

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.316.925

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-73-79

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-35 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

СБИТНЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ✉, старший преподаватель

evgenij.sbitnev@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

ОСОКИН ВЛАДИМИР ЛЕОНИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент

osokinvl@mail.ru

ЖУЖИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

zhuzhin001@yandex.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22а

Аннотация. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых ёмкостных токов. Рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, но иногда отыскать и локализовать повреждения бывает затруднительно. Реальное исследование и анализ режимов электрических сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью являются достаточно трудоёмкой задачей. Поэтому расчет фазных напряжений на подстанции при замыкании на землю проведен через переходное сопротивление на линии на основе метода фазных координат. Создана виртуальная модель исследуемой линии электропередач для анализа несимметричных режимов трехфазных сетей и проверки работоспособности метода в пакете имитационного моделирования MATLAB Simulink. Результаты моделирования показали отсутствие расхождения значений величин напряжений и токов исходной модели в фазных координатах и модели в Simulink. В результате исследований установлено, что метод фазных координат позволяет рассчитывать аварийные режимы с наложением нескольких составляющих аварий с учетом токов нагрузки. Модель в фазных координатах позволит с большой скоростью проанализировать работу релейной защиты при различных режимах работы электроэнергетической системы.

Ключевые слова: сети с изолированной нейтралью, аварийный режим, короткое замыкание, повреждение изоляции, метод фазных координат.

Формат цитирования: Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жузин М.С. Исследование однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-73-79>.

© Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жузин М.С., 2022



ORIGINAL PAPER

STUDY OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT IN ELECTRICAL NETWORKS OF 6-35 KV WITH AN ISOLATED NEUTRAL

EVGENIY A. SBITNEV✉, senior lecturer

evgenij.sbitnev@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

VLADIMIR L. OSOKIN, PhD (eng), Associate Professor

osokinvl@mail.ru

MAKSIM S. ZHUZHIN, PhD (eng), Associate Professor

zhuzhin001@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; 22a, Oktyabrskaya Str., Knyaginino, 606340, Russian Federation

Abstract. Ground faults in networks with an isolated neutral are not switched off by relay line protections due to low capacitive currents. It is recommended to disconnect the line with a earth fault as quickly as possible, but sometimes it is difficult to find and localize the damage. To analyze the emergency mode of single-phase ground fault in networks with an isolated neutral,

the phase coordinate method for calculating phase voltages is used. At the point of damage, the values of the phase-to-phase voltages remain unchanged, and the phase voltages change. Real research and analysis of electrical network modes of 6-35 kV with an isolated neutral is rather time-consuming task. Therefore, the calculation of phase voltages at the substation during an earth fault is carried out through the transition resistance on the line based on the phase coordinate method. The authors developed a virtual model of studied power transmission line for analyzing asymmetric modes of three-phase networks and checking the operability of the method in the MATLAB Simulink simulation package. The simulation results showed that there was no discrepancy between the voltage and current values of the original model in phase coordinates and the Simulink model. As a result of the research, the authors have found that the phase coordinate method helps calculate emergency modes with the overlay of several component accidents taking into account load currents. The model in phase coordinates will allow analyzing relay protection operation at high speed under different operating modes of the electric power system.

Key words: power networks with an insulated neutral, emergency mode, short circuits, insulation damage, phase coordinate method.

For citation: Sbitnev E.A., Osokin V.L., Zhuzhin M.S. Study of single-phase earth fault in electrical networks of 6-35 kV with an isolated neutral. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 73-79. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-73-79>.

Введение. Аварийные режимы электрических сетей приводят к резкому нарушению качества электрической энергии во всей системе электроснабжения. Аварийными режимами в сетях 6-35 кВ являются двухфазные короткие замыкания (КЗ), двухфазные КЗ на землю, трёхфазные КЗ, двойные короткие замыкания, обрыв фазных проводов, однофазные замыкания на землю [1-4]. В аварийных режимах изменяются токи и напряжения, поэтому их необходимо учитывать и проводить расчет при анализе работы потребителей, а также для выбора уставок релейной защиты [5]. Вероятность появления аварийных режимов в сетях – случайная величина [6, 7], обусловленная достаточно многими факторами. По данным [8], наиболее частым видом повреждений в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю.

