

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

### ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Ю.Д. КУТУМОВ, В.В. ТЮТИКОВ, Т.Ю. ШАДРИКОВА, В.А. ШУИН  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: rza@rza.ispu.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В распределительных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, для защиты от замыканий на землю широкое применение получили токовые направленные защиты нулевой последовательности. По данным эксплуатации, основным недостатком токовых направленных защит нулевой последовательности является не всегда достаточная динамическая устойчивость функционирования в условиях влияния на работу защиты переходных процессов при наиболее опасных для сети замыканиях через перемежающуюся дугу. В то же время известно, что большая часть замыканий на землю в сетях 6–10 кВ прежде всего в начальной стадии развития повреждения изоляции имеет дуговой перемежающийся характер. Отказы функционирования токовых направленных защит нулевой последовательности при дуговых замыканиях снижают эксплуатационную надежность защищаемой сети и, как следствие, надежность электроснабжения потребителей. В настоящее время разработки новых устройств релейной защиты электроэнергетических систем, включая защиты от замыканий на землю распределительных электрических сетей среднего напряжения, выполняются только на микропроцессорной базе. В связи с этим выбор и обоснование принципов выполнения цифровых исполнений токовых направленных защит нулевой последовательности, обеспечивающих высокую динамическую устойчивость функционирования, являются актуальной задачей.

**Материалы и методы.** При исследованиях динамической устойчивости функционирования цифровых токовых направленных защит нулевой последовательности с учетом сложности переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, применялось имитационное моделирование в системе Matlab с пакетами расширения SimPowerSystem и Simulink. В рамках данного исследования в качестве главного фактора, оказывающего влияние на динамическую устойчивость функционирования токовых направленных защит нулевой последовательности, рассматривались только переходные токи и напряжения, влияние других факторов, например погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, схемы формирования сравниваемых величин и др., в имитационных моделях не учитывалось.

**Результаты.** На основе исследований установлены причины возможных отказов функционирования цифровых токовых направленных защит от замыканий на землю в динамических режимах функционирования. Показано, что использование в токовых направленных защитах ортогональных составляющих рабочей частоты напряжения и тока нулевой последовательности позволяет исключить отказы их функционирования при любой разновидности дуговых замыканий на землю.

**Выводы.** Для обеспечения высокой динамической устойчивости функционирования в условиях влияния переходных процессов при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу токовые направленные защиты от данного вида повреждений должны выполняться на основе контроля фазных соотношений составляющих рабочей частоты 50 Гц напряжения и тока нулевой последовательности, а не их полных значений.

**Ключевые слова:** электрические сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, токовая направленная защита, динамическая устойчивость функционирования

## DYNAMIC STABILITY OF THE FUNCTIONING OF CURRENT EARTH FAULT DIRECTIONAL PROTECTION IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

Yu.D. KUTUMOV, V.V. TYUTIKOV, T.Yu. SHADRIKOVA, V.A. SHUIN  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: rza@rza.ispu.ru

### Abstract

**Background.** In distribution 6–10 kV networks with an insulated neutral for earth fault protection, zero sequence current directional protection devices are commonly used. According to the operation data, the main disadvantage of such kind of protection is the possibility of their functioning failures in transient conditions with the most dangerous for network intermittent arc earth faults. It is known that most earth faults in 6–10 kV networks, primarily in the initial stage of insulation damage, have an intermittent arc. Operation failures of zero sequence current directional protection in case of arc faults reduce the operational reliability of the protected network and, as a result, the reliability of power supply to consumers. Nowadays, new developments of electrical power systems relay protection devices, including earth fault protection of medium voltage distribution electrical networks, are implemented only on a microprocessor base. Therefore, the selection and justification of the implementation principles of zero sequence current directional protection which can provide high dynamic stability of functioning is a relevant objective.

**Materials and Methods.** When analyzing the dynamic stability of the functioning of zero sequence directional current protection, regarding the complexity of transients during intermittent arc earth faults in medium voltage electrical networks with an isolated neutral, the simulation in Matlab using SimPowerSystem and Simulink was carried out. This study focuses on transient currents and voltages as the main factor influencing dynamic stability of the functioning of zero sequence current directional protection. The impact of other factors, for example, the inaccuracies of the primary zero sequence current and voltage transducers, the scheme of formation of compared quantities, etc. was not taken into account in simulation models.

