

621.316

**В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО** (д-р техн.наук, проф.), **В.К. ЛЕБЕДЕВ** (канд.техн.наук, доц.),  
**Р.П. СЕРДЮКОВ**

Государственное высшее учебное заведение  
«Донецкий национальный технический университет»  
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СЕТЕЙ 6-10 КВ В РЕЖИМАХ ЗАМЫКАНИЯ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ

*Рассмотрен способ повышения надежности работы сетей с изолированной нейтралью при замыкании фазы на землю с использованием комплексного устройства низковольтного заземления нейтрали и автоматического шунтирования поврежденной фазы, с помощью которого решаются проблемы повышения чувствительности релейной защиты, ограничения перенапряжений и исключения длительных дуговых замыканий. Приведены результаты моделирования однофазного замыкания на землю при использовании предложенного способа и показаны его преимущества.*

*Электрическая сеть, дуговое замыкание, нейтраль, резистивное заземление, шунтирование фазы, ограничение перенапряжений, релейная защита, математическое моделирование.*

**Постановка задачи.** Сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью получили большое распространение в промышленности и городском хозяйстве, сельском хозяйстве и других областях. В системах электроснабжения собственных нужд электростанций от этих сетей в значительной мере зависит надежная работа и устойчивость энергоблоков ТЭС и АЭС, а также энергосистемы в целом.

В настоящее время, с целью повышения надежности работы сетей 6-10 кВ, ведутся интенсивные поиски путей решения двух главных вопросов: а) повышения чувствительности и селективности действия релейной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ); б) ограничение перенапряжений и предотвращение феррорезонансных процессов, которые могут быть причиной многоместных повреждений сети, сокращения срока службы изоляции и выхода из строя электрооборудования [1,2].

Одним из путей решения данных вопросов в настоящее время является резистивное заземление нейтралей сетей с помощью специальных присоединительных трансформаторов. Например, в сети собственных нужд 6 кВ электрических станций согласно [3] требуется заземление нейтрали сети через низкоомный стеклоэпоксидный бетэловый резистор величиной 100 Ом, установка которого увеличивает токи замыкания на землю (до 20-30 А), что обеспечивает селективную работу релейной защиты, действующей на отключение поврежденного присоединения. Однако к недостаткам низкоомных бетэловых резисторов относятся громоздкость конструкции и ограниченная термическая стойкость, что не позволило широко их использовать в системах электроснабжения ответственных потребителей, где защиты от ОЗЗ действуют, как правило, на сигнал. В настоящее время Новосибирским предприятием «ПНП Болид» разработаны и выпускаются высоковольтные резисторы из материала «Эком», которые имеют повышенную термостойкость и могут длительно оставаться в работе при однофазных замыканиях на землю. Однако недостатком таких резисторов является высокая стоимость, громоздкость конструкции, сложность монтажа и наладки.

Использование высокоомного резистивного заземления нейтрали сети, предлагаемое рядом авторов [4,5] для сетей с малыми емкостными токами замыкания (до 5 А), позволяет применить термически стойкие резисторы, а также эффективно снижать кратности дуговых перенапряжений при ОЗЗ и уменьшать опасность возникновения феррорезонансных явлений. Однако, при этом, вызываемый высокоомным резистором активный ток не всегда оказывается достаточным для селективной работы простых ненаправленных токовых защит, действующих на сигнал или на отключение. Кроме того, при действии защиты только на сигнал возможны длительные дуговые замыкания.

Для обеспечения высокой чувствительности и селективности действия защит при ОЗЗ в [6] предлагается после замыкания фазы на землю осуществлять кратковременное низкоомное индуктивное заземление нейтрали сети, что обеспечивает срабатывание указателей тока КЗ и последующие оперативное обнаружение и отключение поврежденного присоединения. Однако до отключения поврежденного присоединения сеть испытывает перенапряжения и остается вероятность многоместных повреждений изоляции при неустойчивом горении заземляющей дуги из-за возникающих при этом значительных перенапряжений.

