

14. *Matveev A.D.* Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – V. 158, № 1. – Art. 012067. – P. 1–9.
15. *Матвеев А.Д.* Анализ прочности конструкций с учетом погрешности для напряжений. – Деп. в ВИНТИ № 923-В2005. – 14 с.
7. *Zenkevich O.* Metod konechnyh jelementov v tehnikе. – М.: Mir, 1975. – 542 s.
8. *Golovanov A.I., Tjuleneva O.I., Shigabutdinov A.F.* Metod konechnyh jelementov v statike i dinamike tonkostennyh konstrukcij. – М.: FIZMATLIT, 2006. – 392 s.
9. *Gallager R.* Metod konechnyh jelementov. Osnovy. – М.: Mir, 1984. – 430 s.
10. *Oden Dzh.* Konechnye jelementy v nelinejnoj mehanike sploshnyh sred. – М.: Mir, 1976. – 464 s.
11. *Streng G., Fiks Dzh.* Teorija metoda konechnyh jelementov. – М.: Mir, 1977. – 351 s.
12. *Matveev A.D.* Metod mnogosetochnyh konechnyh jelementov v raschetah trehmernyh odnorodnyh i kompozitnyh tel // Uchenye zapiski Kazan. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki. – 2016. – T. 158, Kn. 4. – S. 530–543.
13. *Matveev A.D.* Metod mnogosetochnyh konechnyh jelementov v raschetah kompozitnyh plastin i balok // Vestn. KrasGAU. – 2016. – № 12. – S. 93–100.
14. *Matveev A.D.* Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – V. 158, № 1. – Art. 012067. – P. 1–9.
15. *Matveev A.D.* Analiz prochnosti konstrukcij s uchetom pogreshnosti dlja naprjazhenij. – Dep. v VINITI № 923-V2005. – 14 s.

Literatura

1. *Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V.* Spravochnik po soprotivleniyu materialov. – Kiev: Nauk. dumka, 1975. – 704 s.
2. *Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B.* Raschet na prochnost' detalej mashin. – М.: Mashinostroenie, 1993. – 640 s.
3. *Moskvichev V.V.* Osnovy konstrukcionnoj prochnosti tehniceskikh sistem i inzhenernyh sooruzhenij. – Hovosibirsk: Nauka, 2002. – 106 s.
4. *Doronin S.V., Lepihin A.M., Moskvichev V.V.* [i dr.]. Modelirovanie prochnosti i razrushenija nesushhih konstrukcij tehniceskikh sistem. – Hovosibirsk: Nauka, 2005. – 249 s.
5. *Samul' V.I.* Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. – М.: Vyssh. shk., 1982. – 264 s.
6. *Norri D., Friz Zh. de.* Vvedenie v metod konechnyh jelementov. – М.: Mir, 1981. – 304 s.



УДК 621.3

*М.А. Спиричев, Н.М. Попов,
Д.М. Олин*

О НЕОБХОДИМОСТИ ОТКЛЮЧАТЬ ДВОЙНЫЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ БЕЗ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ

*М.А. Spirichev, N.M. Popov,
D.M. Olin*

ABOUT THE NEED TO DISCONNECT DOUBLE EARTH FAULTS WITHOUT TIME DELAY

Спиричев М.А. – асп. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваево. E-mail: spirichevm@mail.ru

Попов Н.М. – д-р техн. наук, проф. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваево. E-mail: spirichevm@mail.ru

Олин Д.М. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваево. E-mail: spirichevm@mail.ru

Spirichev M.A. – Post-Graduate student, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: spirichevm@mail.ru

Popov N.M. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: spirichevm@mail.ru

Olin D.M. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Power Supply, Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma Region, Kostroma District, S. Karavaevo. E-mail: spirichevm@mail.ru

Статья посвящена анализу реального аварийного режима в сети с изолированной нейтралью 10 кВ на примере случая, произошедшего в Ко-

стромской области в результате возникновения однофазного замыкания на землю. Анализ, проведенный с использованием метода фазных координат

нат, установил последовательность развития событий, их наложение друг на друга, а также выявил, что послужило причиной повреждения оборудования трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, имущества и оборудования потребителей деревни Яковлево Кологривского района Костромской области. Цель статьи – показать высокую опасность последствий двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и необходимость отключения их без выдержки времени. Задачи: провести анализ сложного аварийного режима на примере случая, возникшего в Костромской области в сети 10 кВ в 2014 году; рассмотреть причины возникновения аварии, последовательность развития аварийных событий и их наложение друг на друга. Рассмотренный случай показывает, что для повышения качества и безопасности электроснабжения, а также предотвращения длительных судебных разбирательств необходимо: чётко отличать двойные замыкания на землю в сети от двухфазных замыканий; двойные замыкания на землю отключать без выдержки времени; отключать оба фидера с замыканиями на землю, если таковые имеются на подстанции; чтобы защита от двойных замыканий на землю, установленная на отдельном фидере, получала информацию об аварийных режимах на других фидерах подстанции.

