

УДК 681.5.09

## ПРОБЛЕМА ДИАГНОСТИКИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

**Борковский С.О., Горева Т.С., Горева Т.И.**

*Дальневосточный федеральный университет, филиал,  
Петропавловск-Камчатский, e-mail: bor@yandex.ru*

В статье рассмотрены основные эксплуатационные режимы работы нейтрали электрических сетей в России. Приведена краткая характеристика каждого из режимов, с точки зрения аварийных режимов. В частности рассматривается режим замыкания на землю фазы электрической сети и значения возникших в связи с этим токов короткого замыкания. Выделяются режимы изолированной и компенсированной нейтралей, как режимы, обладающие малыми токами замыкания на землю. При этом рассматриваются особые требования к релейной защите электрических распределительных сетей, питающих энергоустановки торфяных и нефтеразработок, предъявляемые ПУЭ. Произведен анализ основных устройств и принципов выполнения релейной защиты, в сетях с малыми токами замыкания на землю. Выделены общие недостатки, присущие всем видам устройств, такие как невозможность определить поврежденный элемент, сложности, связанные с настройкой устройств и выбором уставок срабатывания, сложности реализации некоторых типов алгоритмов работы устройств.

**Ключевые слова:** замыкание на землю, емкостной ток, нейтраль, перемежающаяся дуга, фильтр токов нулевой последовательности, селективность

## PROBLEM OF DIAGNOSTICS OF SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS TO EARTH IN NETWORKS WITH SMALL CURRENTS OF SHORT CIRCUIT TO EARTH

**Borkovskiy S.O., Goreva T.S., Goreva T.I.**

*Far Eastern Federal University, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: bor@yandex.ru*

In article the main operational operating modes of a neutral of electric networks in Russia are considered. The short characteristic of each of modes, from the point of view of emergency operation is provided. In particular the short circuit mode on the earth of a phase of an electric network and value of the currents which have arisen in this regard of short circuit is considered. Modes of the isolated and compensated neutral, as modes short circuits possessing small currents are allocated for the earth. Special requirements to relay protection of the electric distributive networks feeding power installations torfo-and the petrodevelopment, shown PUE are thus considered. The analysis of the main devices and the principles of performance of relay protection, in networks with small currents of short circuit on the earth is made. The common faults inherent in all types of devices, such as impossibility to define the damaged element, the difficulties connected with setup of devices and a choice of settings of operation, complexity of realization of some types of algorithms of operation of devices are marked out.

**Keywords:** short circuit on the earth, capacitor current, the neutral, an alternating arch, the filter of currents of zero sequence, selectivity

### Режимы работы нейтрали

В нашей стране электрические сети традиционно выполняются со следующими режимами работы нейтрали:

а) глухозаземленная нейтраль – когда нейтраль непосредственно соединена с заземляющим устройством. К таким сетям относятся сети напряжением до 1 кВ и выше 110 кВ;

б) эффективно заземленная нейтраль – это электрическая сеть, в которой коэффициент замыкания на землю (ЗНЗ) не превышает 1,4. Коэффициент замыкания на землю в трехфазной электрической сети – отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания [6]. Как правило, это сети напряжением 110 кВ и выше, когда с помощью разъединителей

можно заземлять или разземлять нейтраль для ограничения токов нулевой последовательности;

в) изолированная нейтраль – нейтраль трансформатора или генератора не присоединена к заземляющему устройству или соединена с ним через большое сопротивление приборов измерения и сигнализации. К сетям с изолированной нейтралью относятся распределительные сети 6–35 кВ;

г) компенсированная нейтраль – нейтраль соединяется с заземляющим устройством через дугогасящий реактор, с целью ограничения токов ЗНЗ.

Сети с изолированной и компенсированной нейтралью характеризуются весьма малыми токами ЗНЗ, которые зависят от емкости фаз относительно земли и индуктивности дугогасящего реактора. Таким образом, в сетях напряжением 6–35 кВ токи ЗНЗ не превышают 30–10 А соответственно [10].