В сетях с изолированной нейтралью в нормальном режиме работы ни одна точка электрической сети не соединена ни с заземляющим устройством, ни с землёй. В таких сетях повреждение изоляции одной из фаз не изменяет векторную диаграмму линейных напряжений и не приводит к появлению больших токов – изменяются только фазные напряжения в сети, но не у потребителей. Этим объясняются особенности в рассмотрении режима работы сети с изолированной нейтралью с замкнувшейся на землю фазой. Повреждение изоляции одной из фаз относительно земли не является аварийным режимом в сетях с изолированной нейтралью, но последствия от таких повреждений могут быть самыми тяжёлыми. Поэтому их необходимо рассматривать наряду с режимами, которые приводят к нарушению качества напряжения у потребителей.

Реже всего в сельской местности питание потребителей осуществляется по кабельным линиям. В кабельных линиях самым опасным видом однофазного короткого замыкания является замыкание на землю через перемежающуюся дугу. В этом случае при каждом загорании или погасании дуги возникают переходные процессы, а следовательно, скачки тока и импульсные перенапряжения. Дуга во время горения испаряет токопроводящую жилу и изоляционные материалы, что может вызвать двойное замыкание на землю.

В сельской местности преимущественно прокладывают воздушные линии электропередачи 6-10 кВ, выполненные неизолированными, чаще всего – сталеалюминиевыми

проводами марки АС. В таких сетях повреждения изоляции возникают чаще всего по нескольким причинам [4]:

- естественное старение изоляции линий и аппаратов (24% от общего числа повреждений). Особенно быстро старится изоляция после расчетного срока службы электрооборудования. Для воздушных линий электропередачи с железобетонными опорами срок службы составляет 30 лет, с деревянными опорами – 25 лет;
- механическое повреждение опор и изоляции (11%);
- ошибочные действия оперативно-ремонтного персонала (9%) при включении линий после ремонта, при выводе в ремонт, при умышленном нарушении блокировок, неправильные операции с аппаратами сетей;
- атмосферные перенапряжения (21%), возникающие при отсутствии или выходе из строя устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

Цель исследований: анализ однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, проверка работоспособности метода фазных координат в пакете имитационного моделирования MATLAB & Simulink.

Материалы и методы. Электрические сети 6-35 кВ включают в себя трансформаторы 35/10(6) или 110/35/10(6), трёхпроводные воздушные или кабельные линии электропередачи и потребительские силовые трансформаторы.

Для расчета фазных напряжений на подстанции при замыкании на землю через переходное сопротивление на линии применяется метод фазных координат, используемый для расчетов междуфазных коротких замыканий и двойных коротких замыканий на землю [9, 10].

Рассмотрим схему замещения сети, содержащей трансформатор 35/10 кВ, линию с замыканием на землю в конце и нагрузку (рис. 1).

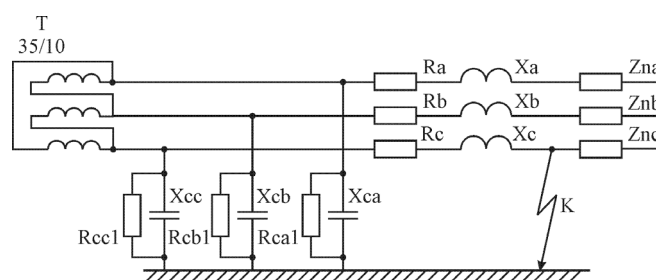


Рис. 1. Схема замещения сети

Fig. 1. Network replacement scheme

По методу фазных координат элементы сети (трансформатор, линию, место повреждения и нагрузку) представим 2К-полюсниками (рис. 1).

Параметры 2К-полюсника трансформатора 35/10 кВ определяются в соответствии с методикой [11] за 7 шагов.

Шаг 1. По паспортным сведениям (номинальной мощности S_n ; номинальным напряжениям U_v , U_n ; току холостого хода i_{xx} , %; напряжению короткого замыкания u_k , %; потерям короткого замыкания $\Delta P_{кз}$; потерям холостого хода $\Delta P_{хх}$) вычисляются сопротивления и проводимости трансформатора.

Шаг 2. Вычисляются собственные и взаимные сопротивления обмоток трансформатора.

Шаг 3. Заполняется матрица сопротивлений Z_v и составляется матрица инцидентов (соединений) M .

Шаг 4. Вычисляется матрица узловых проводимостей размерностью 7×7 :

$$Y = M \cdot Z_v^{-1} \cdot M^T, \quad (1)$$

где M^T – транспонированная матрица инцидентов.

Шаг 5. Эквивалентизируется матрица Y относительно 7-го узла и получается матрица Y_e размерностью 6×6 .

Шаг 6. Матрица Y_e разделяется на 4 блока относительно входа и выхода трансформатора (Y_{e11} , Y_{e12} , Y_{e21} , Y_{e22}), которые представляют собой параметры 2К-полюсника трансформатора в форме «Y».

