминий).

$F_{э} = 28 \text{ мм}^2$  - сечение экрана кабеля (алюминий).

$r_{ж} = 18,2 \text{ мм}$  – радиус жилы.

$r_{э} = 28,8 \text{ мм}$  – радиус экрана.

$I_{ж} = 380 \text{ А}$  – номинальный ток

$r_{к} = 31,45 \text{ мм}$  – внешний радиус кабеля.

$\rho_{ж} = 0,028 \text{ мком} \cdot \text{метр}$  алюминий.

$\rho_{э} = 0,028 \text{ мком} \cdot \text{метр}$  алюминий.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость в вакууме.

$L_{жэ}^* = 0,208 \text{ мГн/км}$  – относительная индуктивности.

Длина кабеля  $L = 3300 \text{ м}$ .

$\rho_{ср} = 184 \text{ Ом} \cdot \text{метр}$  – среднее удельное сопротивление грунта.

$I_{кз}^{(3)} = 3500 \text{ А}$  – ток трехфазного короткого замыкания вне кабеля.

$s = 0,1 \text{ м}$  (взято из расчета) – расстояние между кабелями соседних фаз.

Рассмотрим два случая заземления экрана.

**Первый случай.** Экран заземлен с одной стороны кабеля, а второй конец экрана кабеля не заземлен.

Используем методику расчета профессора д.т.н. Евдокунина, напечатанного в журнале № 5 (83) 2013 г. Новости электротехники.

По графику  $U_{\text{ЭГ}} = f(F_{жс})$  при  $s = 0,1 \text{ м}$  в зависимости от сечения жил выбираем  $U_{\text{ЭГ}} = 175 \text{ в}$ , а в случае  $s = 0,2 \text{ м}$   $U_{\text{ЭГ}} = 200 \text{ в}$ , т.е. чем больше  $s$ , тем больше напряжение на экране.

Где  $U_{\text{ЭГ}}$  - напряжение на экране, взятых по графику.

$$U_{\text{Э}} = U_{\text{ЭГ}} \cdot \frac{l}{1000} \cdot \frac{I_{жс}}{1000} - \text{эта формула учитывает ток и длину кабеля}$$

$U_{\text{Э}}$  - напряжение кабеля реальное.

$$U_{\text{ЭГ}} = 175 \text{ в} \cdot \frac{3300 \text{ м}}{1000} \cdot \frac{380 \text{ А}}{1000} = \frac{175 \cdot 33 \cdot 38}{1000} = \frac{219450}{1000} = 219,45 \text{ в}$$

Это означает, что при протекании номинального тока по жиле кабеля, равного 380 в, на свободном незаземленном конце появляется 219,45 в.

Рассчитаем напряжение на экране в случаях трехфазного короткого замыкания кабельной линии

$$U_{ЭГ} = 175в \cdot \frac{3300М}{1000} \cdot \frac{3500А}{1000} = \frac{175 \cdot 33 \cdot 35}{1000} = \frac{219450}{100} = 2021,25в$$

**Второй случай.** Когда экран кабельной линии заземлен с двух сторон кабеля.  $\Delta U_{Э} = 0$

Применяются следующие формулы для расчета тока  $I_{Э}$ .

$$\frac{I_{Э}}{I_{ж}} = -\frac{Z_{ЖЭ}}{Z_{Э}} = -\frac{R_3 + j \cdot \omega \cdot \mu_{ЖЭ}}{R_3 + R_{Э} + j \cdot \omega \cdot L_{ЖЭ}} \quad \mu_{ЖЭ} = L_{ЖЭ}$$

$$D_3 = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}} - \text{эквивалентная}$$

$D_3$  – эквивалентная глубина земли.

$$R_{земли}^* = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \rho_{земли} - \text{относительное активное сопротивление земли.}$$

Выводим постоянные из формул:

$$L_{Э} = \ln \left( 120 \cdot \frac{\sqrt{\rho_3}}{r_{Э}} \right) \cdot l \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 0,139гн$$

$$\frac{I_{Э}}{I_{ж}} = -\frac{R_3 + j \cdot \omega \cdot \mu_{ЭЖ}}{R_3 + R_{Э} + j \cdot \omega \cdot L_{Э}}$$

$$R_3 = R_{Э}^* \cdot 3300М = 9,07 \cdot 10^{-3} \cdot 3300М = 30Ом$$

$$\frac{I_{Э}}{I_{ЭЖ}} = -\frac{30 + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu_{ЭЖ}}{30 + j \cdot 3,3 + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_{Э}} = -\frac{30 + j \cdot 314 \cdot 0,139}{33,3 + j \cdot 314 \cdot 0,139} = -\frac{30 + j \cdot 43,6}{33,3 + j \cdot 43,6} = -\frac{53}{55} = 0,96;$$

Заземлять экран с двух сторон запрещается. Необходимо применить способ транспозиции секций кабеля. Предлагается следующий алгоритм диагностики и схемы реализации

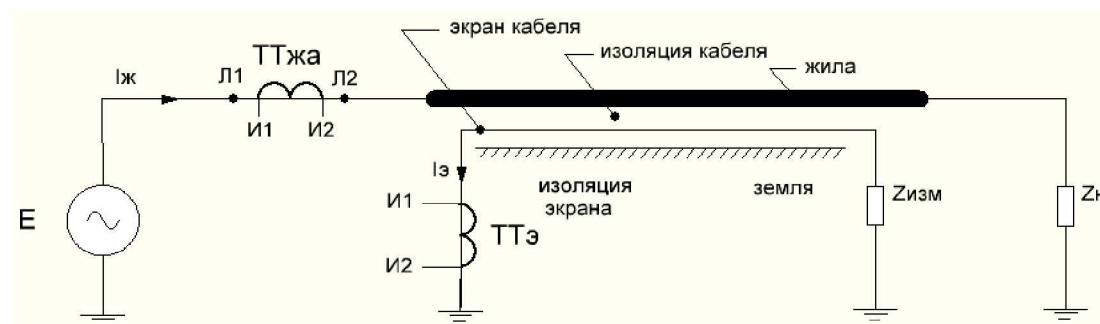


Рис. 6. Схема расположения датчиков тока и сопротивления.