Однофазные ЗНЗ – характерный вид повреждения в сетях 6–35 кВ. Они составляют 70–80% всех повреждений на линии. При этом стоит заметить, что общая протяженность распределительных сетей 6–35 кВ составляет более 1,5 млн км – т.е. почти 45% от общей протяженности линий электропередач 0,4–110 кВ. Поэтому вопрос диагностики и своевременного отключения однофазных ЗНЗ является особенно актуальным.

При замыкании фазы на землю линейные напряжения не изменяются. Токи в фазах изменяются очень незначительно (на 10–30 А) и потребитель в этих условиях сохраняет нормальный режим работы, т.е. отсутствуют жесткие требования по немедленному отключению поврежденной линии. Также отсутствие требований по отключению линии объясняется тем, что чувствительности существующих защит недостаточно для обеспечения селективной работы, и, как правило, отключению подвергаются неповрежденные элементы. Однако напряжения неповрежденных фаз относительно земли возрастают до линейных напряжений, т.е. в  $\sqrt{3}$  раз, что опасно для оборудования и изоляции. Кроме того, существует опасность возникновения перемежающейся дуги.

Перемежающаяся дуга – это открытая электрическая дуга, периодически угасающая и возникающая вновь. При этом на неповрежденных фазах и линиях сети возникают перенапряжения до 2,5–3 номинальных фазных напряжений:

$$U_{\text{пер}} = (2,5...3) \cdot U_{\text{ном}}. \quad (1.1)$$

Длительность такого напряжения вследствие отсутствия жестких требований к релейной защите по немедленному отключению поврежденного участка достигает десятков минут. При таком режиме весьма вероятен пробой изоляции неповрежденных фаз и возникновение двойных замыканий на землю.

Следовательно, необходимо в кратчайшие сроки выявить поврежденный элемент и с помощью сигнализации оповестить дежурный персонал о наличии аварии, чтобы он в течение допустимого времени (не более двух часов) [6] отыскал и устранил повреждение. В противном случае линию нужно отключать.

Функцию выявления ЗНЗ и поврежденного элемента возлагают на специальную защиту, действующую на сигнал. В особых случаях защита без выдержки времени действует на отключение. Согласно ПУЭ к таким сетям относятся сети 6–10 кВ, питаю-

щие торфяные, нефтеперерабатывающие электроустановки, передвижные строительные механизмы, открытые строительные площадки. В таких сетях при переходе однофазного ЗНЗ в двухфазное ЗНЗ возникают опасные для человека шаговое напряжение и напряжение прикосновения. Кроме того, возникновение перемежающейся дуги может спровоцировать пожары, что имеет особые последствия в зонах нефтепромысла и торфоразработок. Поэтому особо остро встал вопрос о создании селективной и высокочувствительной релейной защиты от однофазных ЗНЗ, пригодной для любых сетей с малыми токами ЗНЗ, решение которого до настоящего времени не удавалось никому [9].

### Виды защит от замыканий на землю

Далее рассмотрим основные виды защит, применяемые в сетях с малыми токами ЗНЗ и выделим их основные достоинства и недостатки.

**Неселективное устройство общей сигнализации** – устанавливается на шинах 6–35 кВ ПС или на шинах генераторного напряжения электростанций. Данное устройство подключается к трансформаторам напряжения типа НАМИ-10 (трансформатор напряжения анизотропный, масляный, измерительный) к обмотке, соединенной в разомкнутый треугольник (рис. 1).

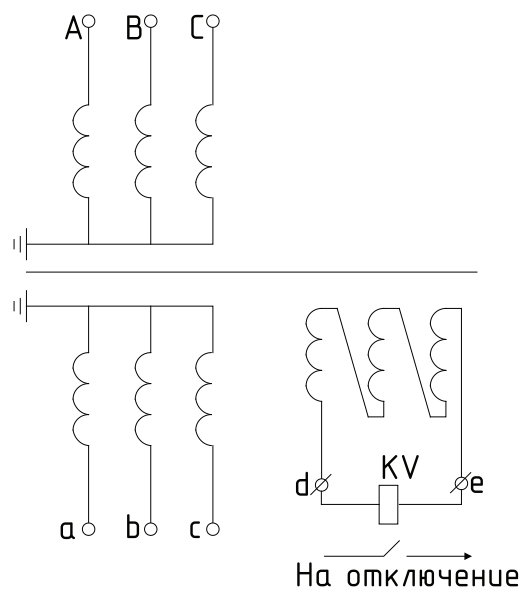


Рис. 1. Схема подключения устройства неселективной сигнализации

В нормальном режиме напряжение  $U_{de} = 0$  В, а при замыкании на землю  $U_{de} = U_A + U_B + U_C = 3U_0$ . В качестве реле KV в устройстве применяется реле