Ключевые слова: изолированная нейтраль, замыкание на землю, двойное замыкание на землю, фазные координаты.

The study is devoted to the analysis of real emergency operation in the circuit with isolated neutral of 10 kV on the example of the case which took place in Kostroma Region from the emergence of single-phase earth fault. The analysis which was carried out using the method of phase coordinates established the sequence of events succession, their influencing each other, and also revealed what served as the reason of damage of the equipment of transformer substation of 10/0.4 kV, the damages of the property and equipment of consumers of the village of Yakovlevo of Kologrivsky Region of Kostroma area. The purpose of the study was to show high danger of consequences of double short circuits on the earth in networks with isolated neutral and need of their shutdown without time delay. The tasks were to carry out the analysis of difficult emergency operation on the example of the case which arose in the Kostroma Region in the network of 10 kV in 2014; to consider the accident emergence reasons; the sequence of emergency events development and their influencing at each other. Considered case shows that for the improvement of the quality and safety of power supply, and also pre-

vention of long judicial proceedings it is necessary to distinguish double short circuits on the earth in a network from two-phase short circuits accurately, to disconnect double short circuits on the earth without time delay, to disconnect both feeders with short circuits on the earth if those are available on substation, that the protection against double short circuits on the earth established on a separate feeder received information on emergency operation on other feeders of substation.

Keywords: isolated neutral, short circuit on the earth, double short circuit on the earth, phase coordinates.

Введение. В сентябре 2014 года в Костромской области в результате обрыва на линии 10 кВ линейных неизолированных проводов два из них упали на землю, а третий на заземленную траверсу железобетонной опоры, что привело к возникновению однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью. Ситуация выделена в рамках судебного расследования, которое велось вплоть до конца 2017 года, в котором в качестве эксперта привлекался Н.М. Попов [1]. Известно, что наиболее частым аварийным режимом в сетях с изолированной нейтралью являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [2]. Необходимость немедленного отключения такого вида повреждения отсутствует, так как не нарушается работа потребителей за потребителями трансформаторами. В результате ОЗЗ возрастает напряжение неповрежденных фаз, длительное воздействие которого может привести к появлению второй точки замыкания на землю и к так называемому двойному замыканию на землю (ДЗЗ), защите от которого в настоящее время не уделяется должного внимания. Дальнейшее развитие событий привело к возгоранию приборов учета электрической энергии у части потребителей 0,4 кВ (получающих питание от смежного фидера 10 кВ) и на ТП № 110, в нескольких домах возник пожар, повредилось оборудование трансформаторной подстанции № 110 10/0,4 кВ.

Цель работы – показать высокую опасность последствий двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и необходимость отключения их без выдержки времени.

Задачи: провести анализ сложного аварийного режима на примере случая, возникшего в Костромской области в сети 10 кВ в 2014 году; рассмотреть причины возникновения аварии, последовательность развития аварийных событий и их наложение друг на друга.

Для анализа логического развития аварии рассмотрим схему питания потребителей в трехфазном исполнении (рис. 1).