Шаг 7. Вычисляются параметры 2К-полюсника в форме «H».

Каждый параметр представляет собой матрицу размерностью 3×3 .

Параметры 2К-полюсника линии электропередачи вычисляются по методике [12]. Только ёмкостная проводимость B_c учитывает суммарную длину электрически связанных линий, подключенных к трансформатору. В месте повреждения изоляции включаем сопротивления между фазами и землёй. По этим сопротивлениям находим проводимости и заполняем матрицу проводимостей, затем записываем параметры 2К-полюсника повреждения.

Параметры 2К-полюсника нагрузки вычисляем по присоединённой мощности, через которую находим и заполняем матрицу проводимостей Y_s .

На схеме замещения сети 2К-полюсниками (рис. 2) на входе и выходе каждого элемента сети обозначим напряжения и токи.

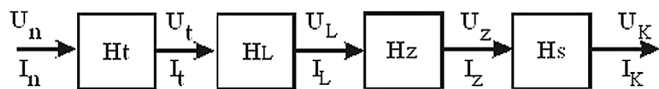


Рис. 2. Схема замещения сети 2К-полюсниками:

Ht – 2К-полюсник трансформатора;
HL – 2К-полюсник линии электропередачи;
Hz – 2К-полюсник повреждения;
Hs – 2К-полюсник нагрузки

Fig. 2. Replacement scheme of the network with 2K-poles:

Ht – 2K-transformer pole;
HL – 2K-power line pole;
Hz – 2K-damage pole; Hs – 2K-load pole

Объединяем 2К-полюсники места повреждения (Az), нагрузки (As), линии (AL) и трансформатора (At):

$$AE = At \cdot ALzs + Bt \cdot CLzs; BE = At \cdot BLzs + Bt \cdot DLzs;$$

$$CE = Ct \cdot ALzs + Dt \cdot CLzs; DE = Ct \cdot BLzs + Dt \cdot DLzs.$$

После объединения всех 2К-полюсников задаем вектор-столбец напряжений U_n на входе трансформатора и определяем векторы напряжений в конце на выходе нагрузки U_k :

$$U_k = AE^{-1} \cdot U_n. \quad (2)$$

Эти же напряжения будут на входе нагрузки и в месте повреждения $U_k = U_z = U_L$. При изменении переходного сопротивления в месте повреждения будет изменяться параметр Y_z , что в итоге приводит к изменению напряжений всех фаз.

В качестве примера рассмотрим однофазное замыкание на землю на линии длиной 15 км, выполненной проводом АС-70 с удельным сопротивлением $R_0 = 0,412$ Ом/км, $X_0 = 0,432$ Ом/км. Линия подключена к трансформатору ТМН-4000/35. К линии подключена нагрузка с сопротивлением $50 + 50i$ Ом. Переходное сопротивление изменяется от 0 до 1 МОм. Вычисления производились в математическом пакете Mathcad. Часть алгоритма представлена ниже.

Исходные данные:

$$Z_l := 0.1 + j1; Z_0 := 0.3 + j3; k := 1; U := 35e^3; \delta := 15 \text{ deg.}$$

Расчетные формулы:

$$E_{es} := \begin{pmatrix} k \cdot U \cdot \exp(\delta) \\ k \cdot U \cdot \exp(\delta - 120 \text{ deg}) \\ k \cdot U \cdot \exp(\delta + 120 \text{ deg}) \end{pmatrix};$$

$$Z := \begin{bmatrix} \frac{(2Z_l + Z_0)}{3} & \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} & \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} \\ \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} & \frac{(2Z_l + Z_0)}{3} & \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} \\ \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} & \frac{(Z_0 - Z_l)}{3} & \frac{(2Z_l + Z_0)}{3} \end{bmatrix};$$

$$M1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; M0 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$A_{es} := \begin{pmatrix} M1 & Z \\ M0 & M1 \end{pmatrix}; A_{es} := \begin{pmatrix} \{3,3\} & \{3,3\} \\ \{3,3\} & \{3,3\} \end{pmatrix};$$

$$Z = \begin{pmatrix} 0.167 + j1.667 & 0.067 + j0.667 & 0.067 + j0.667 \\ 0.067 + j0.667 & 0.167 + j1.667 & 0.067 + j0.667 \\ 0.067 + j0.667 & 0.067 + j0.667 & 0.167 + j1.667 \end{pmatrix};$$

$$E_{es} := \begin{pmatrix} 913.376 \\ 112.477 \\ 7.417 \cdot 10^3 \end{pmatrix}.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Изменение напряжения в зависимости от величины переходного сопротивления