Таким образом, как справедливо отмечается многими авторами [1,5,6], до сих пор вопрос оптимального режима работы нейтралей сетей 6-35 кВ остается открытым и дискуссионным, так как ни один из рассмотренных способов не решает всех проблем в целом и в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода к решению данного вопроса. Это в полной мере характерно, например, для сетей собственных нужд 6 кВ блочных электростанций. В различных режимах работы блока емкостные токи при ОЗЗ

могут меняться в очень широких пределах, поэтому добиться требуемой чувствительности и селективности работы простых токовых защит во всех случаях становится невозможным. Например, для сети собственных нужд блока 300 МВт даже в максимальном режиме работы коэффициенты чувствительности защиты от *ОЗЗ* удаленных присоединений «насосы градирен» и «багерные насосы» могут составлять соответственно 0,8 и 0,6, что не обеспечивает работу защит от *ОЗЗ*. Это вызвано тем, что отстройка уставок защиты от больших переходных собственных емкостных токов этих присоединений при внешних замыканиях не обеспечивает работу защиты при замыканиях на землю на этих присоединениях.

Целью данной работы является разработка способа повышения надежности электроснабжения сетей 6-10 кВ, позволяющего решать рассмотренные проблемы при *ОЗЗ* в сети. Объектом исследования являются процессы в сетях с изолированной нейтралью, а предметом – переходные процессы при *ОЗЗ* и способы минимизации их влияния на надежность работы сетей.

**Результаты исследований.** В работе предложено комплексное решение данной проблемы, обеспечивающей как повышение чувствительности релейной защиты от *ОЗЗ* и ограничения перенапряжений [7], так и исключения длительных дуговых замыканий при действии защит на сигнал, а не на отключение [8]. Для реализации этого комплексного решения предложено устройство (рис.1), состоящее из присоединительного трансформатора *ПТ*, первичная обмотка которого соединена в звезду с заземленным нулевым выводом и подключена к сети 6-10 кВ. Вторичная обмотка *ПТ* напряжением 0,4 кВ соединена в разомкнутый треугольник и к ней через силовые контакты контактора *КМО* подключен низковольтный резистор  $R_H$ , рассчитанный на кратковременное (до 5-10 с) протекание тока, превышающего собственный емкостной ток сети и обеспечивающий заданную чувствительность защит от *ОЗЗ* в различных минимальных режимах работы сети. К выводам обмотки высшего напряжения *ПТ* подключены три однофазных контактора *КМА*, *КМВ*, *КМС* (или трехфазный с пофазным управлением), вторичные выводы которых соединены с землей. Управление этими контакторами производится с помощью схемы управления, которая выявляет на какой фазе произошло замыкание на землю и через заданное время подает команду на включение контакторов соответствующей фазы *КМА*, *КМВ* или *КМС*, благодаря чему дуговое замыкание на землю переводится в глухое. В таком состоянии контактор будет находиться в течении времени, необходимого для выявления поврежденного присоединения и принятия мер по его поиску и отключению. В течении времени от момента появления замыкания на землю в сети до включения шунтирующего контактора ток в месте повреждения будет состоять из емкостного тока сети и активного тока присоединительного трансформатора *ПТ*. В этот промежуток времени до включения контактора *КМ* защита от *ОЗЗ* отходящих присоединений будет надежно срабатывать и отключать выключатель поврежденного присоединения. Если же принято, что в данной сети защита от *ОЗЗ* действует на сигнал, то тогда будет включен соответствующий контактор до принятия мер эксплуатационным персоналом. После включения шунтирующего контактора подается команда на размыкание силовых контактов контактора *КМО* в цепи резистора и активный ток подпитки места замыкания от *ПТ* будет равен току холостого хода последнего, т.е. близок к нулю. Параметры присоединительного трансформатора *ПТ* и величина резистора  $R_H$  в цепи обмотки низшего напряжения выбираются исходя из двух условий: а) из условия обеспечения требуемого коэффициента чувствительности токовых реле отходящих присоединений; б) создания дополнительного активного тока трансформатора *ПТ*, превышающего максимальное значение собственного емкостного тока для обеспечения разряда емкостей сети за время не более 0,01 с, что позволяет ограничить уровни максимальных перенапряжений в сети до величины не более  $2,1 U_\phi$  и препятствовать возникновению феррорезонансных процессов.

