

*Е.Ю. ЗОРИН, А.А. ЧЕПЕЛЮК*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

В статье разработана расчетная модель сети среднего напряжения с тремя фидерами в среде Matlab, которая позволяет моделировать работу сети в режиме однофазного замыкания на землю. Расчетная модель базируется на положениях теории метода симметричных составляющих, что позволяет имитировать появление компонент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю. Проведено имитационное моделирование сети напряжением 20 кВ с компенсированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю, результаты которого проиллюстрированы соответствующими осциллограммами и зависимостями напряжений и токов. По результатам моделирования проанализировано работу системы компенсации аварийного тока в режиме однофазного замыкания на землю. Предложенная расчетная модель может быть использована при разработке новых и модернизации существующих сетей среднего напряжения с компенсированной нейтралью для оценки эффективности их работы в режиме однофазного замыкания на землю и с целью наиболее рационального выбора соответствующего оборудования установки компенсации и алгоритмов его работы.

**Ключевые слова:** трехфазная сеть среднего напряжения, однофазное короткое замыкание, компенсированная нейтраль, катушка Петерсена, метод симметричных составляющих, Matlab-модель.

*Е. Ю. ЗОРИН, О. О. ЧЕПЕЛЮК*

### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЗАМИКАННІ НА ЗЕМЛЮ

В статті розроблено розрахункову модель мережі середньої напруги з компенсованою нейтраллю з трьома фідерами в середовищі Matlab, яка дозволяє моделювати роботу мережі в режимі однофазного замикання на землю. Розрахункова модель базується на положеннях теорії методу симетричних складових, що дозволяє імітувати появу складових нульової послідовності струмів які виникають у енергосистемі в випадку однофазного замикання на землю. Проведено імітаційне моделювання мережі напругою 20 кВ з компенсованою нейтраллю в режимі однофазного замикання на землю, результати якого проілюстровані відповідними осциллограммами та залежностями напруг і струмів. За результатами моделювання проаналізовано роботу системи компенсації аварійного струму в режимі однофазного замикання на землю. Запропонована розрахункова модель може бути використана при розробці нових і модернізації існуючих мереж середньої напруги з компенсованою нейтраллю для оцінки ефективності їх роботи в режимі однофазного замикання на землю та з метою найбільш раціонального вибору відповідного обладнання установки компенсації і алгоритмів його роботи.

**Ключові слова:** трифазна мережа середньої напруги, однофазне коротке замикання, компенсована нейтраль, катушка Петерсена, метод симетричних складових, Matlab-модель.

*Y. Y. ZORIN, O. O. CHEPELYUK*

### MODELING THE OPERATION OF A MEDIUM VOLTAGE POWER GRID WITH A COMPENSATED NEUTRAL AT SINGLE-PHASE GROUND FAULT

**Introduction.** In this article is developed a computational model of medium voltage power grid with three feeder lines in Matlab environment, which allows to simulate the operation of power grid in single phase to ground fault mode. The computational model is based on the theory of symmetrical components method, that allows to imitate appearance of currents zero sequences, which exist in power system in case of single phase ground fault. The imitation modeling of 20 kV compensated power grid in single phase to ground fault mode has carried out, the results of this modeling are shown by corresponding oscillograms, current and voltage dependencies. According to the simulation results, the operation of the fault current compensation system has analyzed in single phase to ground fault mode. The proposed computational model can be used in the development of new and modernization of existing medium voltage compensated power grids to evaluate the effectiveness of their operation in single phase to ground fault mode for the most rational choice of appropriate compensation equipment installation and algorithms of its operation.

**Key words:** three phase medium voltage power grid, single phase short circuit, compensated neutral, Petersen coil, symmetrical components method, Matlab-model.

**Введение.** Правилами устройства электроустановок [1] предусматривается работа электрических сетей напряжением от 3 кВ до 35 кВ как с изолированной нейтралью, так и нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (катушку Петерсена) или резистор, а также заземленной одновременно через дугогасящий реактор и резистор. Защита от замыка-

ний на землю должна надежно срабатывать при выбранном способе заземления нейтрали.

Каждый из указанных режимов работы нейтрали по-своему эффективен, основываясь на технико-экономическом соответствии бесперебойности электроснабжения потребителей.

В настоящее время компенсацию емкостного то-

ка замыкания на землю через дугогасящие реакторы необходимо применять при таких значениях этого тока в нормальных режимах [1]:

- в сетях напряжением от 6 кВ до 10 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи (ВЛ), – более 10 А;
- в сетях напряжением 20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на ВЛ, – более 5 А;
- во всех сетях 35 кВ – более 10 А;
- в сетях, которые не имеют железобетонных и металлических опор на ВЛ: напряжением 6 кВ – более 30 А; напряжением 10 кВ – более 20 А; напряжением от 15 кВ до 20 кВ – более 15 А.

При наличии обоснования разрешено применять компенсацию в сетях 6-35 кВ также со значениями емкостного тока, меньше от вышеприведенных.

В данной статье рассматривается сеть среднего напряжения с компенсированной нейтралью, в которой нейтраль соединена через дугогасящий реактор, компенсирующий емкостный ток при возникновении однофазного замыкания на землю.

В зарубежной технической литературе дугогасящий реактор чаще называют катушкой Петерсена – в честь немецкого ученого Петерсена, который в 1917 году предложил заземлять нейтраль через указанную катушку. На территории Украины и стран СНГ такие катушки чаще именуют дугогасящими реакторами, подчёркивая этим эффект самогашения дуги и перевода подавляющей части однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в самоликвидирующиеся.

Индуктивность дугогасящего реактора подбирается таковой, чтобы в контуре, образованном этой индуктивностью и суммарной емкостью фазных проводников относительно земли, возникал резонанс на промышленной частоте. Амплитуда тока замыкания на землю снижалась при этом настолько, что не было бы необходимости отключать сеть при замыканиях одной из её фаз на землю.

Для оценки эффективности работы сетей с компенсированной нейтралью при ОЗЗ на стадии разработки, модернизации или эксплуатации таких сетей требуется наличие соответствующих расчетных моделей, способных моделировать работу указанных сетей с учетом параметров линий и параметров оборудования, компенсирующего ток нейтрали.

**Цель работы** заключается в разработке расчетной модели электрической сети напряжением 20 кВ с тремя фидерами и компенсированной нейтралью, которая будет имитировать процессы и появление компонент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю. Для решения поставленной задачи был выбран прикладной пакет математического моделирования Matlab. Данную модель можно применить при решении практических задач, подставив параметры реальной электрической сети.