**Results.** The study has allowed determining the causes of possible functioning failures of digital current earth fault directional protection in dynamic operation modes. It has been shown that the usage of orthogonal components of fundamental frequency of zero sequence voltage and current in current directional protection devices eliminates the failure of their operation with any kind of arc earth faults.

**Conclusions.** To ensure high dynamic stability of operation under the influence of transients during arc intermittent earth faults, current directional protection for this type of damage should be performed on the basis of monitoring the phase relationships of the fundamental frequency components of 50 Hz of zero sequence voltage and current, but not their full values.

**Key words:** 6–10 kV electric networks with an insulated neutral, single phase earth faults, current directional protection, dynamic stability of functioning

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041

**Введение.** В распределительных электрических сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) наиболее широкое применение получили простые и надежные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) [1–6]. Область возможного применения ТЗНП по условиям обеспечения селективности при внешних и чувствительности при внутренних

ОЗЗ ограничивается присоединениями, собственный емкостный ток которых  $I_{C \text{собс}}$  не превышает ~15–20% от величины суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma}$  [2, 4]. На присоединениях, имеющих  $I_{C \text{собс}^*} = I_{C \text{собс}} / I_{C\Sigma} > 0,15-0,2$ , должны применяться токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП), селективность и чувствительность которых не зависит от величины  $I_{C \text{собс}^*}$ . Основным недостатком ТНЗНП, по данным экс-

плутации, является возможность отказов их функционирования (отказов срабатывания при внутренних и излишних срабатываниях при внешних замыканиях) при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ) [2, 4, 7, 8]. Причиной указанных отказов функционирования являются нарушения фазных соотношений между векторами напряжения  $\underline{U}_0(t)$  и тока  $\underline{I}_0(t)$  нулевой последовательности в переходных режимах ОЗЗ. В связи с этим выбор и обоснование принципов выполнения ТНЗНП, обеспечивающих высокую динамическую устойчивость функционирования (устойчивость в условиях влияния на работу защиты переходных процессов [9]), являются актуальной задачей.

**Принципы выполнения и характеристики срабатывания ТНЗНП.** При устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ) в сети с изолированной нейтралью вектор тока нулевой последовательности  $\underline{I}_0$ , имеющего практически чисто емкостный характер, в неповрежденных присоединениях опережает вектор напряжения нулевой последовательности  $\underline{U}_0$  на  $90^\circ$ , а в поврежденном – отстает на  $90^\circ$  (рис. 1,а).

На использовании указанных фазных соотношений между векторами  $\underline{U}_0$  и  $\underline{I}_0$  основан принцип действия большинства исполнений ТНЗНП. Характеристики срабатывания ТНЗНП принято представлять в комплексной плоскости сопротивлений

$\underline{Z}_0 = \frac{U_0}{I_0} = R_0 + jX_0$  (рис. 1,б и в). Область срабатывания ТНЗНП в комплексной плоскости  $\underline{Z}_0$  в общем случае ограничена двумя лучами с углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рис. 1,б). Практически в ТНЗНП для сетей с изолированной нейтра-

лью, как правило, используется характеристика срабатывания, показанная на рис. 1,в.

В настоящее время новые разработки устройств релейной защиты электроэнергетических систем, включая защиты от ОЗЗ распределительных электрических сетей среднего напряжения, выполняются только на микропроцессорной базе. Поэтому выбор наиболее эффективных принципов выполнения актуален, прежде всего, для современных цифровых исполнений ТНЗНП.