Схема управления (рис.1) устройства резистивного заземления нейтрали сети работает следующим образом. В нормальном режиме реле контроля фазных напряжений *KVA*, *KVB*, *KVC*, подключенные к выводам обмоток низшего напряжения *ПТ*, находятся в сработанном состоянии и их контакты разомкнуты. Напряжение нулевой последовательности отсутствует и реле напряжения *KV0*, промежуточные реле *KLA*, *KLB* и *KLC* находятся в несработанном состоянии, блок-контакты шунтирующих контакторов *КМА*, *КМВ* и *КМС* замкнуты. При замыкании в сети 6 кВ, например, фазы *A* на землю, срабатывают реле *KV0* и промежуточное реле *KLA*, которое запускает реле времени *KT1*. По истечении заданного времени реле *KT1* замыкает свой контакт и подает напряжение на катушку включения *КМА* шунтирующего контактора фазы *A*, который включается и переводит дуговое замыкание на этой фазе в глухое, что предотвращает развитие феррорезонансных процессов и появление значительных импульсных перенапряжений в сети. Через размыкаемый блок-контакт *КМА* отключается напряжение с катушки промежуточного реле *KLO*, контакты которого отпадают с выдержкой времени и снимают напряжение с катушки контактора *КМО*, что приводит к размыканию силового контакта *КМО* в цепи низковольтного резистора  $R_H$ , обеспечивая его термостойкость при длительном *ОЗЗ*. Аналогично схема работает и при замыкании на землю фазы *B* или *C*.

Кроме стандартных защит на присоединительном трансформаторе *ПТ* (токовая отсечка, МТЗ) предусмотрены также максимальные токовые защиты, предотвращающие длительное протекание тока через резистор  $R_H$  в случае отказа в отключении контактора *КМО*. Эти защиты действуют на отключение выключателя *Q* и выполнены на реле тока *KA1*, *KA2* и реле времени *KT2*, уставка которого на ступень больше, чем у реле *KT1*. С целью предотвращения одновременного включения нескольких контакторов (*КМА*, *КМВ*, *КМС*), в схеме предусмотрены взаимные блокировки по цепям их включения с помощью промежуточных реле *KLA*, *KLB*, *KLC*.