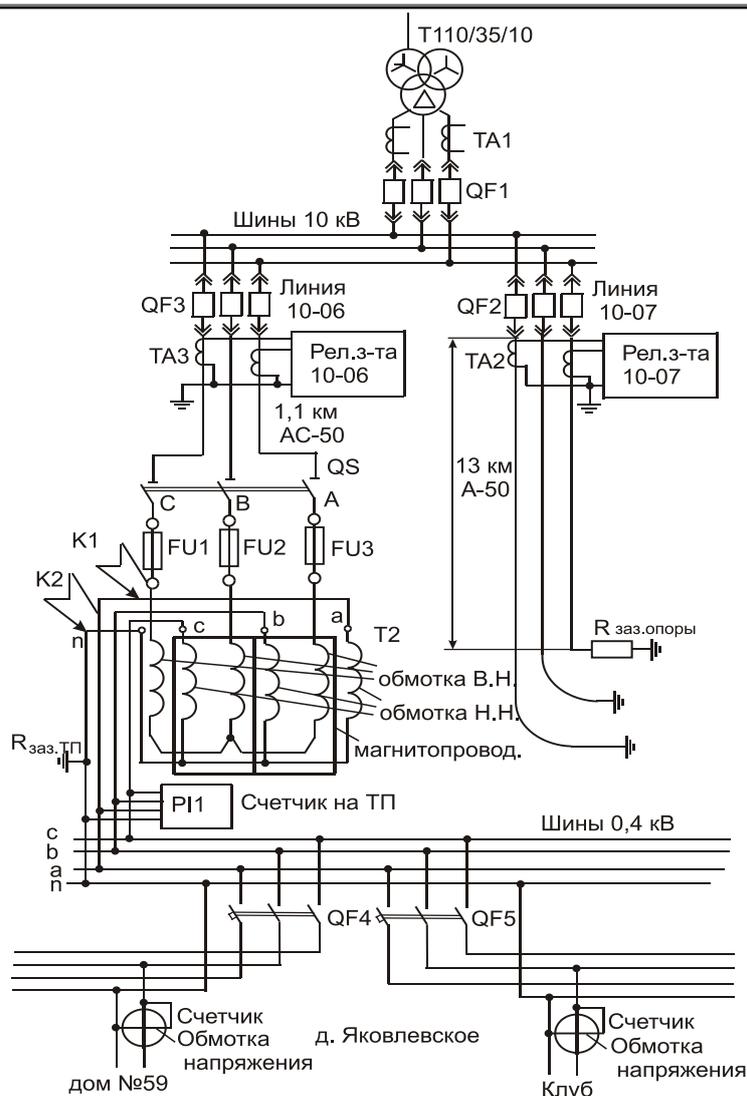


Рис. 1. Схема подключения потребителей к питающей подстанции

При появлении однофазного замыкания на землю на линии электропередачи (ЛЭП) фидера 10-07 напряжение неповрежденных фаз на отходящих от ТП 110/35/10 фидерах относительно земли увеличилось. Поскольку замыкание сопровождалось перемежающейся дугой, причем с обрывом провода, то напряжение неповрежденных фаз увеличилось в 4,5–5 раз и могло достичь порядка 32 кВ действующего значения, или 45 кВ амплитудного [3]. Такое напряжение при определенных условиях способно пробить воздушный промежуток 15 см [4], о чем говорят и испытания, проведенные на ПАО «Урал-электроаппарат». Поэтому с высоковольтного проходного изолятора 10 кВ фазы «С» (ввода) трансформатора 10/0,4 кВ потянулась дуга на расстояние 15 см до провода фазы «а», идущего от низковольтного ввода трансформатора (стрелка К1) (рис. 2). Таким образом, провод фазы «а» на стороне 0,4 кВ на короткое время оказался под напряжением 32 кВ,

что привело к повреждению его изоляции. Провода от низковольтных вводов трансформатора прокладываются на заводе-изготовителе в щит низкого напряжения пучком, благодаря чему провод фазы «а» с поврежденной изоляцией соединился и с корпусом (стрелка К2), который связан с заземляющим устройством ТП № 110 и соединенным с ним нулевым проводником сети 380/220 В. Вследствие чего в сети 10 кВ возникло двойное замыкание на землю. Фаза «а» на стороне 0,4 кВ ТП № 110 оказалась замкнутой на нулевой проводник и поэтому подключенные к ней потребители оказались без напряжения. А все потребители, подключенные к фазе «b», оказались под напряжением, близким к линейному, так как потенциал нулевого проводника оказался равным потенциалу фазы «а». От такого напряжения счетчики, воспринимающие органы которых рассчитаны на напряжение 220 В, воспламенились.