Table 1

Voltage change depending on the value of the transient resistance

Холостой ход / Idling				
$R_{пер}, \text{ Ом}$	0	3000	7000	10000
$U_A, \text{ В}$	$11000 - 5,23i$	$8728 - 1515i$	$6392 - 922,6i$	$5653 - 154,5i$
$U_B, \text{ В}$	$5498 - 9529i$	$3225 - 11040i$	$888,8 - 10450i$	$150,6 - 9678i$
$U_C, \text{ В}$	≈ 0	$-268 - 1499i$	$-4602 - 912,1i$	$-5340 - 146,2i$
$3U_0, \text{ В}$	$95,26 - 55,05i$	$55,9 - 81,1i$	$15,5 - 70,91i$	$2,68 - 57,6i$
$R_{пер}, \text{ Ом}$	30000	50000	100000	1000000
$U_A, \text{ В}$	$5121 + 1970i$	$5217 + 2476i$	$5345 + 2850i$	$5501 + 3173i$
$U_B, \text{ В}$	$-382 - 7554i$	$-286,1 - 7048i$	$-157,9 - 6674i$	$-2,1 - 6351i$
$U_C, \text{ В}$	$-5876 + 1974$	$-5781 + 2480i$	$-5654 + 2854i$	$-5499 + 3177i$
$3U_0, \text{ В}$	$-6,56 - 20,8i$	$-4,91 - 12,1i$	$-2,65 - 5,6i$	0
С учётом нагрузки / Under the load				
$R_{пер}, \text{ Ом}$	0	3000	7000	10000
$U_A, \text{ В}$	$9884 - 367,6i$	$7411 - 1140i$	$5413 - 679,4i$	$4770 - 39,58i$
$U_B, \text{ В}$	$5432 - 8516i$	$2959 - 9288i$	$960,5 - 8828i$	$318 - 8188i$
$U_C, \text{ В}$	≈ 0	$-1869 - 1349i$	$-3866 - 892,9i$	$-4509 - 254,7i$
$3U_0, \text{ В}$	$92,43 - 55,35i$	$49,1 - 68,1i$	$14,46 - 60,1i$	$3,33 - 48,9i$
$R_{пер}, \text{ Ом}$	30000	50000	100000	1000000
$U_A, \text{ В}$	$4277 + 1758i$	$4350 + 2191i$	$4452 + 2511i$	$4578 + 2789i$
$U_B, \text{ В}$	$-174,7 - 6391i$	$-102,5 - 5958i$	$-0,38 - 5638i$	$-126,2 - 5360i$
$U_C, \text{ В}$	$-5004 + 1540i$	$-493,2 + 1972i$	$-4831 + 2293i$	$-4705 + 2570i$
$3U_0, \text{ В}$	$-5,2 - 17,8i$	$-3,96 - 10,4i$	$-2,19 - 4,82i$	≈ 0

По полученным результатам строим диаграммы изменения напряжения в зависимости от величины переходного сопротивления (рис. 3).

Из диаграммы изменения напряжений следует, что напряжение повреждённой фазы изменяется от нуля при металлическом замыкании до фазного напряжения сети

при переходном сопротивлении, близком к бесконечности. Геометрическим местом точек конца вектора напряжения повреждённой фазы $U_c = f(R_{пер})$ будет дуга окружности, опирающаяся на фазное напряжение, как на диаметр. В проведённом вычислительном эксперименте получили такие же результаты, как и достигнутые аналитическим путём.