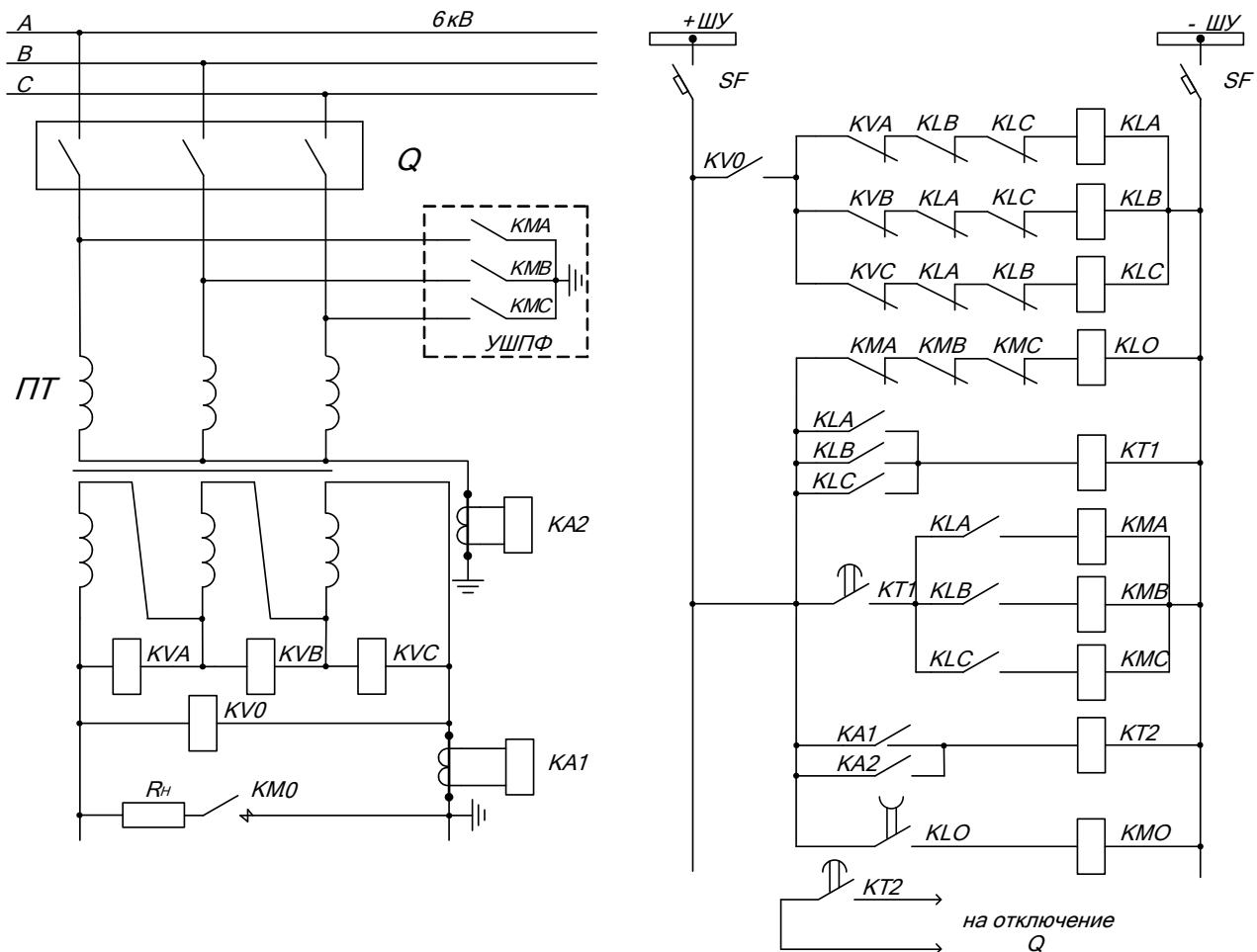


Рисунок 1 – Принципиальная схема управления резистивным заземлением и шунтированием поврежденной фазы при ОЗЗ:

$KVA$ ,  $KVB$ ,  $KVC$  – реле контроля фазных напряжений;  $KVO$  – реле контроля напряжения нулевой последовательности;  $KT1$ ,  $KT2$  – реле времени;  $KLA$ ,  $KLB$ ,  $KLC$  – промежуточные реле;  $KA1$ ,  $KA2$  – токовые реле;  $KMO$  – контактор для отключения резистора  $R_n$ ;  $KMA$ ,  $KMB$ ,  $KMC$  – контакторы шунтирования поврежденной фазы при ОЗЗ;  $KLO$  – промежуточное реле с задержкой на отпадание.

Эффективность использования схем с применением низковольтного резистора подтверждена опытом эксплуатации в промышленных условиях [5] и обладает определенными преимуществами перед использованием высоковольтных резисторов (низкая стоимость, небольшие габариты, возможность установки как внутри так и вне помещений, возможность осуществления коммутаций резисторов низковольтными аппаратами). При этом использовались блоки резисторов типа ЯС (с проволочными или ленточными резистивными элементами), которые сертифицированы и выпускаются промышленностью для работы в цепях переменного тока напряжением до 660 В и частотой 50-60 Гц.

Функционирование системы резистивного заземления нейтрали сети и автоматического шунтирования повреждения (СРЗ и АШП) представлено на рис.2 и рис.3 по результатам расчетов с помощью математической модели, описанной в [5]. Из рис.2 видно, что при возникновении замыкания фазы на землю через дугу уровень перенапряжений не превышает  $2,1 U_\phi$ , а ток в месте замыкания, при переходе дугового замыкания в глухое, составляет 34 А, что достаточно для надежного срабатывания защиты от ОЗЗ. По истечению заданной выдержки времени ( $t = 0,074$  с) происходит отключение резистора  $R_n$  и ток ОЗЗ снижается до величины емкостного тока сети (3,5 А). При моделировании сети не оснащенной СРЗ и АШП (рис.3) повторные дуговые замыкания, до момента перехода дугового замыкания в глухое ( $t = 0,04$  с), сопровождаются перенапряжениями, достигающими  $4,0 U_\phi$ , что может привести к возникновению междуфазных замыканий, а после перехода дугового замыкания в глухое ток ОЗЗ может быть недостаточен для срабатывания защиты.

Таким образом, основные преимущества предложенной системы резистивного заземления нейтрали сети СРЗ и АШП заключаются в следующем: а) уровни перенапряжений ограничиваются до  $2,1 U_\phi$ ; б) применяются малогабаритные, имеющие низкую стоимость низковольтные резисторы с термической

стойкостью несколько секунд вместо резисторов, рассчитанных на длительное протекание тока 2 – 4 часа; в) обеспечивается надежное срабатывание защит при *ОЗЗ* на всех присоединениях и для всех режимов работы системы электроснабжения (пуски, остановки, нормальный режим блока), так как уставка срабатывания по току выбирается по активному току *ПТ*; г) практически полностью исключаются длительные дуговые замыкания в сети и их негативные воздействия, так как они могут возникать только в начальное время возникновения *ОЗЗ* до включения шунтирующего контактора; д) мощность *ПТ* может быть выбрана значительно ниже применяемой при высоковольтном резисторе, так как он выбирается по току *ОЗЗ*, протекающему только до отключения резистора; е) возможно использование размыкаемых трансформаторов тока *ТНП* при малых емкостных токах сети.