В цифровых измерительных органах направления мощности ТНЗНП наиболее широкое применение получили алгоритмы, основанные на выделении ортогональных составляющих сравниваемых дискретизированных величин  $\underline{U}_0(nT)$  и  $\underline{I}_0(nT)$  [9]:

$$\underline{U}_0(nT) = U_{0x}(nT) + jU_{0y}(nT); \quad (1)$$

$$\underline{I}_0(nT) = I_{0x}(nT) + jI_{0y}(nT), \quad (2)$$

где  $U_{0x}(nT)$ ,  $U_{0y}(nT)$  – текущие значения ортогональных составляющих вектора напряжения  $\underline{U}_0(nT)$ ;  $I_{0x}(nT)$ ,  $I_{0y}(nT)$  – текущие значения ортогональных составляющих вектора тока  $\underline{I}_0(nT)$ ;  $T$  – период дискретизации аналоговых сигналов  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$ ;  $n$  – целое число.

Условия срабатывания цифровой ТНЗНП с угловой характеристикой, показанной на рис. 1,б, описываются соотношением

$$\varphi_1 \leq \arg \frac{U_0(nT)}{I_0(nT)} = \arg \underline{Z}_0(nT) \leq \varphi_2. \quad (3)$$

Из (3) получим, что при  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = \pi$  (рис. 1,в) условия срабатывания имеют вид

$$0 \leq \arg \underline{Z}_0(nT) \leq \pi. \quad (4)$$

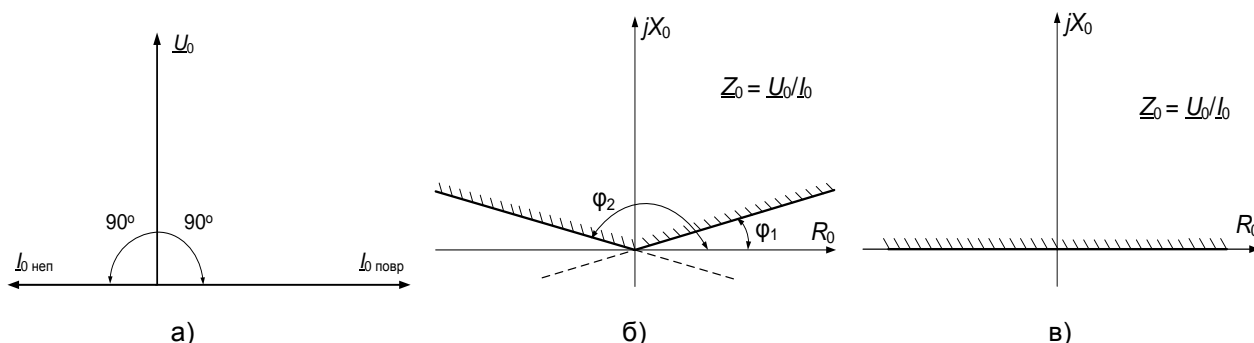


Рис. 1. Векторная диаграмма токов и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью (а) и характеристики срабатывания ТНЗНП в комплексной плоскости сопротивлений  $\underline{Z}_0$  (б, в): б – общий вид характеристики срабатывания при  $\varphi_1 > 0^\circ$ ;  $\varphi_2 < 180^\circ$  (штриховкой показана область срабатывания); в – простейшая характеристика срабатывания ( $\varphi_1 = 0^\circ$ ;  $\varphi_2 = 180^\circ$ )

Условие (4) означает, что при внутренних ОЗЗ вектор  $\underline{Z}_0(nT)$  должен находиться в верхней полуплоскости  $\underline{Z}_0$ , т.е. его мнимая составляющая всегда должна быть положительна. С учетом этого условие срабатывания ТНЗНП с характеристикой срабатывания, показанной на рис. 1, в, имеет вид

$$\operatorname{Im}[\underline{Z}_0(nT)] \geq 0. \quad (5)$$

Выразим  $\underline{Z}_0(nT)$  через ортогональные составляющие векторов  $\underline{U}_0(nT) = U_{0x}(nT) + jU_{0y}(nT)$  и  $\underline{I}_0(nT) = I_{0x}(nT) + jI_{0y}(nT)$ :

$$\underline{Z}_0(nT) = \frac{U_{0x}(nT) + jU_{0y}(nT)}{I_{0x}(nT) + jI_{0y}(nT)} = R_0(nT) + jX_0(nT). \quad (6)$$