**Однофазные замыкания на землю.** Как уже было отмечено выше, в отечественных энергосистемах электрические сети средних напряжений могут работать с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через большое индуктивное сопротивление

дугогасящего реактора (ДГР), а также с заземлением через большое активное сопротивление.

В отличие от сети с глухозаземленной нейтралью, однофазное замыкание в сети с изолированной и компенсированной нейтралью не сопровождается появлением больших токов короткого замыкания, поскольку ток повреждения замыкается на землю через очень большие сопротивления емкостей фаз сети.

Особенно часто однофазные замыкания на землю возникают на воздушных линиях из-за характера их конструкции, но проблема также актуальна и для кабельных линий. Однофазные замыкания на землю в сетях среднего напряжения составляют основную часть аварийных событий [3] (см. рис. 1).

При замыкании на землю одной из фаз в системе с изолированной нейтралью путь для тока, идущего в землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли.

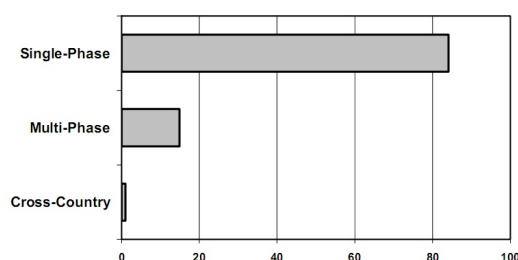


Рис. 1. Статистика однофазных и мультифазных коротких замыканий, за год в сетях 6-10 кВ (в %)

Пусть в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока, произошло замыкание на землю фазы А (рис. 2) Распределенные вдоль линии емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны; при этом отметим, что их влияние на ток замыкания на землю очень мало [2]. Путь циркуляции тока замыкания на землю указан стрелками. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами других двух фаз на данном участке линии. Характер векторных диаграмм токов слева и справа от места замыкания показан на том же рисунке.

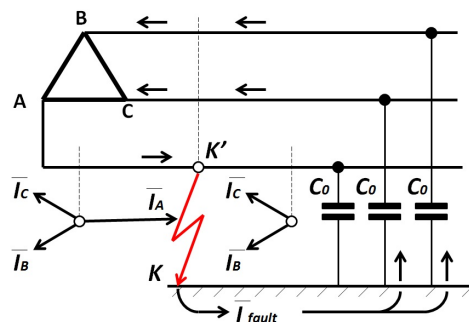


Рис. 2. Принципиальная схема сети при ОЗЗ

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока ОЗЗ пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Кроме того, так как этот ток относительно мал, при его нахождении можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным. При таких допущениях ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением  $r_d$  будет:

$$I_K = 3 \frac{U_{\phi, cp}}{3r_d - jx_{C_0\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $x_{C_0\Sigma}$  – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов (практически только линий и кабелей), электрически связанных с точкой замыкания;

$U_{\phi, cp}$  – среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается ОЗЗ.

Наибольшая величина тока ОЗЗ имеет место, разумеется, при металлическом замыкании ( $r_d = 0$ ) и согласно рис. 2 составляет:

$$I_K = 3j \frac{U_{\phi, cp}}{x_{C_0\Sigma}}, \quad (2)$$

т.е. она в 3 раза превышает емкостной ток на землю одной фазы в нормальных условиях.

Для грубой оценки порядка величины тока ОЗЗ может служить упрощенная формула:

$$I_K = \frac{\sqrt{3}U_{cp} \cdot l}{N}, \quad (3)$$

где  $U_{cp}$  – среднее номинальное напряжение той ступени, где рассматривается ОЗЗ;

$N$  – коэффициент, принимаемый для воздушных линий 350 и для кабельных – 10;

$l$  – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Для симметричных составляющих напряжений за сопротивлением дуги при принятых допущениях имеем:

$$U_{K'A1} = U_{\phi, cp} \quad (4)$$

$$U_{K'A2} = 0 \quad (5)$$

$$U_{K'0} = 3 \frac{jx_{C_0\Sigma}}{3r_d - jx_{C_0\Sigma}} \cdot U_{\phi, cp} \quad (6)$$

На рис. 3 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте ОЗЗ фазы А. Они построены при указанных допущениях. С изменением сопротивления дуги  $r_d$  концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей, как показано пунктиром. Треугольник линейных напряжений остаётся без изменений и лишь перемещается параллельно самому себе в соответствии перемещением его центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Неизменность линейных напряжений, в частно-

сти обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при ОЗЗ. С уменьшением сопротивления дуги напряжение повреждённой фазы стремится к нулю, а напряжение неповрежденных фаз – к соответствующим линейным напряжениям.

Комплексная схема при ОЗЗ представлена на рис. 4. Здесь помимо емкостных сопротивлений введены индуктивные сопротивления линии и трансформатора и сопротивление дуги.

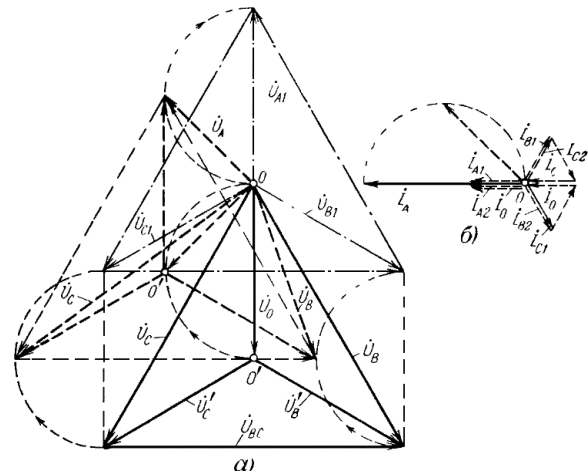


Рис. 3. Векторные диаграммы в месте ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью: а – напряжений; б – токов