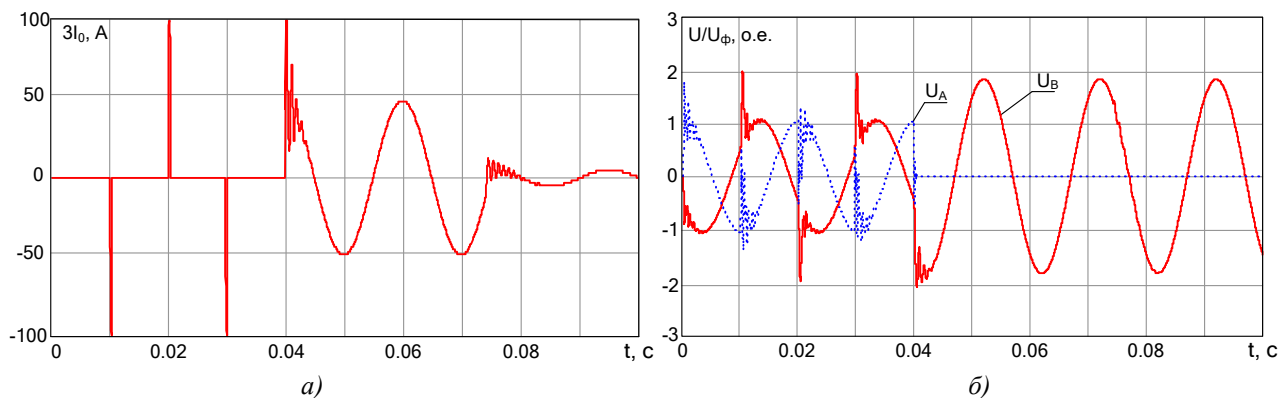


Рисунок 2 – Осциллограмма замыкания фазы *A* на землю в сети 6 кВ при резистивном заземлении нейтрали: а) изменение тока в месте *ОЗЗ*; б) изменение мгновенных напряжений в поврежденной ( $U_A$ ) и неповрежденной ( $U_B$ ) фазах

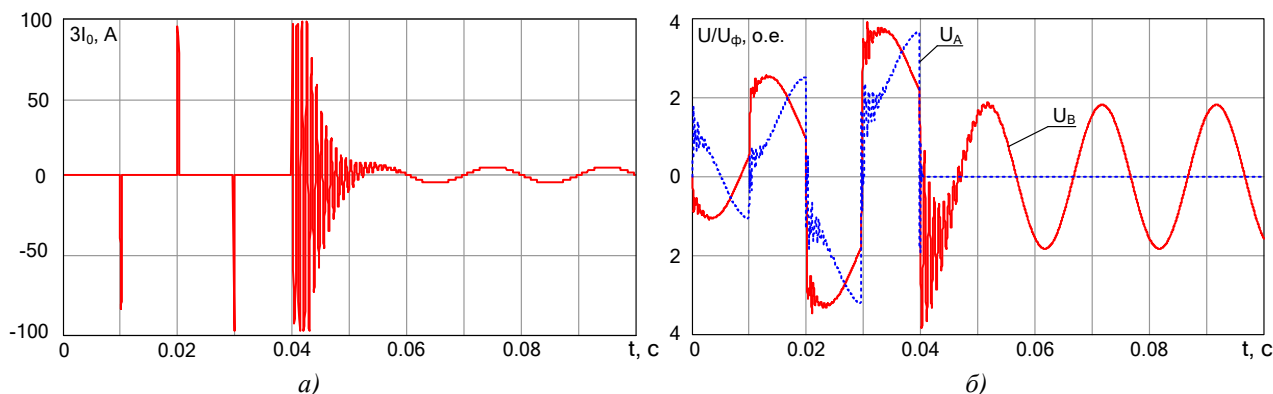


Рисунок 3 – Осциллограмма замыкания фазы *A* на землю в сети 6 кВ при изолированной нейтрали: а) изменение тока в месте *ОЗЗ*; б) изменение мгновенных напряжений в поврежденной ( $U_A$ ) и неповрежденной ( $U_B$ ) фазах

### Выводы.

1. Предложен способ повышения надежности работы сетей с изолированной нейтралью напряжением 6 – 10 кВ при замыканиях фазы на землю с использованием низковольтного резистивного заземления нейтрали сети и шунтирования поврежденной фазы, который комплексно решает проблему ограничения перенапряжений и повышения чувствительности релейной защиты от замыканий на землю.