Из (5) с учетом (6) после преобразований получим условие срабатывания ТНЗНП с угловой характеристикой, показанной на рис. 1, в:

$$U_{0y}(nT) \cdot I_{0x}(nT) - U_{0x}(nT) \cdot I_{0y}(nT) \geq 0. \quad (7)$$

При анализе эффективности функционирования ТНЗНП в переходных режимах при ДПОЗЗ, кроме конечного результата (срабатывание или несрабатывание защиты), особый интерес представляют точность и устойчивость замера воздействующей величины – угла  $\varphi(nT)$  между векторами напряжения  $\underline{U}_0(nT)$  и тока  $\underline{I}_0(nT)$ . Текущее значение угла  $\varphi(nT) = \arg[\underline{Z}_0(nT)]$  определяется из соотношения

$$\operatorname{tg}[\varphi(nT)] = \frac{X_0(nT)}{R_0(nT)}, \quad (8)$$

где

$$R_0(nT) = \frac{U_{0x}(nT) \cdot I_{0x}(nT) + U_{0y}(nT) \cdot I_{0y}(nT)}{I_{0x}^2(nT) + I_{0y}^2(nT)}; \quad (9)$$

$$X_0(nT) = \frac{U_{0y}(nT) \cdot I_{0x}(nT) - U_{0x}(nT) \cdot I_{0y}(nT)}{I_{0x}^2(nT) + I_{0y}^2(nT)}. \quad (10)$$

Условие (7) и выражения (8)–(10) определяют алгоритм измерительного органа направления мощности ТНЗНП, основанный на использовании ортогональных составляющих векторов тока и напряжения нулевой последовательности.

Рассмотренный алгоритм ТНЗНП может быть реализован с использованием двух подходов. Первый подход основан на использовании для действия защиты фазных соотношений между полными напряжением  $\underline{U}_0(nT)$  и током  $\underline{I}_0(nT)$  нулевой последовательности, второй подход – на использовании фазных соотношений составляющих ос-

новной (рабочей) частоты 50 Гц напряжения  $\underline{U}_{050}(nT)$  и тока  $\underline{I}_{050}(nT)$  нулевой последовательности.

Очевидно, что в установившемся режиме ОЗЗ (при УОЗЗ) при синусоидальном характере напряжения  $u_0(t)$  и тока  $i_0(t)$  оба варианта выполнения ТНЗНП будут работать одинаково. Различие в работе указанных вариантов выполнения ТНЗНП будет проявляться только в динамических режимах их функционирования, прежде всего, при ДПОЗЗ, сопровождающихся интенсивными переходными процессами, искажающими фазные соотношения между сравниваемыми величинами.

Ниже дается анализ динамической устойчивости функционирования цифровых ТНЗНП, основанных на использовании ортогональных составляющих векторов полных напряжения  $\underline{U}_0(nT)$  и тока  $\underline{I}_0(nT)$  нулевой последовательности и их составляющих основной частоты 50 Гц  $\underline{U}_{050}(nT)$  и  $\underline{I}_{050}(nT)$ .

**Материалы и методы.** При анализе динамической устойчивости функционирования ТНЗНП с учетом сложности переходных процессов при дуговых ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, применялось имитационное моделирование в системе Matlab с пакетами расширения SimPowerSystem и Simulink.

В России с изолированной нейтралью работают в основном распределительные кабельные и воздушные сети напряжением 6–10 кВ с суммарным емкостным током ОЗЗ  $I_{\Sigma}$ , не превышающим 20–30 А<sup>1</sup>. Волновые сопротивления кабельных линий 6–10 кВ значительно меньше волновых сопротивлений воздушных линий, поэтому в кабельных сетях ДПОЗЗ сопровождаются существенно большими амплитудами переходных токов и, соответственно, оказывают на устойчивость функционирования ТНЗНП большее влияние. С учетом этого исследования динамической устойчивости функционирования токовых направленных защит от ОЗЗ проводились на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ.