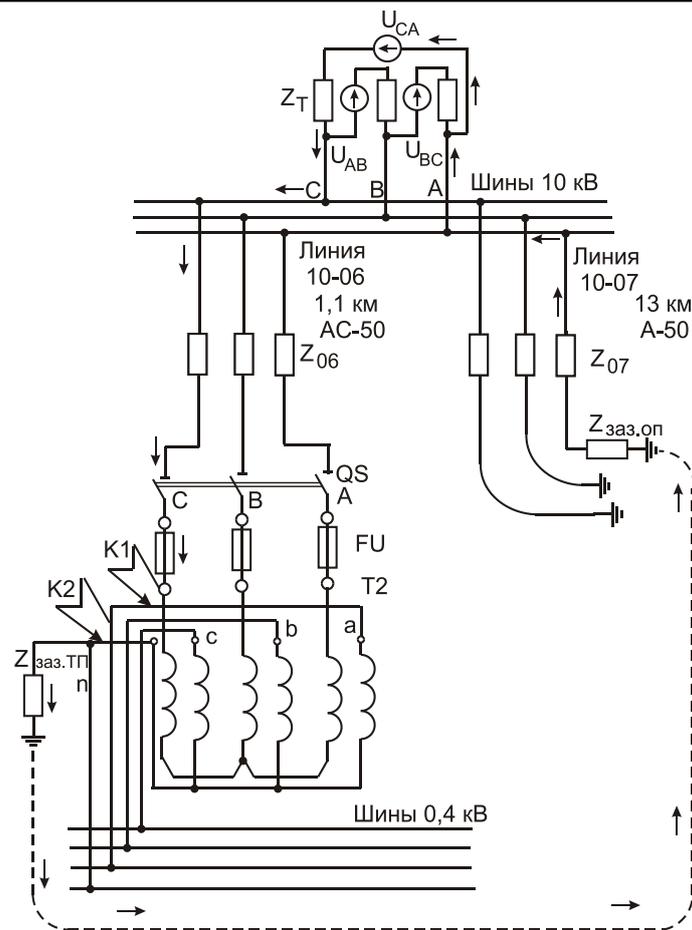


Рис. 2. Схема растекания тока двойного замыкания на землю

Расчет двойного замыкания на землю (рис. 2) проведен методом фазных координат [5] с использованием следующих исходных данных: трансформатор 110/35/10 6300 кВА, линия электропередачи 10 кВ фидера 10-07 выполнена проводом А-50, длина ЛЭП 10-07 от ТП 110/35/10 до места касания линейного провода заземленной траверсы опоры 13 км, линия электропередачи 10 кВ фидера 10-06 выполнена проводом АС-50, длина ЛЭП 10-06 составляет 1,1 км, погонное активное сопротивление земли, согласно ПТЭЭП, 0,05 Ом/км, сопротивление заземляющего устройств опоры ЛЭП принимаем, согласно ПТЭЭП, 30 Ом, сопротивление контура заземления ТП 10/0,4 кВ №110 по сведениям, предоставленным Кологривским РЭС, составляет 2,5 Ом, расстояние между местом замыкания линейного провода на траверсу опоры линии 10-07 и местом установки ТП №110, где произошло замыкание фазы «С» линии 10-06 на землю, составляет 15 км.

В результате расчета была найдена величина тока двойного замыкания на землю, которая составила 268 А. При таком токе плавкая вставка FU1 на стороне 10 кВ в фазе «С», рассчитанная на ток 12,5 А, перегорает за время 0,05 с. В результате перегора-

ния плавкой вставки фазы «С» пострадали только счетчики и потребители, подключенные между фазой «b» и нулевым проводом, оказавшимся под потенциалом фазы «a». От повышенного напряжения также загорелся счетчик PI, установленный в щите низкого напряжения ТП. От него загорелась вся изоляция низковольтного щита и начали плавиться алюминиевые провода, температура плавления которых 660 °С. Этому способствовал и большой ток, протекающий по проводам в низковольтном щите. К трансформаторному пункту 10-0,4 кВ оказалось подведено одно междуфазное напряжение U_{AB} . Это напряжение перераспределилось между двумя фазами высокого напряжения. Если бы отсутствовала закоротка между фазой «a» и нулевым проводником на стороне низкого напряжения, то на каждой из фаз «А» и «В» было бы 5500 В. Закороченная обмотка «a» ограничивает прохождение магнитного потока, сопротивление фазы уменьшается. Расчет такого режима не представляется возможным, так как следует учитывать неизмеряемые магнитные поля рассеяния обмоток. В качестве решения был проведен опыт физического моделирования в лаборатории на трансформаторе 63 ВА. Номинальный ток обмотки составлял 1.9 А, а в закороченной обмотке ток воз-

растал до 12,5 А, что превышает номинальный в 6,5 раза. Принимаем, что и в реальном трансформаторе ток увеличится в 6,5 раза. Тогда на стороне 10 кВ номинальный ток составляет 5,77 А, а при закороченной вторичной обмотке составит 37,5 А. При таком токе плавкая вставка предохранителя 10 кВ сгорит за 3–4 минуты. За это время в щите низкого напряжения произойдут большие разрушения, так как величина тока на стороне 0,4 кВ увеличится (коэффициент трансформации в 6,5 раз) и составит приблизительно 937 А.