2. Разработано устройство реализации предлагаемого способа, схема его защиты и управления, которые исключают длительные дуговые замыкания на землю и не требуют установки высоковольтного термостойкого резистора.

3. Результаты моделирования и опыт эксплуатации элементов *СРЗ* и *АШП* подтверждают положительные свойства предлагаемого устройства ограничения перенапряжений и повышения чувствительности релейной защиты от *ОЗЗ* в сетях 6 – 10 кВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. О необходимости изменений режимов нейтрали в сетях 3-35кВ / [Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. и др.] // Энергетика и Электрификация. – 2001. – №4. – С. 27-29.

2. О регламентации вариантов заземления нейтрали электрических сетей 3-35 кВ / [Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. и др.] // Энергетика и Электрификация. – 2001. – №11. – С. 28-31.

3. Циркуляр Ц-01-88. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС. – М., 1988. – 7 с.
4. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10кВ / Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. // Электричество. – 1998. – №12. – С. 8-22.
5. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю / [Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Ковязин А.В., Сердюков Р.П. и др.] // Сб. научн. тр. ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – Вып. 9(158). – Донецк: ДонНТУ, 2009. – С. 211-220.
6. Кужеков С.Л. Предотвращение многоместных повреждений кабельных линий 6 – 10 кВ с помощью кратковременного низкоомного индуктивного заземления нейтрали / Кужеков С.Л., Хнычев В.А. – М.: Новости электротехники, 2010. – №2(62). – Режим доступа до журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2010/63/13.php>
7. Сивокобыленко В.Ф. Ограничение перенапряжений и повышение чувствительности защит от замыканий на землю в сети собственных нужд 6 кВ электростанций / Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Сердюков Р.П. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2010 – С. 59-62.
8. Сивокобыленко В.Ф. Повышение надежности работы электрических сетей с резистивно-заземленной нейтралью / Сивокобыленко В.Ф., Дергилев М.П., Лебедев В.К. // Сб. научн. тр. ПГТУ. – Вып. 15. – Ч.2. – Мариуполь: ПГТУ, 2005 – С. 20-24.

Надійшла до редколегії 05.04.2011

Рецензент: І.В.Жежеленко

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО, В.К. ЛЕБЕДЕСВ,  
Р.П.СЕРДЮКОВ  
Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»

V. SIVOKOBYLENKO, V. LEBEDYEV,  
R. SERDJUKOV  
State Institution of Higher Education  
«Donetsk National Technical University»

**Підвищення надійності роботи мереж 6-10 кВ у режимах замикання фази на землю.** Розглянуто спосіб підвищення надійності роботи мереж з ізольованою нейтралью при замиканні фази на землю з використанням комплексного пристрою низьковольтного заземлення нейтралі та автоматичного шунтування uszkodженої фази, за допомогою якого вирішуються проблеми підвищення чутливості релейного захисту, обмеження перенапруг і виключення тривалих дугових замикань. Наведено результати моделювання однофазного замикання на землю при використанні запропонованого способу та показані його переваги.

**Електрична мережа, дугове замикання, нейтраль, резистивне заземлення, шунтування фази, обмеження перенапруг, релейний захист, математичне моделювання.**

**Increase of Reliability of Work of Networks 6-10 kV at the Phase-to-Ground Faults.** It is considered the way to increase reliability of work of the networks with isolated neutral at phase-to-ground fault with use of the complex device of low-voltage grounding of a neutral and automatic shunting of the damaged phase. These means help to increase sensitivity of relay protection, restrict over voltages and delete prolonged arc short circuits. Results of modelling of single-phase ground fault at use of the offered way are given and advantages of specified way are shown.

**Electric network, arc ground fault, neutral, resistive grounding, phase shunting, restriction of over voltage, relay protection, mathematical modelling.**