В рамках данного исследования в качестве главного фактора, оказывающего влияние на динамическую устойчивость

<sup>1</sup> Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. Утв. приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002 № 204. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

функционирования ТНЗНП, рассматривались только переходные токи и напряжения, влияние других факторов (например, погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, схемы формирования сравниваемых величин и др.) в имитационных моделях защиты от ОЗЗ не учитывалось.

**Исследование динамической устойчивости функционирования ТНЗНП, основанной на использовании фазных соотношений между полным напряжением и током нулевой последовательности.** Исследования проводились с использованием имитационной модели цифровой ТНЗНП, выполненной по схеме, представленной на рис. 2.

На схеме рис. 2 приняты следующие обозначения: АЦП<sub>u</sub>, АЦП<sub>i</sub> – аналого-цифровые преобразователи с частотой дискретизации сигналов  $f_d$ ; ФНЧ<sub>u</sub>, ФНЧ<sub>i</sub> – фильтры низкой частоты, обеспечивающие существенное подавление аналоговых сигналов напряжения  $u_0(t)$  и тока  $i_0(t)$  в диапазоне частот  $f > f_d/2$ ;  $F_{u1}$ ,  $F_{i1}$  – цифровые преобразователи, обеспечивающие вычисление ортогональных составляющих напряжения  $U_{0x}(nT)$  и  $U_{0y}(nT)$  и тока  $I_{0x}(nT)$  и  $I_{0y}(nT)$ ;  $F_{u2}$ ,  $F_{i2}$  – цифровые преобразователи, обеспечивающие вычисление текущего значения фазы напряжения  $\varphi_u(nT)$  и тока  $\varphi_i(nT)$ ;  $F_{u3}$ ,  $F_{i3}$  – преобразователи, обеспечивающие вычисление текущего среднеквадратичного значения напряжения  $U_0(t)$  и тока  $i_0(t)$ ;  $F_\varphi$  – преобразователь, формирующий текущее значение угла сдвига фаз между векторами полного напряжения  $\underline{U}_0(nT)$  и тока  $\underline{I}_0(nT)$  нулевой последовательности  $\varphi(nT) = \varphi_u(nT) - \varphi_i(nT)$ ;  $K_u$ ,  $K_i$  – компараторы,

реализующие функции пусковых органов ТНЗНП по напряжению и току нулевой последовательности; СС – схема сравнения фаз, реализующая заданную форму характеристики срабатывания ТНЗНП в комплексной плоскости сопротивлений  $\underline{Z}_0$  (рис. 1,б,в); И – логический элемент «И»; Т – элемент выдержки времени на срабатывание защиты.

В преобразователях  $F_{u1}$ ,  $F_{i1}$  для выделения ортогональных составляющих векторов напряжения  $\underline{U}_0(nT)$  и тока  $\underline{I}_0(nT)$ , вращающихся с частотой  $\omega_0 = 2\pi \cdot 50$ , использовались наиболее распространенные алгоритмы на основе трех и двух выборок [9]. При использовании указанных алгоритмов составляющие вектора напряжения  $U_{0x}(nT)$  и  $U_{0y}(nT)$  определяются по выражениям:

– для алгоритма трех выборок, взятых через время  $T$

$$U_{0x}(nT) = \frac{N}{4\pi} u_0(nT) - \frac{N}{4\pi} u_0(nT - 2T); \quad (11)$$

$$U_{0y}(nT) = u_0(nT - T); \quad (12)$$

– для алгоритма двух выборок, взятых через время  $mT$

$$U_{0x}(nT) = \frac{1}{|\sin \omega_0 mT|} [u_0(nT) \cos \omega_0 mT - u_0(nT - mT)]; \quad (13)$$

$$U_{0y}(nT) = \frac{1}{|\sin \omega_0 mT|} u_0(nT) \cdot \sin \omega_0 mT \quad (14)$$

где  $N$  – число выборок за период рабочей частоты 50 Гц.

Ортогональные составляющие вектора тока  $I_{0x}(nT)$  и  $I_{0y}(nT)$  определяются аналогично, по выражениям (11)–(14).