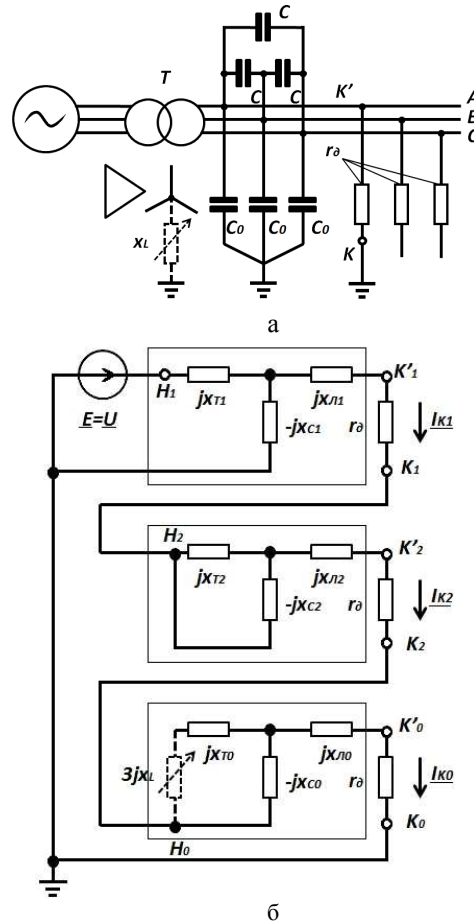


Рис. 4. Комплексная схема при ОЗЗ: а – исходная схема; б – схема замещения

Из приведенной схемы непосредственно следует, что для ограничения тока ОЗЗ целесообразно нейтраль трансформатора заземлить через индуктивную катушку с реактивным сопротивлением  $x_L$  (как показано пунктиром). Индуктивность такой катушки можно выбрать так, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведет к полной компенсации тока ОЗЗ. Пренебрегая реактивностью трансформатора, найдём, что данное условие будет выполнено при:

$$x_L = x_{C0\Sigma} / 3. \quad (7)$$

Такие катушки называют дугогасящими реакторами (катушками Петерсена). Их выполняют с возможностью регулирования индуктивности, для того чтобы производить их настройку при изменениях параметров защищаемой сети.

Обычно стремятся снизить ток ОЗЗ до величины, при которой создаются благоприятные условия для самопогасания дуги, возникшей при таком замыкании. Опытным путём установлено, что для обеспечения этого необходимо, чтобы ток замыкания на землю не превышал [2]: при 6 кВ – 30 А, при 10 кВ – 20 А, при 15-20 кВ – 15 А, при 35 кВ – 10 А.

**Установка компенсации емкостных токов** состоит из двух основных элементов. Первый из них – трансформатор, назначением которого является выделение из трехфазной сети потенциала нейтрали. Он представляет собой силовой трансформатор, у которого первичная обмотка соединена в звезду с нулевым выводом, а вторичная – в треугольник. Нейтраль звезды соединяется с землей через дугогасящий реактор (катушку Петерсена).

По способу регулирования тока компенсации современные дугогасящие реакторы разделяются на четыре основных вида:

- с переключением ответвлений обмотки (ступенчато-регулируемые реакторы);
- с изменением зазоров в магнитной системе (плунжерные реакторы);
- с изменением индуктивности подмагничиванием постоянным током;
- с одной силовой и одной вспомогательной обмоткой для подключения блока конденсаторных батарей (статические реакторы).

В такой установке при отсутствии замыкания ток через катушку Петерсена минимален. Предварительно ее настраивают в резонанс с общей емкостью сети. На устройствах со ступенчатой регулировкой это выполняется довольно приближенно и грубо. Если суммарное емкостное сопротивление сети больше, чем индуктивное сопротивление катушки, этот режим работы называется недокомпенсацией, если ситуация противоположная – перекомпенсацией.

В виду того, что емкостное сопротивление сети изменяется в зависимости от подключенных к ней фидерных линий, установка компенсации емкостных токов требует соответствующей корректировки настройки катушки Петерсена. За этим в современных катушках как правило следит автоматика.

Помимо основного электрооборудования в состав установки компенсации емкостных токов, входят и вспомогательные элементы. Это трансформатор тока, служащий для измерения тока замыкания на землю, специальная обмотка для выделения нулевой последовательности, именуемая  $3U_0$ .

**Работа установки компенсации емкостных токов.** При ОЗЗ в точку короткого замыкания (КЗ) течет емкостной ток сети  $I_C$ , который может вызывать электрическую дугу в месте замыкания [4]:

$$I_C = \frac{3U_{ph}}{X_C}, \quad (8)$$

где  $U_{ph}$  – фазное напряжение;

$X_C$  – эквивалентное емкостное сопротивление сети.

При наличии установки компенсации в место КЗ течёт и ток через дугогасящую катушку  $I_L$ .

$$I_L = \frac{U_{ph}}{\omega L}, \quad (9)$$

где  $L$  – индуктивность катушки Петерсена;

$\omega$  – угловая частота ( $\omega = 2\pi f$ ), зависящая от частоты сети –  $f$ .

В точке КЗ ток катушки компенсирует емкостной ток сети, снижая или сводя к минимуму ток в поврежденной фазе. Поэтому для нейтрализации аварийного тока запишем равенство  $I_L = I_C$ . Следовательно

$$\frac{U_{ph}}{\omega L} = \frac{3U_{ph}}{X_C}. \quad (10)$$

Проведя некоторые преобразования равенства (10), получаем формулу индуктивности катушки Петерсена для резонансного заземления:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C}, \quad (11)$$

где  $L$  – индуктивность катушки Петерсена;

$C$  – эквивалентная ёмкость сети.

Для установки разных уровней компенсации лучше использовать формулу:

$$L = \frac{k}{3\omega^2 C}, \quad (12)$$

где  $k$  – коэффициент компенсации:

$$k = I_L / I_C. \quad (13)$$

Результирующий аварийный ток равен:

$$I_{res} = I_L - I_C. \quad (14)$$

При этом дуговое замыкание при переходе синусоидального напряжения КЗ через ноль гаснет. Для повторного зажигания дуги напряжения оказывается недостаточно. Так минимизируются все вредные воздействия замыкания на землю на всю сеть целиком.

Чтобы сделать защиту от ОЗЗ максимально эффективной, современные катушки Петерсена содержат в своем составе резистор с заранее рассчитанной величиной сопротивления. В момент замыкания контактором он подключается в цепь катушки на ограниченное время, достаточное для срабатывания релейной защиты. Так нейтраль кратковременно приобретает резистивное заземление.

За счет ввода активной составляющей тока замыкания на землю произойдет отключение только линии, подпитывающей КЗ.

Но в реальных энергосистемах чаще всего случается, что ёмкости фаз фидеров различаются в зависимости от их местоположения в пространстве, относительно друг друга. Линии, питающие потребителей, могут загружаться неравномерно, что приводит к нарушению симметрии системы и возникновению потенциала в нейтральном проводнике вспомогательного трансформатора установки компенсации емкостных токов.

Такие асимметричные режимы могут приводить к чрезмерной работе дугогасительных реакторов и даже к появлению резонансных схем. Чтобы исключить такие ситуации, допускается работа электросети в недокомпенсированном режиме.