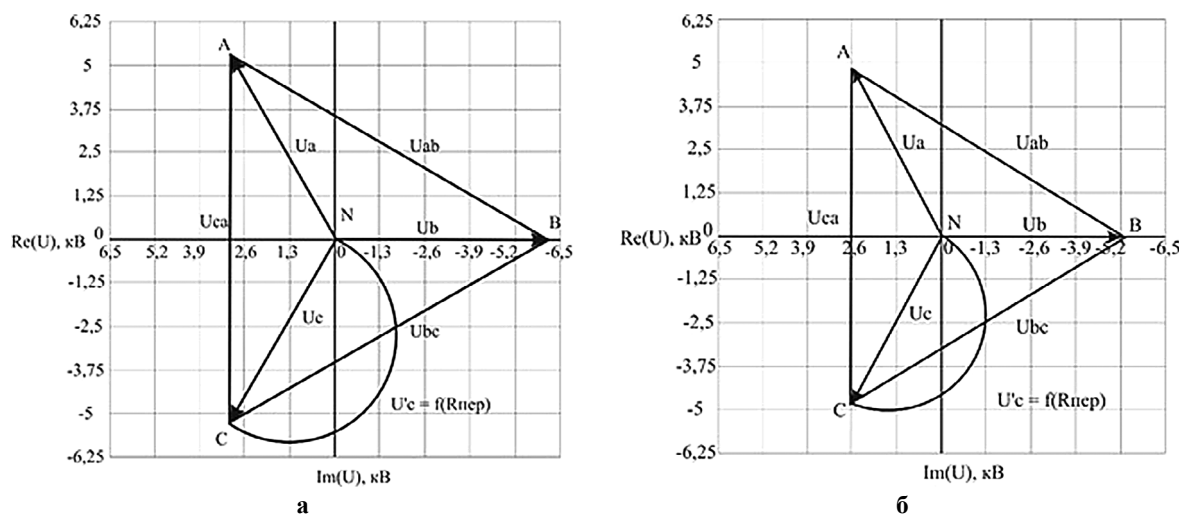


Рис. 3. Изменение напряжения при замыкании фазы С на землю:
а – холостой ход; б – с учётом нагрузки

Fig. 3. Voltage change when phase C is earth connected:
а – idle; б – under the load

При изменении переходного сопротивления в месте повреждения величины междупазных напряжений остаются без изменений. Изменяются фазные напряжения, которые в любой точке сети вычисляются по формулам, связывающим напряжения и токи на входе U_{n1} , I_{n1} и на выходе U_{k1} , I_{k1} , 2К-полюсников в форме Н, двигаясь от конца к началу линии:

$$Un_i = A_i \cdot Uk_i + B_i \cdot Ik_i; \quad In_i = C_i \cdot Uk_i + D_i \cdot Ik_i. \quad (3)$$

Геометрическая сумма трёхфазных напряжений представляет собой утроенное напряжение нулевой последовательности $3U_0$, которое получаем на выходе обмотки напряжения, соединённой в разомкнутый треугольник, на питающей подстанции. Вычисление $3U_0$ производим по формуле:

$$3U_0 = \frac{|\underline{U_{t_A}} + \underline{U_{t_B}} + \underline{U_{t_C}}|}{K_{TV}}, \quad (4)$$

где $\underline{U}_{\text{тА}}$, $\underline{U}_{\text{тВ}}$, $\underline{U}_{\text{тС}}$ – напряжения фаз на шинах 10 кВ питающей подстанции; $K_{\text{тВ}}$ – коэффициент трансформации трансформатора напряжения. Для обмотки, соединенной в разомкнутый треугольник $K_{\text{тВ}} = 173,2$.

По показаниям вольтметра, подключенного к обмотке трансформатора напряжения, соединенной в разомкнутый треугольник, можно фиксировать динамику изменения напряжения на поврежденной фазе. Так, при переходном сопротивлении 30000 Ом напряжение на вольтметре составит $3U_0 = 18,6 \text{ В}$.

Результаты и их обсуждение. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых ёмкостных токов. Такое повреждение только сигнализируется на питающей подстанции за счёт изменения фазных напряжений на всех присоединениях, подключенных к одному силовому трансформатору. На отыскание и локализацию повреждения в электрических сетях отводится в среднем 2 ч, а иногда повреждения отыскиваются в течение десятков часов. За это время соединение фазного провода с землёй представляет угрозу для жизни людей

и животных, приближающихся к проводу, лежащему на земле, или к опоре с повреждённой изоляцией. Поэтому рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, особенно если линия проходит по населённому пункту. Кроме того, замыкание на землю одной фазы приводит к повышению фазных напряжений, от которых пробивается изоляция другой фазы, появляется двойное замыкание на землю, сопровождающееся большими токами, от которых одна или две линии отключаются. Длительное протекание тока замыкания на землю через железобетонную опору нарушает структуру бетона подземной части опоры, и опоры выбраковывают.

Коллективом авторов разработано устройство для отключения линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью [13]. В результате технического применения данного устройства повысится безопасность эксплуатации электрической сети, поскольку при появлении на питающей подстанции сигнала «Замыкание на землю» сработает программное реле времени, которое через промежуточные реле и выключатели начнет поочередно отключать линии, подключенные к шинам питающей подстанции. И если на линии отсутствует однофазное замыкание на землю, то автоматическое повторное включение (АПВ) восстановит питание потребителей.

Реальное исследование и анализ режимов электрических сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью являются достаточно трудоёмкой задачей. Поэтому на первоначальном этапе возможно применение виртуальной компьютерной модели, создаваемой на основе реальной схемы электроснабжения. Наиболее подходящей средой для моделирования электрической сети в нашем случае является программный комплекс MATLAB. Он содержит в себе графическую среду Simulink, позволяющую смоделировать электрическую систему. В процессе исследования виртуальной модели есть возможность прямого наблюдения за процессами, происходящими в системе, и сохранения данных. На рисунке 4 представлена виртуальная модель линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью.