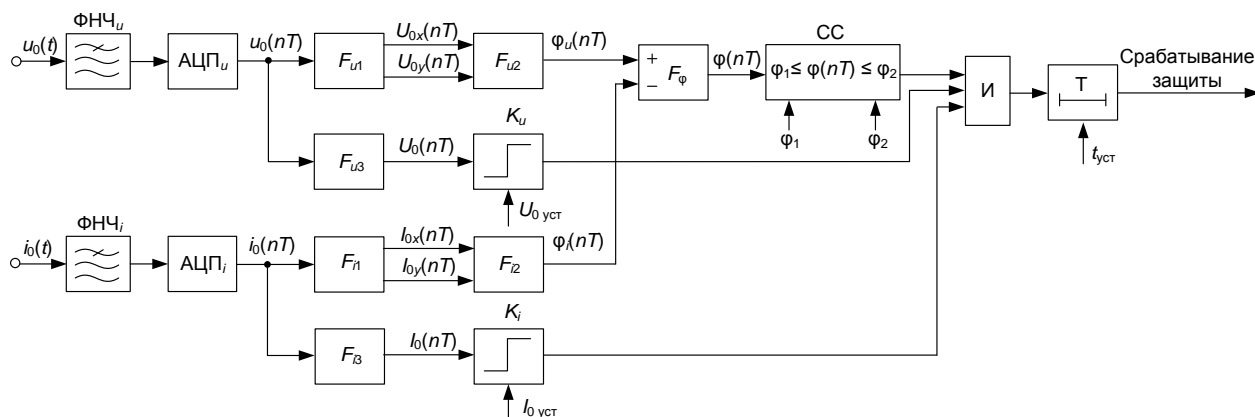


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ТНЗНП, основанной на контроле фазных соотношений полного напряжения и тока нулевой последовательности

Особенностью защит от ОЗЗ является наличие во входных величинах  $u_0(t)$  и  $i_0(t)$  быстро изменяющихся во времени составляющих. Так, в кабельных сетях 6–10 кВ частота свободных составляющих переходного тока, связанных с разрядом емкостей поврежденной фазы (так называемых разрядных составляющих), может достигать значений от единиц до десятков килогерц, а составляющих, связанных с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз (зарядных составляющих), – до нескольких килогерц [4, 10]. При таких частотах разрядных и зарядных составляющих переходных токов ОЗЗ может произойти частичная потеря информации о фазных соотношениях сравниваемых величин, содержащаяся в цифровых отсчетах функций  $u_0(t)$  и  $i_0(t)$ , если период дискретизации  $T$  будет достаточно большим. При уменьшении  $T$ , т.е. при увеличении числа выборок  $N$  за период рабочей частоты, погрешности определения угла сдвига фаз между сравниваемыми величинами уменьшаются. В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты и автоматики, как правило, используется АЦП с частотой дискретизации  $f_d = 1000 \dots 4000$  Гц ( $N = 20 \dots 80$ ). С учетом этого в исследуемых моделях ТНЗНП для уменьшения указанных выше погрешностей использовались АЦП с  $f_d = 4000$  Гц ( $N = 80$ ).

В преобразователях  $F_{u2}$ ,  $F_{i2}$  текущие значения фазы векторов тока и напряжения нулевой последовательности определялись по выражениям:

$$\varphi_u(nT) = \arctg \frac{U_{0y}}{U_{0x}}; \quad (15)$$

$$\varphi_i(nT) = \arctg \frac{I_{0y}}{I_{0x}}. \quad (16)$$

Преобразователи  $F_{u3}$ ,  $F_{i3}$  предназначены для вычисления текущих среднеквадратичных значений напряжения  $U_0(nT)$  и тока  $I_0(nT)$  нулевой последовательности, используемых в качестве воздействующих величин в пусковых органах ТНЗНП по напряжению  $K_u$  и по току  $K_i$ . Схема сравнения (СС) обеспечивает получение требуемой характеристики срабатывания ТНЗНП в комплексной плоскости  $\underline{Z}_0$  (по рис. 1,б или рис. 1,в).