напряжения типа РН-53/60Д. Следует отметить, что согласно [4] при эксплуатации данного типа защит наблюдалось возгорание реле напряжения вследствие возникновения феррорезонансных процессов, связанных с ЗНЗ, перегоранием предохранителей, обрывов проводов.

Однако данный тип защит нашел широкое применение из-за простоты и высокой чувствительности.

**Недостаток** данного типа защит – не селективность – невозможность определить присоединение в сети 6–35 кВ, на котором произошло ЗНЗ.

#### Токовая защита нулевой последовательности, ненаправленная

Согласно распределению токов нулевой последовательности в сложной сети можно определить токи в линии при замыкании на ней и при внешнем замыкании на землю.

По неповрежденным линиям протекают токи, обусловленные емкостями фаз этих линий относительно земли:

$$3I_{0\text{неповр.лин}}^{(1)} = 3I_{0\text{л}}^{(1)} = j \cdot \omega \cdot C_{0\text{л}} \cdot U_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где  $C_{0\text{л}}$  – емкость фазы линии относительно земли.

Если линия повреждена, то по ней будет протекать ток, представляющий собой сумму емкостных токов всех неповрежденных линий, зависящий от суммарной емкости этих линий:

$$3I_{0\text{повр.лин}}^{(1)} = 3I_{0\text{экр}}^{(1)} = j \cdot \omega \cdot C_{0\text{экр}} \cdot U_{\text{ф}}, \quad (2)$$

где  $C_{0\text{экр}} = \sum_{i=1}^n C_{0\text{ли}i}$  – эквивалентная емкость фазы относительно земли всех неповрежденных линий;  $I_{0\text{экр}}^{(1)} = \sum_{i=1}^n I_{0\text{ли}i}^{(1)}$  – эквивалентный емкостной ток неповрежденных линий;  $n$  – число неповрежденных линий.

В связи с этим токовая защита нулевой последовательности, реагирующая на установившиеся токи, должна быть отстроена по току срабатывания от емкостных токов защищаемой линии, т.е.

$$I_{\text{сз}} = K_{\text{отс}} \cdot 3I_{0\text{л}}^{(1)}. \quad (3)$$

При этом должно быть достаточное количество отходящих линий, обеспечивающих необходимую чувствительность, так чтобы выполнялось условие

$$\begin{aligned} C_{0\text{экр}} &>> C_{0\text{л}}; \\ I_{0\text{экр}}^{(1)} &>> I_{0\text{л}}^{(1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Дело в том, что для того, чтобы отстроиться от переходных бросков емкостного тока, возникающих при различных коммутациях, в формулу (3) вводят коэффициент

отстройки, равный для защит без выдержки времени  $K_{\text{отс}} = 4-5$  и для защит с выдержкой времени  $K_{\text{отс}} = 2,0-2,5$ . Тогда в наихудшем случае коэффициент чувствительности, вычисляемый по формуле (5),

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{0\text{экр}}^{(1)}}{K_{\text{отс}} \cdot I_{0\text{л}}^{(1)}}, \quad (5)$$

может быть меньше, чем требуемое значение  $K_{\text{ч}} \geq 1,5$ , поскольку известно, что эквивалентная емкость и эквивалентный емкостной ток системы связан с емкостью и емкостным током защищаемого присоединения соотношением

$$\begin{aligned} C_{0\text{экр}} &>> (6...6,5) \cdot C_{0\text{л}}; \\ I_{0\text{экр}}^{(1)} &>> (6...6,5) \cdot I_{0\text{л}}^{(1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поэтому практически должно быть не менее 8–10 отходящих линий, питающихся от сборных шин, чтобы обеспечить требуемую чувствительность. К тому же токовые защиты нулевой последовательности не могут обеспечить селективность в сетях с непостоянной первичной схемой, в которых наблюдается периодическое изменение емкости фаз относительно земли. К таким сетям относятся системы электроснабжения передвижных строительных площадок, протяженность которых меняется с течением времени.