**Моделирование и симуляция сети напряжением 20 кВ с компенсированной нейтралью в прикладном пакете Matlab.** Однолинейная схема трехфазной электрической сети показана на рис. 5. Она представляет собой источник питания напряжением 110 кВ и полной мощностью 1ГВА. Соотношение реактивного сопротивления включения к активному равно 7. Далее по схеме включен силовой трансформатор 110/20 кВ с обмотками, имеющими соединение звезда-треугольник. К вторичной обмотке силового трансформатора подсоединён вспомогательный трансформатор 20/0,4 кВ, имеющий соединение обмоток звезда с нейтралью-треугольник. К нейтральному выводу первичной обмотки вспомогательного трансформатора подсоединяется плунжерный дугогасительный реактор (катушка Петерсена), имеющий активное сопротивление 50 мОм и переменную величину индуктивности, настраиваемую в зависимости от значения общей ёмкости сети. Также от силового трансформатора отходит 3 фидерных линии различной длины и с различной мощностью потребителей. Длина фидеров устанавливается из соотношения, что ток утечки на каждый км линии будет распределяться как  $I_{feeder}=[0.6 \ 0.3 \ 0.1]$  (исходя из этого условия в Matlab рассчитываются длины фидерных линий), а общий ток утечки будет равен 100 А. Фидеры представляют собой кабельные линии, параметры которых взяты из каталога производителя Nexans [5] и представлены на рис. 6.

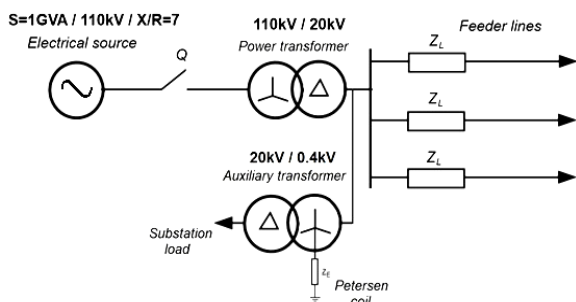


Рис. 5. Схема электрической сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

Nominal cross-sectional area	mm <sup>2</sup>	3x70	3x95
Diameter over conductor	mm	9.8	11.5
Approximate diameter over insulation	mm	22	23.7
Approximate overall diameter	mm	71	75
Approximate weight of cable	kg/m	8200	9500
Minimum bending radius (static)	mm	850	900
Maximum pulling tension on cable	kg	1050	1425
Maximum DC resistance @ 20°C	Ω/km	0.2680	0.1930
Maximum AC resistance @ 90°C	Ω/km	0.3420	0.2470
Inductance	mH/km	0.388	0.369
Reactance @ 50Hz	Ω/km	0.122	0.116
Impedance @ 50Hz @ 90°C	Ω/km	0.363	0.273
Maximum capacitance (C)	μF/km	0.2	0.233
Maximum charging current	A/km	0.8	0.89
<b>Short circuit ratings</b>			
1 second short circuit-rating of conductor (90 to 250°C)	kA	9.7	13.5
1 second short circuit-rating of metallic screen (80 to 200°C)	kA	9.7	13.5
<b>Continuous current carrying capacity (as per conditions detailed below)</b>			
Direct buried	Amps	255	295
Single way ducts	Amps	225	260
In air	Amps	275	330

Рис. 6. Параметры кабелей фидерных линий

Схема моделирования представлена на рис. 7. Она включает в себя:

- незаземленный трехфазный источник питания, мощность 1ГВА, отношение X/R равно 7, частота источника питания равна 50 Гц;
- трехфазные измерительные блоки напряжения и тока;
- трехфазный силовой трансформатор с соединением звезда-треугольник;
- блоки линий электропередач с распределенными параметрами, где мы можем задать параметры фидерных линий, используя один из предложенных методов. В данной модели устанавливаются параметры кабельной линии [6] с использованием сопротивлений положительной и нулевой последовательности, а также аналогично индуктивности и емкости. Первая фидерная линия состоит из двух секционных линий – это позволяет установить в параметрах местоположение неисправности;
- нагрузку сети с различными параметрами;
- однофазный выключатель для имитации замыкания на землю;
- вспомогательный трансформатор с соединением звезда с нейтралью-треугольник. Он имеет более низкую мощность по сравнению с силовым трансформатором и его первичная обмотка необходима для выделения нейтрали и подключения катушки Петерсена к компенсированной цепи. Вторичная обмотка этого трансформатора может остаться вовсе не нагруженной или может быть подключена маломощная нагрузка для собственных нужд подстанции (например, освещение);
- последовательная RL-цепь, используется для моделирования катушки Петерсена. Активное сопротивление этой катушки постоянное и равно 50 мОм. Индуктивность этой катушки является переменной величиной и зависит от емкостных токов компенси-

рованной электрической сети.

Все параметры блоков могут быть установлены с использованием m-кода и созданием файла «.m», который мы должны выполнить до начала моделирования. Но также необходимо установить параметры в свойствах блоков, используя ключевые слова или имена значений из m-файла.

Для обработки сигналов и получения данных от измерительных блоков необходимо построить измерительную схему, показанную на рис. 8, которая, по сути является частью модели цифрового реле [7]. Измерительная схема в себя включает:

- блок создания шины, который собирает все сигналы из блоков измерения и помещает их в одну шину;
- блок цифровой обработки сигналов, представляющий подсистему, показанную на рис. 9 [7];

- блок рабочей области, который необходим для загрузки данных из Simulink в рабочее пространство Matlab для автоматического моделирования;

- блок селектор шины, используемый для распределения сигналов от общей шины к отдельным шинам;

- блоки Abs – для получения абсолютного значения сигнала;

- блоки перехода между частотами - используются между двумя доменами с разными периодами выборки, для их соединения;

- блоки выбора – для выбора одной из трех компонент последовательностей, в нашем случае это нулевая последовательность;

- блоки усиления – необходимы для усиления сигнала по некоторому коэффициенту; которые используются для получения выходных данных.