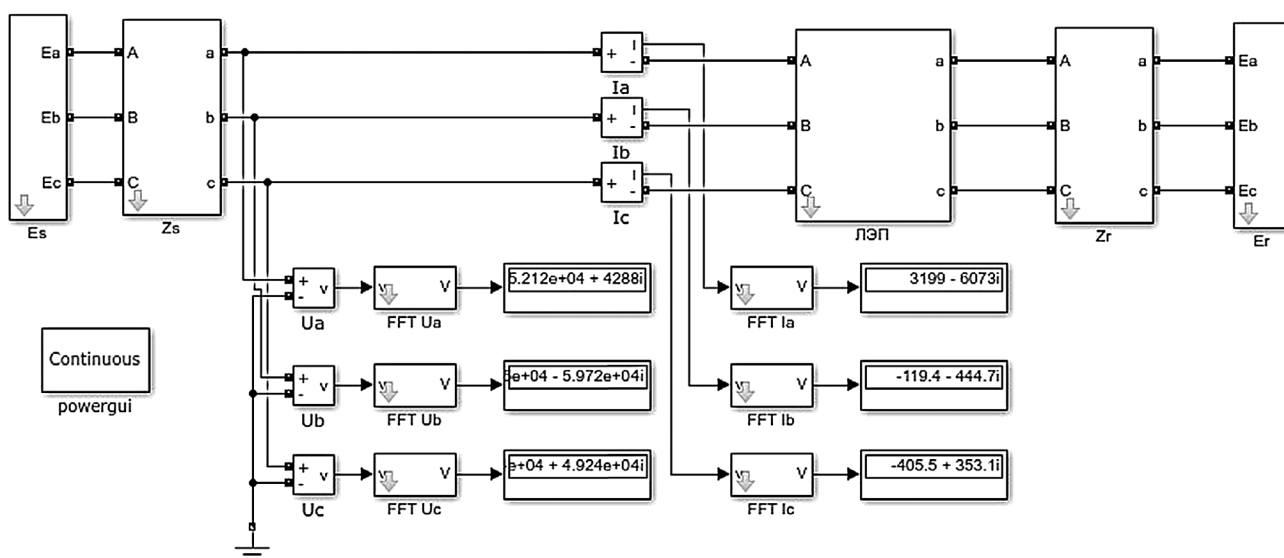


Рис. 4. Виртуальная модель линии в MATLAB

Fig. 4. Virtual model of the network in MATLAB

Для проверки работоспособности метода в пакете имитационного моделирования MATLAB & Simulink была смоделирована схема исследуемой линии электропередач, описанная в базисе фазных координат.

Параметры ЭС:

$U = 35e3$ – номинальное напряжение электропередачи;

$k = 1$ – коэффициент регулирования мощности;

$d = 10$ – угол передачи мощности;

$Z_{1es} = 3 + 10i$ – сопротивление ЭС по прямой последовательности;

$Z_{0es} = 5 + 18i$ – сопротивление ЭС по нулевой последовательности.

Параметры ЛЭП:

$Z_1 = 0.15 + 0.4i$ – погонное сопротивление ЛЭП по прямой последовательности;

$Z_0 = 0.3 + 1.2i$ – погонное сопротивление ЛЭП по нулевой последовательности;

$Y_1 = 0$ – погонная проводимость ЛЭП по прямой последовательности;

$Y_0 = 0$ – погонная проводимость ЛЭП по нулевой последовательности;

$xf = 50$ – расстояние до места короткого замыкания;

$l = 100$ – длина ЛЭП.

Параметры повреждения (моделируется однофазное КЗ):

$R_a = 0,1$;

$R_b = 10e10$;

$R_c = 10e10$;

$R_{ab} = 10e10$;

$R_{bc} = 10e10$;

$R_{ca} = 10e10$.

Параметры нагрузки:

$P = 10e6$ – активная мощность нагрузки;

$Q = 6e6$ – реактивная мощность нагрузки.