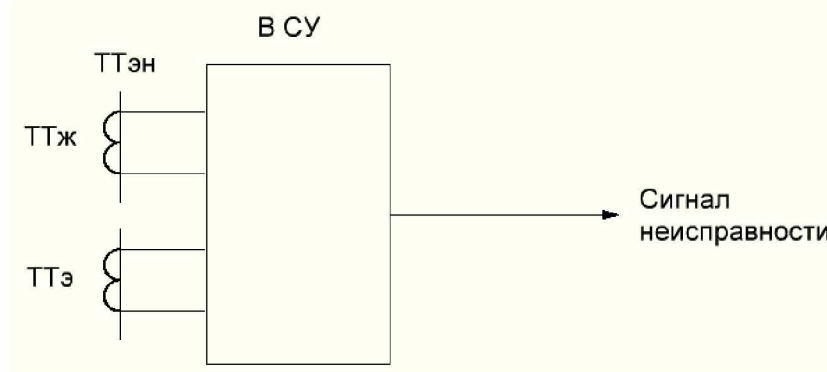


Рис. 7. Сравнивающее устройство тока, тока жилы и тока экрана.

### Принцип работы алгоритма.

В каждой фазе экрана устанавливается трансформатор тока с  $k_{ТТ} = 1/1$ . В отсоединенный конец кабеля подсоединяется резистор сопротивлением 1 кОм.

Сравниваются ток в жиле и ток в экране в зависимости от режима нагрузки:

Если соотношение этих токов изменяется, тогда компаратор перекидывается и выдает сигнал неисправности, по дисплею УРЗА читаем состояние экрана.

### Заключение.

В процессе исследования получен новый алгоритм диагностики состояния экрана кабеля. На основе алгоритма разработана схема распознавания неисправности экран однофазного силового кабеля в режиме он-лайн имеет ценное практическое значение при эксплуатации кабеля.

Методику расчета заземления экрана кабеля рекомендуется применять в практических расчетах.

### Литература.

1. ПТЭ.
2. ПУЭ.
3. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ. Расчет заземления экранов. // Новости электротехники, №2 (44), 2007
4. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В. Однофазные кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет заземления экранов // Новости электротехники, № 5 (47), 2008

УДК.:62-784.4:658.26:621.362

## СХЕМЫ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЭЦ И ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Гиниятуллина А. М., Кадыров И.Ш.  
КГТУ им. И. Раззакова;  
E-mail: almirag@mail333.com,*

## MODERN SCHEMES OF COAL PULVERIZATION AND WAYS OF TECHNOLOGICAL-PROCESS AUTOMATION ON GENERATION OF HEAT AND ELECTRICAL ENERGY

**A. Giniatullina, Kadyrov I. Sh.**  
Kyrgyz State Technical University named I.Razzakov  
E-mail: almirag@mail333.con,

*В статье дается описание технологического процесса выработки тепловой и электрической энергии и определены пути для его автоматизации.*

*This article describes the technological process of heat and electrical energy and the ways for its automation.*

**Введение.** Одной из предпосылок автоматизации котлов ТЭЦ является рациональное управление технологическими параметрами оборудования с использованием передовой технологии управляющих устройств, отвечающей современным стандартам по безопасности и энергосбережению. Исходными данными при построении новых схем управления котлом по-прежнему является изменение подачи топлива во всем диапазоне нагрузок без отключения и включения отдельных горелок. Из сказанного выше вытекает, что общей задачей автоматического регулирования является поддержание оптимальных условий протекания какого-либо технологического процесса без вмешательства человека.

В энергосистеме ТЭЦ такими условиями являются соответствие между электрической нагрузкой турбогенератора и производительностью котлоагрегата, поддержание давления и температуры пара в заданных пределах; экономичное сжигание топлива; соответствие производительности питательной установки нагрузке котлоагрегатов, а также поддержание стабильных значений параметров ряда вспомогательных процессов. Перечисленные выше условия выполнимы в том случае, если основной компонент производства, топливный продукт сжигания в котлоагрегатах, обладает значительным удельным тепловыделением.

Основными видами топлива, используемыми при производстве тепла и электричества, являются топливные ископаемые: угли, торф, горючие сланцы, мазут, природный газ. Вид основного топлива обычно

### **Принцип работы алгоритма.**

В каждой фазе экрана устанавливается трансформатор тока с  $k_{\text{ТТ}} = 1/1$ . В отсоединенный конец кабеля подсоединяется резистор сопротивлением 1 кОм.

Сравниваются ток в жиле и ток в экране в зависимости от режима нагрузки:

Если соотношение этих токов изменяется, тогда компаратор перекидывается и выдает сигнал неисправности, по дисплею УРЗА читаем состояние экрана.

### **Заключение.**

В процессе исследования получен новый алгоритм диагностики состояния экрана кабеля. На основе алгоритма разработана схема распознавания неисправности экран однофазного силового кабеля в режиме он-лайн имеет ценное практическое значение при эксплуатации кабеля.

Методику расчета заземления экрана кабеля рекомендуется применять в практических расчетах.

### **Литература.**

1. ПТЭ.
2. ПУЭ.
3. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ. Расчет заземления экранов. // Новости электротехники, №2 (44), 2007
4. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В. Однофазные кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет заземления экранов // Новости электротехники, № 5 (47), 2008