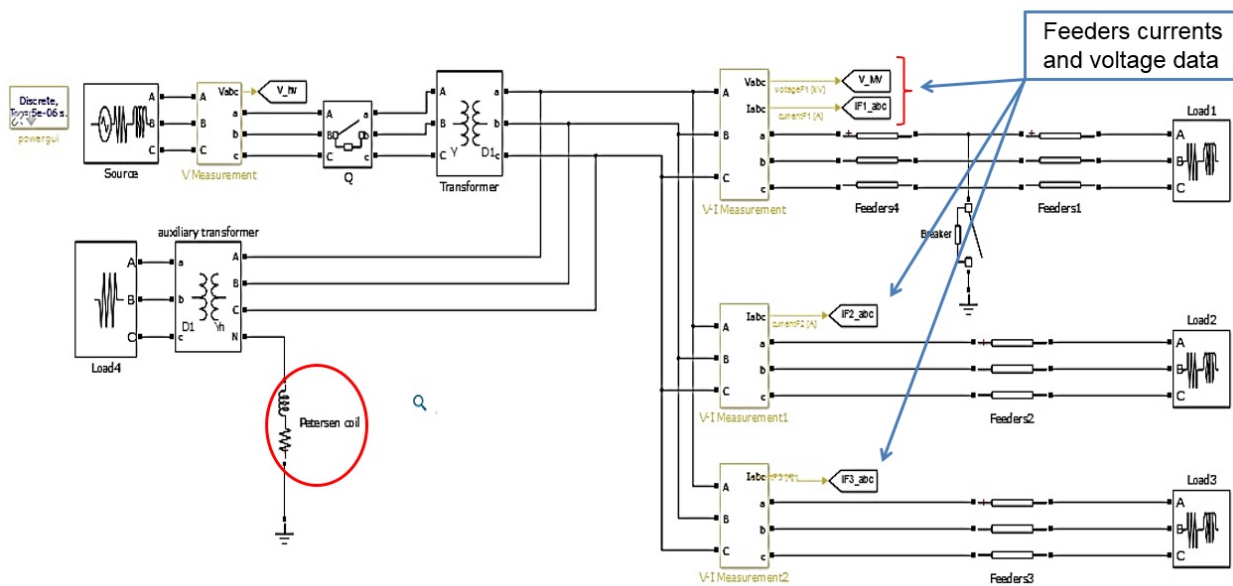


Рис. 7. Matlab-модель сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

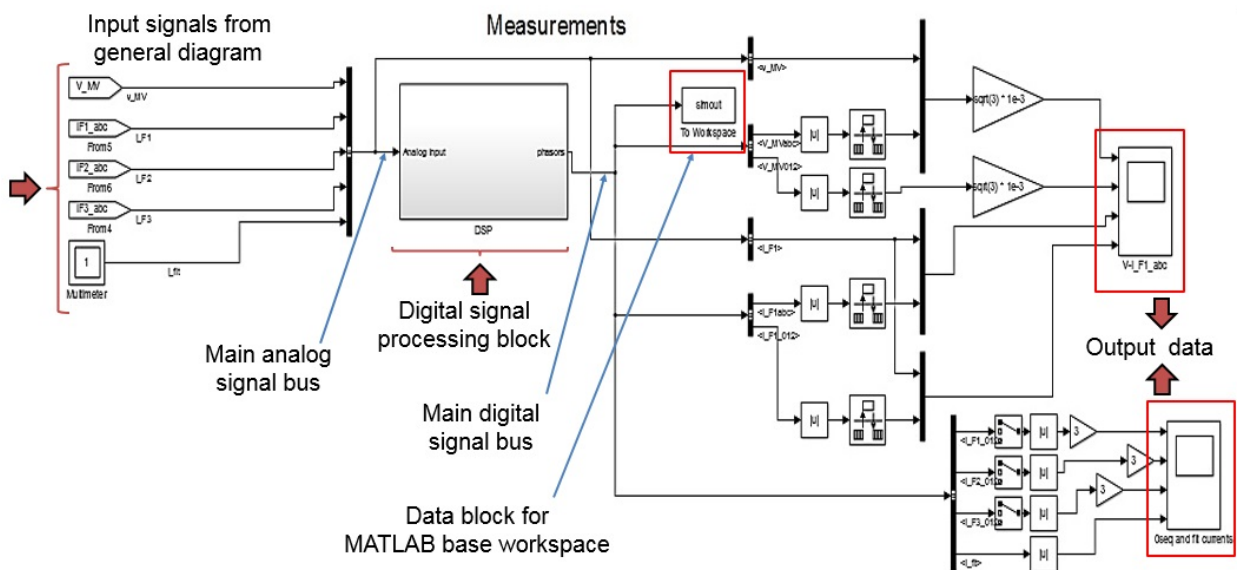


Рис. 8. Matlab-модель измерительной цепи сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

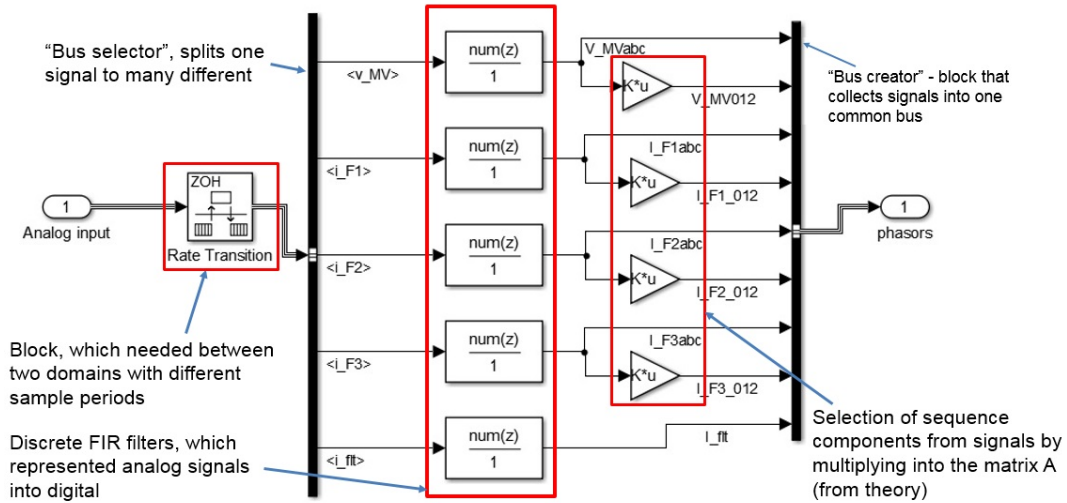


Рис. 9. Matlab-модель блока цифровой обработки сигналов

**Результаты моделирования.** Перед началом моделирования был выбран дискретный алгоритм, а время окончания моделирования составляло 0.5 с, заданное время выборки для  $T_s=5e-6$  с с блоком «Powergui». Замыкание фазы А первого фидера на землю происходит через 0.1 с.  
После симуляции расчетной модели компенсированной электрической сети 20 кВ в режиме замыка-

ния на землю были получены напряжения фидеров со стороны 20 кВ, симметричные составляющие напряжения фидеров, токи вторичной обмотки трансформатора, токи первого фидера, симметричные составляющие токов первого фидера, аварийный ток и осциллограммы токов нулевой последовательности фидеров, которые представлены на рис. 10-13.