Схема выполнения защиты нулевой последовательности представлена на рис. 2.

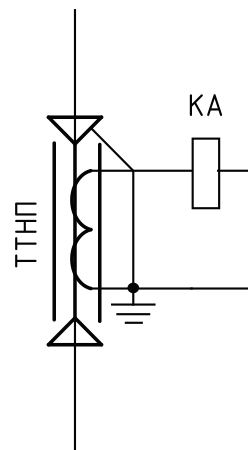


Рис. 2. Схема выполнения защиты нулевой последовательности

Реле, реагирующее на ток нулевой последовательности, подключается к однотрансформаторному фильтру токов нулевой последовательности ТТНП типа ТЛМЗ-1. Чаще всего в качестве реле КА выступает реле тока РТ-40/0,2 или более современное РТЗ-51.

Для исключения ложного срабатывания от емкостных токов, проходящих по оболочке неповрежденного кабеля при внешнем КЗ, воронка кабеля изолируется от земли, а заземляющий провод пропускается через отверстие ТТНП. В связи с этим применение таких трансформаторов тока затруднительно в воздушных линиях из-за необходимости использования кабельных вставок. К тому же значения емкостных токов в воздушных сетях невелики и возникают определенные сложности с устойчивостью срабатывания реле тока РТ-40 при малых токах.

#### **Направленная токовая защита нулевой последовательности**

Направленные токовые защиты, реагирующие на установившиеся токи, применяются в тех случаях, когда количество отходящих линий мало и нельзя обеспечить требуемую чувствительность. В направленных защитах дополнительно используется реле направления мощности, включаемое на напряжения и токи нулевой последовательности. Это реле срабатывает только в положительном направлении мощности – т.е. от сборных шин в линию, поэтому нет необходимости в отстройке от тока  $3I_{0л}^{(1)}$  по условию (3), т.к. он протекает в другом направлении. В этом случае достаточно отстроиться только от тока небаланса фильтра нулевой последовательности.

Наибольшее распространение получила защита ЗЗП-1, которая устанавливается в сетях с изолированной нейтралью.

Недостатком данного типа защиты является необходимость использования кабельных вставок, что существенно ограничивает его применение, а также излишнее срабатывание защиты при возникновении перемежающейся дуги и отсутствие четкой методики по определению уставок срабатывания.

#### **Защиты, реагирующие на переходное значение тока нулевой последовательности**

Такие защиты применяются в тех случаях, когда нейтраль компенсирована и токи ЗНЗ менее 5 А. В этом случае ток срабатывания защиты выбирается по условию отстройки от переходного тока ЗНЗ.

$$I_{сз}^{(1)пер} = K_{отс} \cdot 3I_{0л}^{(1)пер}, \quad (7)$$

где  $K_{отс} = 2,0-2,5$  – коэффициент отстройки.

Наибольшее распространение получили автономные устройства направленной волновой защиты ИЗС и УЗС-01 [7]. Устройство ИЗС состоит из пускового органа, реагирующего на появление напряжений нулевой последовательности,

органа направления тока, блока питания и указательного реле.

Особенностью таких защит является кратковременность появления переходного тока ЗНЗ. Это время составляет 0,1–0,2 секунды, поэтому защиты, реагирующие на переходные токи, должны обладать устройством фиксации срабатывания.

Недостатком таких защит является сложность реализации и выявления факта излишнего срабатывания при перемежающихся дуговых замыканиях, а достоинством – возможность зафиксировать даже кратковременное замыкание, что обеспечивает профилактическую проверку изоляции и позволяет выявить места ее ослабления, чтобы произвести своевременный ремонт и предотвратить последующее замыкание.

#### **Использование наложенного тока высокой частоты**

Этот способ предполагает наличие генератора ВЧ-сигнала, который обычно через емкостной делитель связан с фазами контролируемой линии. Генератор посылает высокочастотный сигнал по фазам и контролирует время возврата отраженного сигнала. Если возврата сигнала нет, то произошло замыкание одной фазы на землю, и защита срабатывает. При этом фиксируется расстояние до места пробоя по сопротивлению петли, на которую включен генератор – от места подключения до места замыкания и снова через землю на генератор.