Расчетные формулы:

$[Es, As] = A \text{ eqsys}(U, k, d, Z_{1es}, Z_{0es})$;

$Er = \text{zeros}(3, 1)$;

$Af_line = A_line(Z_1, Z_0, Y_1, Y_0, l)$;

$Af = A_line(Z_1, Z_0, Y_1, Y_0, (l-xf))$;

$Akz = A_fault(R_a, R_b, R_c, R_{ab}, R_{bc}, R_{ca})$;

$An = A_load(P, Q, U)$;

$A = As \cdot Af \cdot Akz \cdot Af \cdot An$;

$Y = A_to_Y(A)$;

$Y11 = Y(1:3, 1:3)$;

$Y12 = Y(1:3, 4:6)$;

$Y21 = Y(4:6, 1:3)$;

$Y22 = Y(4:6, 4:6)$;

$S = [\text{sum}(\text{sum}(Y11)) \text{sum}(\text{sum}(Y12))$;

$\text{sum}(\text{sum}(Y21)) \text{sum}(\text{sum}(Y22))]$;

$V = [\text{sum}(Y11) \text{sum}(Y12)$;

$\text{sum}(Y21) \text{sum}(Y22)]$;

$fi = -\text{inv}(S) \cdot V \cdot [Es; Er]$;

$I = Y \cdot [Es + fi(1); fi(2) \cdot \text{ones}(3, 1)]$;

$V1 = As \setminus [Es + fi(1); I(1:3)]$;

end.

В таблице 2 представлены результаты апробации модели в Simulink и проверки метода в фазных координатах.

Таблица 2

Результаты моделирования режима короткого замыкания

Table 2

Short circuit simulation results

Величина Value	Модель в Simulink Model in Simulink	Модель в фазных координатах Model in phase coordinates
	Модуль / Module	Модуль / Module
$\underline{U}_A$, В	16630,340	16630,411
$\underline{U}_B$, В	9404,920	9404,924
$\underline{U}_C$, В	20683,300	20683,521
$\underline{I}_A$, А	2183,792	2183,700
$\underline{I}_B$, А	146,537	146,436
$\underline{I}_C$, А	171,099	171,200

Сопоставляя значения, полученные с помощью моделей в фазных координатах и Simulink в режиме короткого замыкания, можно сделать вывод об отсутствии расхождений значений. Показатели находятся в допустимых пределах. Модель, составленная в фазных координатах, пригодна для дальнейших расчетов. Она позволяет рассчитывать установившиеся режимы электроэнергетических систем при помощи матричных уравнений, которые при интеграции в MATLAB рассчитываются с большой скоростью.

Выводы

1. Ёмкостные токи замыкания на землю не оказывают значительного влияния на величину тока нагрузки в фазах, поэтому релейная токовая защита присоединения не среагирует на этот вид повреждения. Для обнаружения замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью необходимо устанавливать измерительные трансформаторы напряжения со вторичной дополнительной обмоткой, соединенной в разомкнутый треугольник.

2. Метод фазных координат позволяет рассчитывать аварийные режимы с наложением нескольких составляющих аварий с учетом токов нагрузки. Модель в фазных координатах позволит с большой скоростью проанализировать работу релейной защиты при различных режимах работы электроэнергетической системы.

Библиографический список

1. Козлов А.В., Шевцов И.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ в ООО «АКС» «Амурэлектросервис» // Инновационная наука. 2021. № 7. С. 50-54.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем; Под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
3. Лабуз И.В., Загороднев Я.А., Мусорина О.С. Моделирование аварийных режимов распределительной

References

1. Kozlov A.V., Shevtsov I.S. Analiz avariynosti sel'skikh elektricheskikh setey 0,38 kV v ООО "AKS" "Amurelektroset'servis" [Analysis of the accident rate of rural electric networks of 0.38 kV in LLC "AKS" "Amurelektroset'servis"]. *Innovatsionnaya nauka*, 2021; 7: 50-54. (In Rus.)
2. Zhdanov P.S. Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem [Issues of the stability of electrical systems]. Ed by. L.A. Zhukov. Moscow, Energiya, 1979. 456 p. (In Rus.)

электрической сети 10/0,38 кВ с накопителями электроэнергии // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1391-1404.

4. Сбитнев Е.А., Жужин М.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ Нижегородской энергосистемы // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 36-47. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104>

5. Борковский С.О., Горева Т.С., Горева Т.И. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-5. С. 954-959.

6. Папков Б.В., Осокин В.Л., Дулепов Д.Е. Оценка вероятностей несимметричных режимов систем электрооборудования // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 31-41.

7. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения: Монография. Нижний Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021. 160 с.

8. Зацаринная Ю.Н., Рахматуллин Р.Р., Хабибуллин М.Н. Защита сетей с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 3. С. 75-76.

9. Попов Н.М., Клочков А.Н. Методика расчета сложных режимов в сетях с изолированной нейтралью // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010. № 11. С. 52-57.