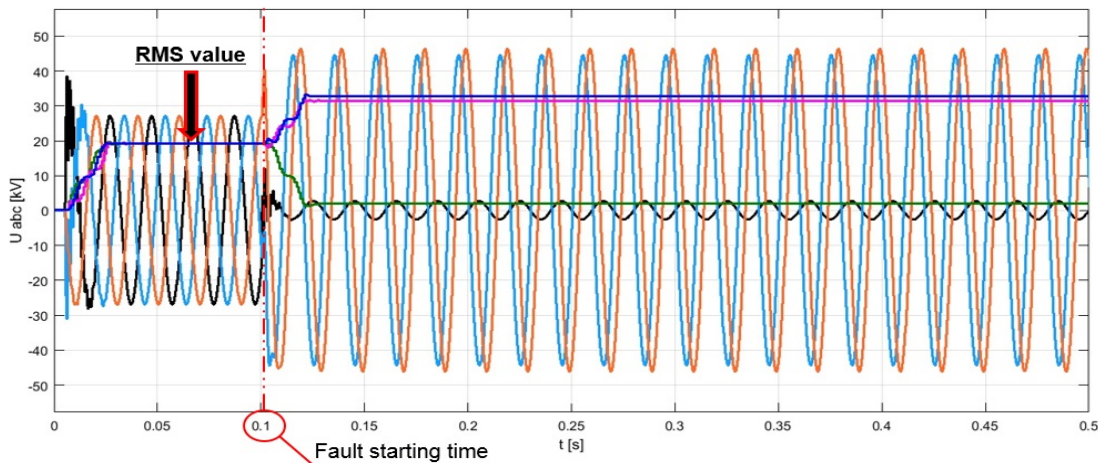


Рис. 10. Аварийный режим. Напряжение фидеров, амплитуда и среднеквадратичные значения

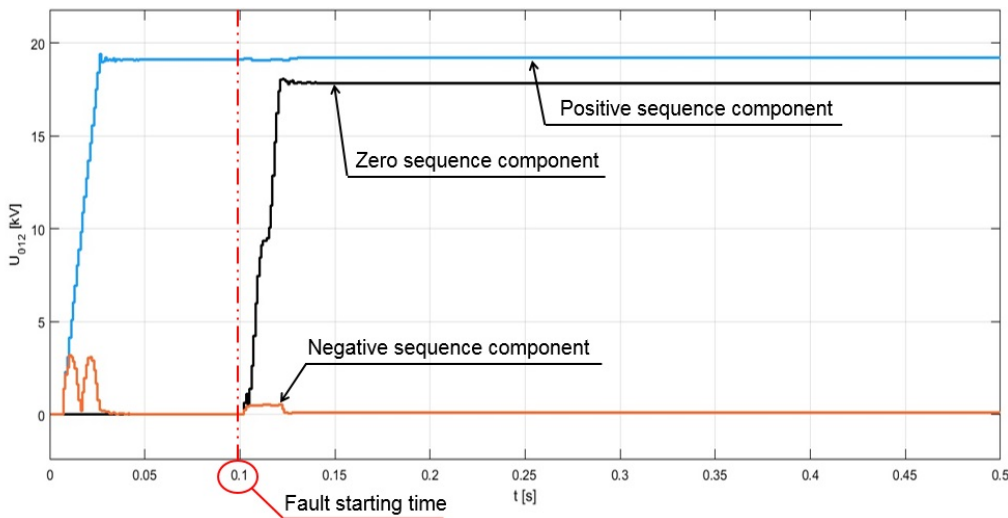


Рис. 11. Аварийный режим. Симметричные составляющие напряжения фидеров

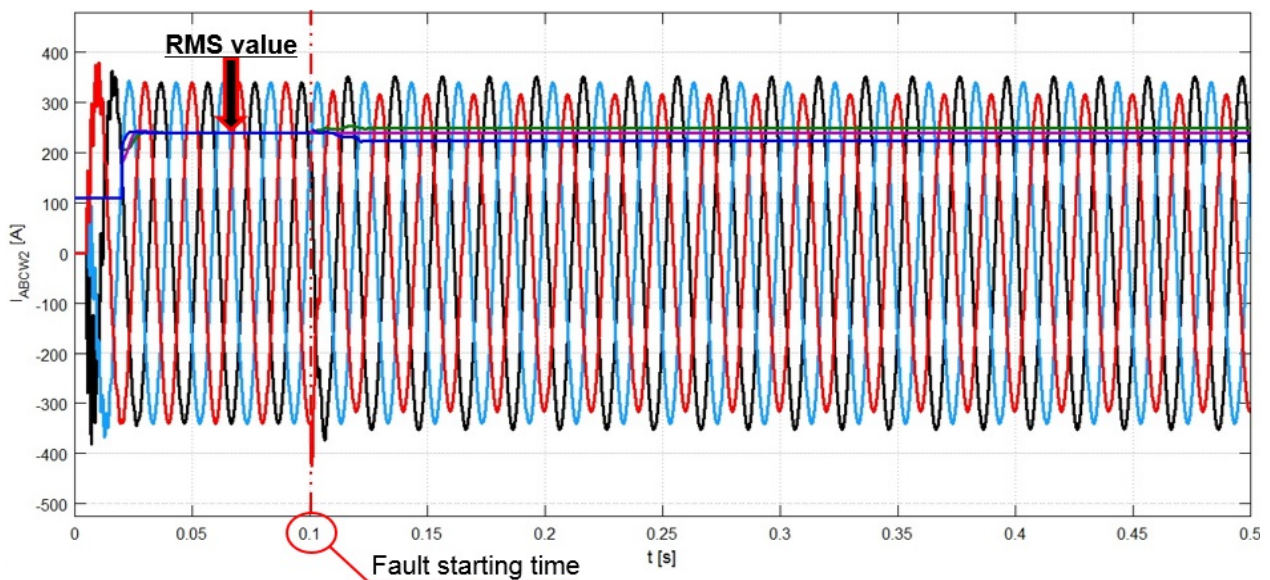


Рис. 12. Аварийный режим. Токи вторичной обмотки трансформатора, амплитуда и среднеквадратичное значения