После отключения высоковольтным предохранителем фазы «С» тока двойного замыкания на землю на верхнем изоляторе этого предохранителя снова возникло перенапряжение, вызванное перемежающейся дугой. Когда копоть от сгоревшей изоляции осела на верхних изоляторах предохранителей 10 кВ, образовались проводящие мостики по изоляции, две фазы замкнулись между собой, возникло двухфазное короткое замыкание, которое отключила релейная защита выключателем линии 10-06 за время 0,6 с. Таким образом, активная фаза пожара в низковольтном щите ТП продолжалась примерно 3–4 мин.

Выводы. Ущерб, нанесенный потребителям электрических сетей д. Яковлево Кологривского района Костромской области и Кологривскому району, вызван непредвиденным наложением друг на друга следующих явлений: 1) замыкание на заземленную траверсу опоры линейного провода 10 кВ; 2) обрыв провода за местом замыкания; 3) возникновение перемежающейся дуги в сети 10 кВ; 4) повреждение изоляции провода 0,4 кВ, идущего от низковольтных выводов трансформатора в низковольтный щит; 5) соединение провода 0,4 кВ с поврежденной изоляцией с корпусом низковольтного щита и с нулевым проводом, от чего к потребителям одной фазы было подведено напряжение не 220 В, а 380 В, от которого загорелись приборы учета в домах и огонь перекинулся на стены.

Рассмотренный случай показывает, что для повышения качества и безопасности электроснабжения, а также предотвращения длительных судебных разбирательств необходимо:

- четко отличать двойные замыкания на землю в сети от двухфазных замыканий;
- двойные замыкания на землю отключать без выдержки времени;
- отключать оба фидера с замыканиями на землю, если таковые имеются на подстанции;
- чтобы защита от двойных замыканий на землю, установленная на отдельном фидере, получала информацию об аварийных режимах на других фидерах подстанции.

Литература

1. Место для нового магазина уже выделено // Областная телерадиокомпания «Русь» Новости 19.09.2014. – URL: <http://ruskostroma.ru/index.php?newsid=11323>.
2. Олин Д.М., Спиричев М.А. Устройство для защиты воздушных линий 6–35 кВ от двойных замыканий на землю // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. ст. 68-й междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Караваяево: Костромская ГСХА, 2017. – Т. 2. – С. 233–238.
3. Батиданов Л.Н., Тарасов В.И. Электрические станции и подстанции: учеб. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.
4. Аметистов Е.В. Основы современной энергетики: курс лекций для менеджеров энергетических компаний. Ч. 2. Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 454 с.
5. Попов Н.М., Лапшин А.Н. Расчет токов при двойных замыканиях на землю // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 1. – С. 17–20.

Literatura

1. Mesto dlja novogo magazina uzhe vydeleno // Oblastnaja teleradiokompanija «Rus'» Novosti 19.09.2014. – URL: <http://ruskostroma.ru/index.php?newsid=11323>.
2. Olin D.M., Spirichev M.A. Ustrojstvo dlja zashhity vozdushnyh linij 6–35 kV ot dvojnyn zamykanij na zemlju // Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse: sb. st. 68-j mezhdu-nar. nauch.-prakt. konf.: v 3 t. – Karavaevo: Kostromskaja GSHA, 2017. – Т. 2. – С. 233–238.
3. Baptdanov L.N., Tarasov V.I. Jelektricheskie stancii i podstancii: ucheb. – 2-e izd., pererab. – М.: Jenergija, 1969. – 424 s.
4. Ametistov E.V. Osnovy sovremennoj jenergetiki: kurs lekcij dlja menedzherov jenergeticheskij kompanij. Ch. 2. Sovremennaja jelektrojenergetika / pod red. A.P. Burmana i V.A. Stroeve. – М.: Izd-vo MJel, 2003. – 454 s.
5. Popov N.M., Lapshin A.N. Raschet tokov pri dvojnyn zamykanijah na zemlju // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2008. – № 1. – С. 17–20.