10. Клочков А.Н. Методика расчета и обнаружения замыканий на землю с обрывами фазного провода в сельских сетях 10 кВ // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 68-70.

11. Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование трансформаторов распределительных сетей в фазных координатах: Деп. рукопись № 1308-B2003. ВИНТИ, 08.07.2003. Кострома, 2003. 53 с.

12. Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование параметров К-фазных линий электропередачи в фазных координатах. Деп. рукопись № 1306-B2003. ВИНТИ, 08.07.2003. Кострома, 2003. 27 с.

13. Устройство для отключения линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью: патент № 2733202 С1 Российская Федерация, МПК H02N 3/16 / Н.М. Попов, В.Л. Осокин, Е.А. Сбитнев; заявл. 18.02.2020; опубл. 30.09.2020, Бюл. № 28.

3. Labuz I.V., Zagorodnev Ya.A., Musorina O.S. Modelirovanie avariynnykh rezhimov raspredelitel'noy elektricheskoy seti 10/0.38 kV s nakopitelyami energii [Simulation of the emergency modes of a 10/0.38 kV electric distribution network with energy storage devices]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021; 33: 1391-1404. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104> (In Rus.)

4. Sbitnev E.A., Zhuzhin M.S. Analiz avariynosti sel'skikh elektricheskikh setey 0.38 kV Nizhegorodskoy energosistemy [Accident rate analysis of 0.38 kV rural electric networks of the Nizhny Novgorod power system]. *Vestnik NGIEI*, 2020; 11 (114): 36-47. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104> (In Rus.)

5. Borkovskiy S.O., Goreva T.S., Goreva T.I. Problema diagnostiki odnofaznykh zamykaniy na zemlju v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlu [Problem of detecting single-phase short circuits to earth in networks with small currents of short circuit to earth]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014; 9: 954-959. (In Rus.)

6. Papkov B.V., Osokin V.L., Dulepov D.E. Otsenka veroyatnostey nesimmetrichnykh rezhimov sistem elektrosnabzheniya [Estimation of the probabilities of asymmetric modes in power supply systems]. *Vestnik NGIEI*, 2021; 4 (119): 31-41. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-31-41> (In Rus.)

7. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. Nadezhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya: monografiya [Reliability and efficiency of modern power supply: monograph]. *Nizhny Novgorod, Nauchno-izdatel'skiy tsentr "XXI vek"*, 2021. 160 p. (In Rus.)

8. Zatsarinnaya Yu.N., Rakhmatullin R.R., Khabibullin M.N. Zashhita setey s izolirovannoy neytral'yu ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu [Protection of networks with an isolated neutral from single-phase earth faults]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014; 17 (3): 75-76. (In Rus.)

9. Popov N.M., Klochkov A.N. Metodika rascheta slozhnykh rezhimov v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Method of calculating complex modes in networks with an isolated neutral]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2010; 11: 52-57. (In Rus.)

10. Klochkov A.N. Metodika rascheta i obnaruzheniya zamykaniy na zemlyu s obryvami faznogo provoda v sel'skikh setyakh 10 kV [Method of calculation and detection of ground faults with phase wire breakage in rural 10 kV networks]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2011; 8: 68-70. (In Rus.)

11. Soldatov V.A., Popov N.M. Modelirovanie parametrov K-faznykh liniy elektropredachi v faznykh koordinatakh [Modeling the parameters of K-phase power transmission lines in phase coordinates]: Manuscript VINITI 08.07.2003, No. 1308-B2003. Kostroma, 2003. 53 p. (In Rus.)

12. Soldatov V.A., Popov N.M. Modelirovanie parametrov K-faznykh liniy elektropredachi v faznykh koordinatakh [Modeling the parameters of K-phase power transmission lines in phase coordinates]. Manuscript VINITI 08.07.2003, No. 1306-B2003. Kostroma, 2003. 27 p. (In Rus.)

13. Popov N.M., Osokin V.L., Sbitnev E.A. Ustroystvo dlya otklyucheniya linii s zamykaniem na zemlyu v seti s izolirovannoy neytral'yu [Device for disconnecting the line with earth fault in a network with an insulated neutral]: Patent No. 2733202 C1 Russian Federation, IPC N02 N3/16, 2020. (In Rus.)

Критерии авторства

Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021

Одобрена после рецензирования 08.04.2022

Принята к публикации 12.04.2022

Contribution

E.A. Sbitnev, V.L. Osokin, M.S. Zhuzhin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. E.A. Sbitnev, V.L. Osokin, M.S. Zhuzhin have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 10.12.2021

Approved after reviewing 08.04.2022

Accepted for publication 12.04.2022