Исследования динамической устойчивости рассматриваемого исполнения ТНЗНП

проводились при внешних и внутренних ДПОЗЗ, переходящих в УОЗЗ. В модели защищаемой сети имитировались классические ДПОЗЗ по теориям W. Petersen и J.F. Peters, J. Slepian [11, 12], характеризующиеся упорядоченными повторными пробоями изоляции (соответственно, через полпериода и период рабочей частоты). В реальных условиях работы электрической сети на длительность горения, условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги в месте повреждения влияет множество факторов: переходное сопротивление в месте горения дуги; вид диэлектрика, непосредственно контактирующего с дуговым каналом; интенсивность охлаждения; давление в зоне горения дуги и др. [13]. Поэтому для реальных дуг в месте ОЗЗ более характерен случайный неупорядоченный характер повторных зажигания и гашения заземляющей дуги. В связи с этим при исследованиях ТНЗНП, наряду с ДПОЗЗ, по теориям W. Petersen и J.F. Peters, J. Slepian имитировались также дуговые ОЗЗ, близкие к реальным.

На рис. 3, 4 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входных сигналов  $u_0(t)$  и  $i_0(t)$  и сигналов на выходах основных функциональных блоков в схеме ТНЗНП, представленной на рис. 2.

Как уже отмечалось выше, при внешних УОЗЗ вектор тока  $\underline{I}_0$  опережает вектор напряжения  $\underline{U}_0$  на  $90^\circ$  (рис. 1,а), т.е.

$\varphi(nT) = \varphi_u(nT) - \varphi_i(nT) = -90^\circ$ . Анализ полученных данных (рис. 3) показывает, что при ДПОЗЗ, по теории W. Petersen, цифровой измерительный орган направления мощности, выполненный на основе ортогональных составляющих полных напряжения и тока нулевой последовательности, на дуговой стадии замыкания из-за влияния высокочастотных составляющих переходного тока может неправильно фиксировать знак угла сдвига фаз  $\varphi(nT)$  (рис. 3,в), что приводит к излишнему срабатыванию ТНЗНП (рис. 3,е). На стадии УОЗЗ ТНЗНП функционирует правильно. Аналогичные искажения замера угла  $\varphi(nT)$ , приводящие к излишним срабатываниям ТНЗНП на дуговой стадии замыкания, могут иметь место и при ДПОЗЗ по теории и J.F. Peters, J. Slepian.