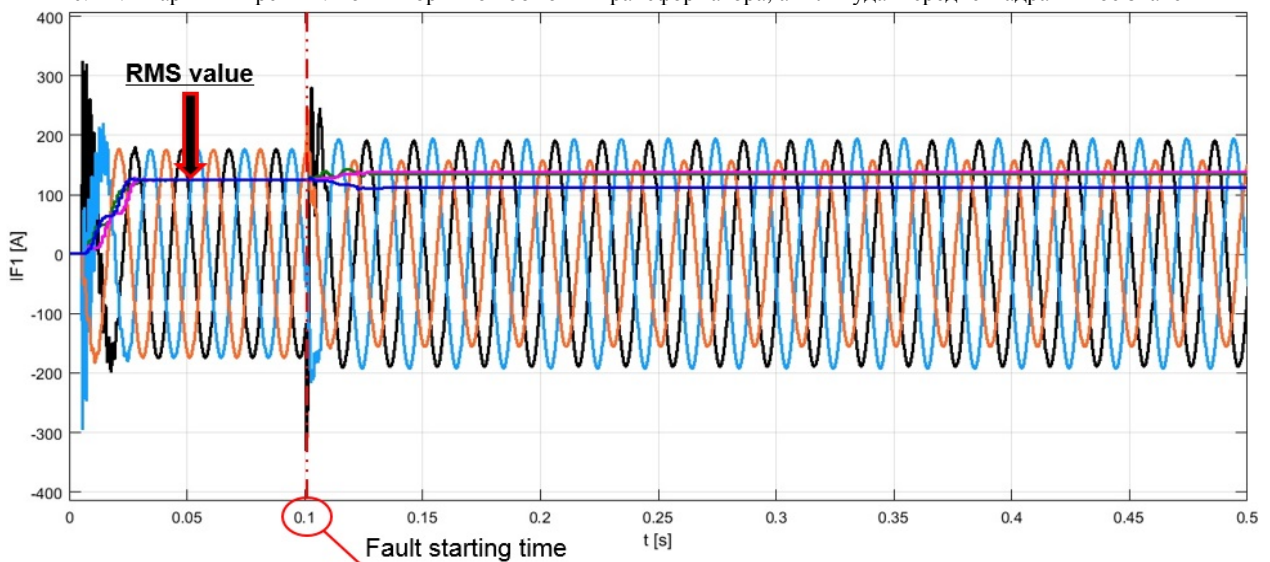


Рис. 13. Аварийный режим. Токи первого фидера, амплитуда и среднеквадратичное значения

На основании анализа полученных зависимостей сделаны следующие выводы.

Когда происходит ОЗЗ, во всей силовой системе появляется напряжение нулевой последовательности (см. рис 11).

Для поврежденной линии (1-й фидер) значение тока нулевой последовательности является суммой емкостных токов неповрежденных линий (2-го и 3-го фидеров) – рис. 14, а.

При ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью нет влияния на токи первичной обмотки трансформатора.

В сети с компенсированной нейтралью поврежденная линия может работать некоторое время с ОЗЗ, которое регламентируется техническими требованиями [1], до устранения неисправности. Линейные напряжения при этом остаются без изменений.

Из рис. 10 следует, что после однофазного замыкания фазы А на землю (в момент времени 0.1 с) фазное напряжение стремится к нулю, остаточное напряжение вызвано сопротивлением сети, в это время ранее

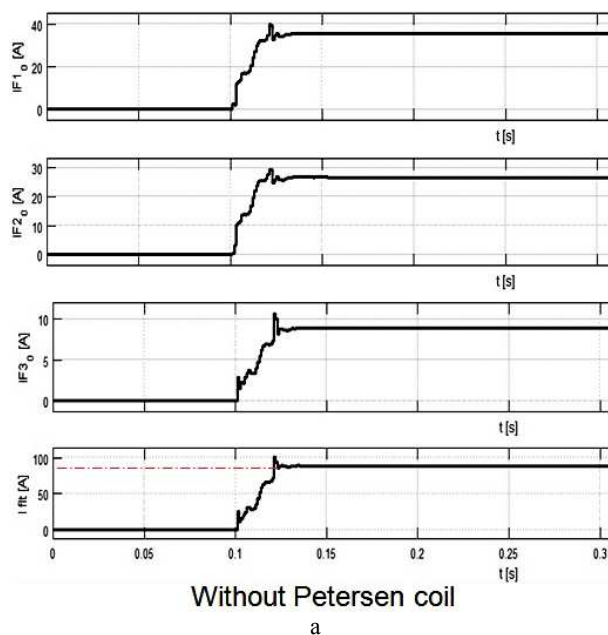
симметричная трехфазная система переходит в не симметричный режим. В нейтральной точке появляется потенциал (см. векторную диаграмму рис. 3), остальные два напряжения между фазами (фаза В и фаза С) увеличиваются до  $\sqrt{3}$  раз (линейное напряжение).

На рис. 14 представлены результаты моделирования аварийных токов и токов нулевой последовательности фидеров в сети без компенсации тока в нейтрали (а), и с его компенсацией катушкой Петерсена (б) – токи повреждения в этих режимах соответственно около 80 А и 4 А (нижние графики). Эти результаты моделирования наглядно демонстрируют работу катушки Петерсена: разница заключается в наличии индуктивного тока  $I_L$  в точке КЗ. Аварийный ток состоит из переходного емкостного тока и переходного индуктивного тока.

Для неповрежденных фидерных линий ток нулевой последовательности является их собственным емкостным током потерь. Ток нулевой последовательности опережает напряжение нулевой последовательности на 90 градусов. При использовании заземления нейтрали



через катушку Петерсена токи нулевой последовательности, которые текут через аварийную линию и неповреждённые линии все еще остаются их собственными емкостными токами потерь. При использовании избыточной компенсации направление емкостного тока совпадает с направлением тока в неповрежденной линии (см. рис. 2). Поэтому в этих случаях очень трудно определить повреждённую линию точно.



С использованием автоматических циклов симуляции удалось получить зависимости, показанные на рис. 15, которые позволяют оценить аварийный ток при различных уровнях компенсации катушки Петерсена с учетом и без учета индуктивности рассеяния вспомогательного трансформатора.