Применение такого принципа затруднительно в сложных разветвленных сетях, создающих сильное рассеивание сигнала и требующее генератора большой мощности.

#### **Фиксация гармонических составляющих в токе нулевой последовательности**

При замыкании фазы на землю сигналы, т.е. токи нулевой последовательности являются несинусоидальными и в переходных режимах содержат в себе высшие гармонические составляющие: 100 Гц и выше. Выделяя эти составляющие через частотные фильтры, можно зафиксировать ЗНЗ с очень высокой чувствительностью, что особенно важно в сетях с компенсированной нейтралью.

Недостатком таких защит является излишнее срабатывание, которое является следствием неправильного выбора уставок защиты, зависящих от ряда факторов, изменяющихся в течение эксплуатации. К тому же процесс отыскания поврежденного присоединения занимает много времени, поэтому, согласно [1] его следует автоматизировать.

В настоящее время разработаны устройства, реагирующие на гармонические составляющие в токе нулевой



последовательности. Это устройства типов УСЗ-2/2 – индивидуальное устройство, подключаемое к ТТНП кабельного типа,

и УСЗ-3М – групповое устройство, поочередно подключаемое к ТТНП каждого присоединения (рис. 3).

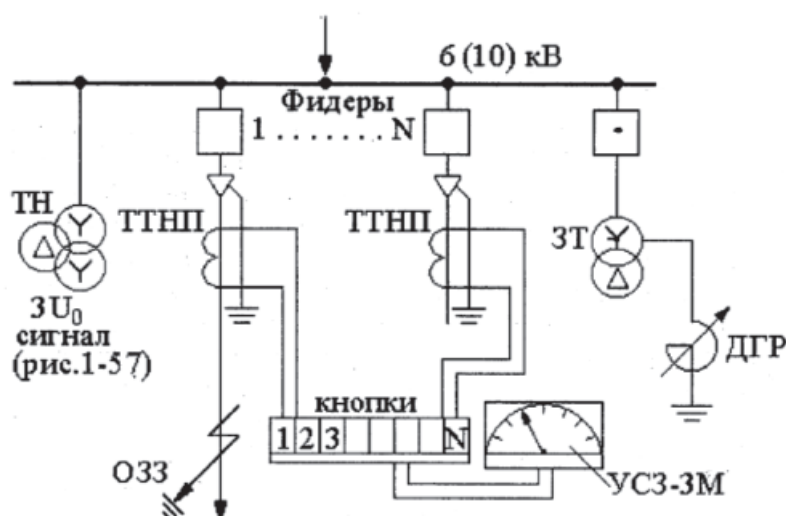


Рис. 3. Схема включения прибора УСЗ-3М

Работа устройства УСЗ-3М основана на измерении суммы высших гармонических составляющих в токе ЗНЗ (от 150 до 650 Гц) [9]. Однако более чем сорокалетний опыт использования данного устройства выявил ряд существенных недостатков:

- 1) неселективное срабатывание при дуговых ЗНЗ;
- 2) непригодность устройства УСЗ-3М для использования в сложных сетях с параллельными линиями;
- 3) невозможность фиксации кратковременных ЗНЗ;
- 4) необходимость выезда персонала на подстанцию для проведения большого числа измерений с целью определения поврежденного присоединения.

В настоящее время применяются микропроцессорные устройства SPAC 801-013, SPAC 801-113, ООО «АББ Реле-Чебоксары» [5], «Сириус», выпускаемые НПФ «Радиус» [8] и их зарубежные аналоги – SEPAM фирмы Schneider Electric. Эти устройства выполняют относительный замер высших гармоник, на основании которого способны срабатывать не только при ЗНЗ, но и при междуфазных замыканиях. При этом всем микропроцессорным устройствам как отечественного, так и зарубежного производства присущи следующие недостатки:

- 1) высокая стоимость устройств;
- 2) сложности, с выбором уставок срабатывания ввиду отсутствия однозначной методики.

Таким образом, указанные недостатки защит, реагирующих на гармонические составляющие в токе нулевой последовательности, создают препятствия для их широкого применения.

#### Общие итоги

Таким образом, анализируя имеющиеся типы устройств защиты от замыканий на землю в сетях с малыми токами ЗНЗ, можно выделить следующие типы недостатков, присущие данным устройствам. Это неселективная работа защиты, трудности по отысканию поврежденного присоединения в разветвленных сетях, излишнее срабатывание при возникновении дуговых ЗНЗ вне зоны действия защиты, сложность реализации некоторых типов защит, отсутствие однозначных методик определения уставок срабатывания и высокая стоимость микропроцессорных терминалов.

Поэтому наиболее актуальной в сложившейся ситуации является разработка устройства, не связанного с использованием трансформаторных фильтров токов нулевой последовательности. Перспективным направлением является применение алгоритмов вейвлет-анализа выделения гармонических составляющих тока и напряжения сети [2, 3], позволяющие использовать его для защиты сетей как с изолированной, так и компенсированной нейтралью, а также для защиты высоковольтных электродвигателей.

**Список литературы**

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2007. – 639 с.: ил.
2. Горева Т.С., Кузнецов С.Е., Портнягин Н.Н., Горева Т.И. Анализатор импульсных и флуктуационные помех случайного характера в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлет базисе: Свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16624. – М.: ИНИМ РАО, 2011.
3. Горева Т.С., Портнягин Н.Н. Методы построения активных фильтров подавления импульсных помех в сетях электропитания промышленных судов: монография). – М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2010. – 102 с.
4. Журнал «Энергетик». – 1995. – № 6.
5. Комплектное устройство защиты и автоматки линий 6–10 кВ СПАС 801-013. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 2000.
6. Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд.
7. Попов И.Н., Соколова Г. Н., Махнев В.И. Импульсная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС // Электрические станции. – 1978. – № 4. – С. 69–73
8. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-2-Л». ЗАО «РАДИУС Автоматика». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. – М., 2002.
9. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматки распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с., ил.
10. Шабад М.А. Максимальная токовая защита. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 96 с., ил.
11. Makhanoshin et al, Benefits of integrated information, geographical and asset management system for poer utility networks. CIGRE 2006, report B2/D2-109.

**References**

1. Andreyev V.A. Relay protection and automatic equipment of systems of power supply: The textbook for higher education institutions. 5th prod. I erased. M.: Vyssh. shk. 2007. 639 p.: silt.
2. Goreva T.S. Kuznetsov of Page E. Portnyagin N.N., Goreva T.I. certificate on branch registration of a complex of the

computer programs No. 16624: «The analyzer pulse and fluctuation hindrances of casual character in power supply systems with identification structural a component in orthogonal вейвлет basis» / М.: INIM of Russian joint stock company, 2011.

3. Goreva T.S. Portnyagin N. N. Methods of creation of active filters of suppression of pulse hindrances in networks of power supply of harvesting vessels. (monograph). M.: Natural Sciences Academy publishing house, 2010 102 p.
4. Energetik magazine, 1995, no. 6
5. Complete device of protection and automatic equipment of lines of 6-10 kV of SPAC 801-013. Technical specification and maintenance instruction, 2000.
6. Rules of the device of the PUE electroinstallations, seventh edition.
7. Popov I.N. Sokolova G. N., Makhnev V. I. Pulse protection of electric networks against short circuits on the earth like IZS//Electric станции.1978. no. 4. pp. 69–73.
8. Device of microprocessor protection of «Sirius-2-l». JSC RADIOUS Avtomatika. Technical specification, maintenance instruction, passport. Moscow, 2002.
9. Shabad M.A. Calculations of relay protection and automatic equipment of distributive networks. 3rd prod. reslave. and additional L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-ny, 1985. 296 p., silt.
10. Shabad M.A. Maximum current protection. L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-ny, 1991. 96 p., silt.
11. Makhanoshin et al Benefits of integrated information, geographical and asset management system for poer utility networks. CIGRE 2006, report B2/D2-109.

**Рецензенты:**

Портнягин Н.Н., д.т.н., профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва;

Пюкке Г.А., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский.

Работа поступила в редакцию 15.07.2014.