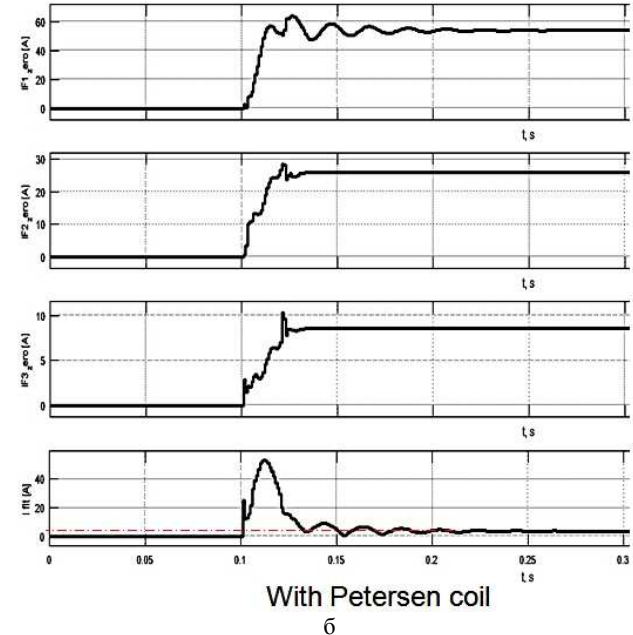


Рис. 14. Режим ОЗЗ. Сравнение осциллограмм аварийных токов и токов нулевой последовательности фидеров в сетях: а – с изолированной нейтралью; б – компенсированной катушкой Петерсена нейтралью

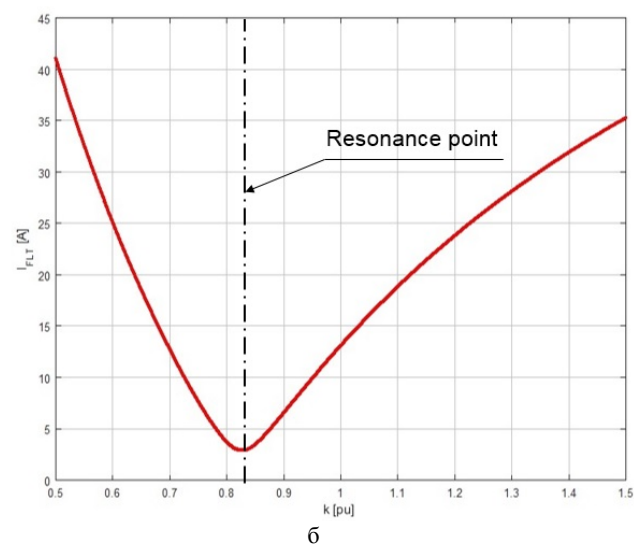
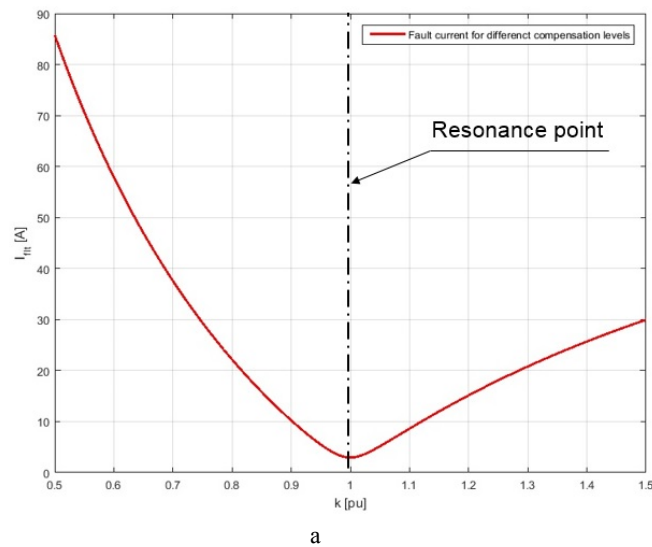


Рис. 15. Графики зависимостей аварийного тока от различных уровней компенсации катушки Петерсена: а – без учета влияния индуктивности рассеяния вспомогательного трансформатора; б – с учетом влияния индуктивности рассеяния вспомогательного трансформатора

**Выводы.**

1. Разработана расчетная модель электрической сети напряжением 20 кВ с тремя фидерами и компенсированной нейтралью в среде математического моделирования Matlab. Указанная модель базируется на положениях теории метода симметричных составляющих, что позволяет имитировать появление компо-

нент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю.

2. Проведено имитационное моделирование сети с компенсированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю, результаты которого проиллюстрированы соответствующими осциллограммами и

зависимостями напряжений и токов. По результатам моделирования проанализирована работа системы компенсации аварийного тока в режиме однофазного замыкания на землю.

3. Предложенная расчетная модель может быть использована при разработке новых и модернизации существующих сетей среднего напряжения с компенсированной нейтралью для оценки эффективности их работы в режиме однофазного замыкания на землю и с целью наиболее рационального выбора соответствующего защитного оборудования и алгоритмов его работы.

#### Список литературы

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Мінергоугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М., «Энергия», 1970. – 520 с.
3. ABB Distribution Automation Handbook Section Feeder EF Protection 757287 ENa.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие 7-е изд., СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.
5. <http://www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%2003-2010.pdf>.
6. <https://www.mathworks.com/support>.
7. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control - W. Rebizant, et al., (Springer, 2011) BBS.
8. Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.
9. A.H. Osman and O.P. Malik, "Transmission line protection based on wavelet transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.19, No.2, pp.515-523, April 2004.
10. B. Das and J.V. Reddy, "Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, pp. 609-616, April 2005.

#### References (transliterated)

1. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. – Vidannya ofitsiynе. Minenergovugillya Ukraini. – H.: Vidavnistvo «Fort», 2017. – 760 s.
2. Ulyanov S.A. Elektromagnitnyie perehodnyie protsessyi v elektricheskikh sistemah. Uchebnik dlya elektrotehnicheskikh i energeticheskikh vuzov i fakultetov. M., «Ener giya», 1970. – 520 s.
3. ABB Distribution Automation Handbook Section Feeder EF Protection 757287 ENa.
4. Atabekov G.I. Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki. Lineynye elektricheskie tsepi: Uchebnoe posobie 7-e izd., SPb.: Izdatelstvo «Lan», 2009. – 592 s.
5. <http://www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%2003-2010.pdf>.
6. <https://www.mathworks.com/support>.
7. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control - W. Rebizant, et al., (Springer, 2011) BBS.
8. Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.
9. A.H. Osman and O.P. Malik, "Transmission line protection based on wavelet transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.19, No.2, pp.515-523, April 2004.
10. B. Das and J.V. Reddy, "Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, pp. 609-616, April 2005.

Поступила (received) 10.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Зорін Євген Юрійович (Зорин Евгений Юрьевич, Zorin Yevgeniy Yur'yevich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

**Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Cherepyuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.