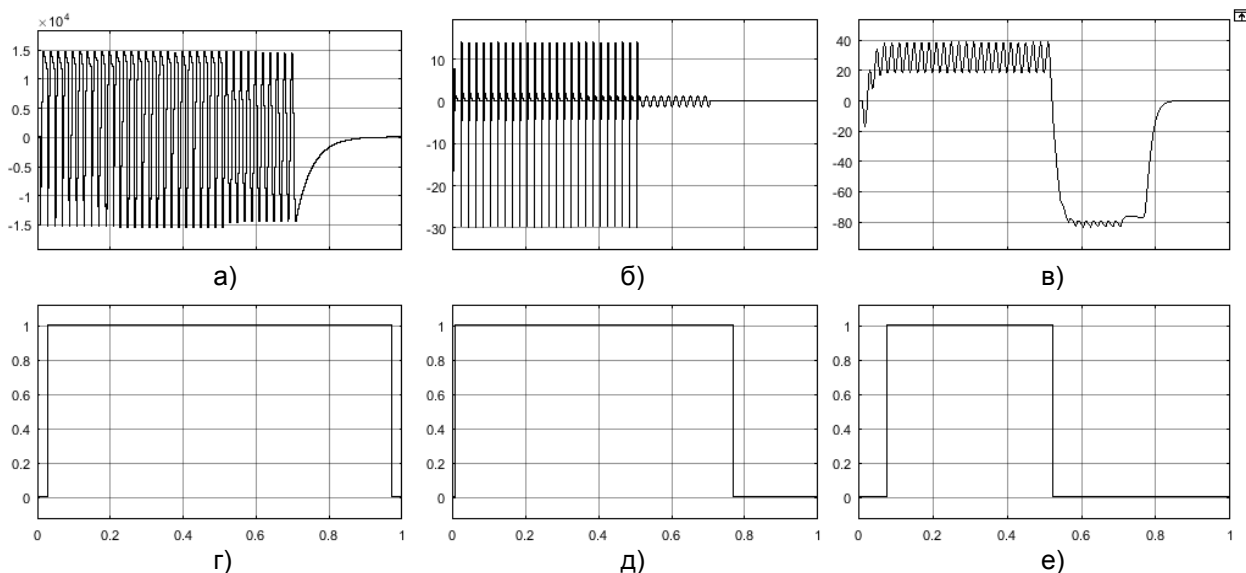


Рис. 3. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования ТНЗНП при внешнем дуговом ОЗЗ по теории J.F. Peters, J. Slepian, переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 5$  А на присоединении с собственным емкостным током  $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$ : а –  $u_0(t)$ ; б –  $i_0(t)$ ; в – сигнал на выходе преобразователя  $F_4 \varphi_U(nT)$ ; г – сигнал на выходе пускового органа по напряжению  $K_U$ ; д – сигнал на выходе пускового органа по току  $K_I$ ; е – сигнал на выходе защиты

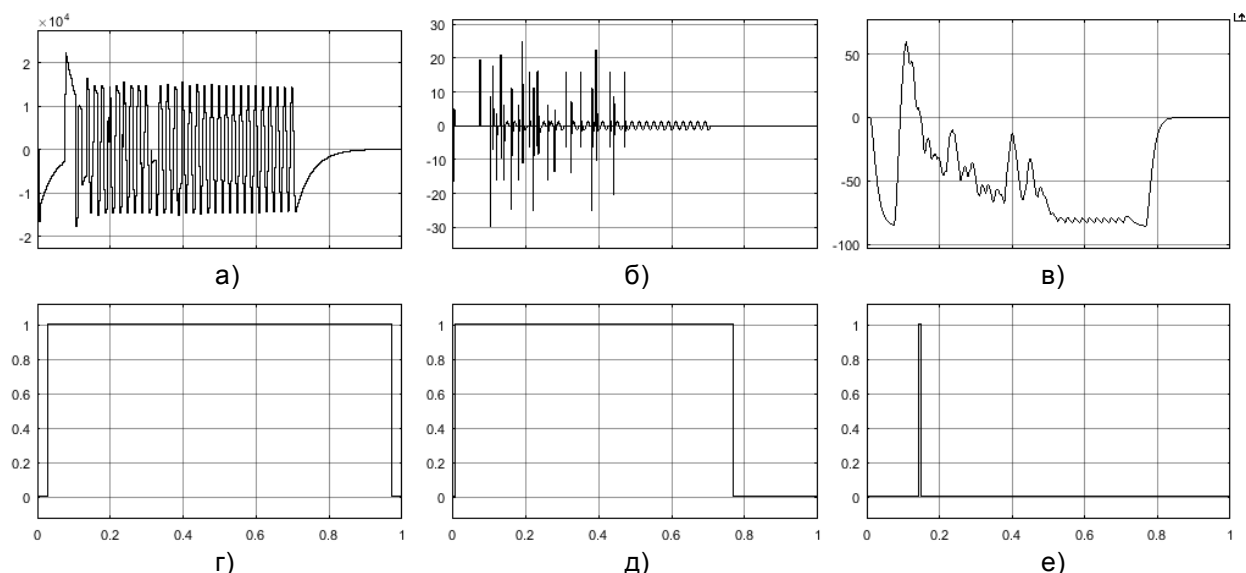


Рис. 4. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования ТНЗНП при внешнем дуговом ОЗЗ с неупорядоченными повторными пробоями изоляции (реальном), переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 5$  А на присоединении с собственным емкостным током  $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$ : а –  $u_0(t)$ ; б –  $i_0(t)$ ; в – сигнал на выходе преобразователя  $F_4 \varphi_U(nT)$ ; г – сигнал на выходе пускового органа по напряжению  $K_U$ ; д – сигнал на выходе пускового органа по току  $K_I$ ; е – сигнал на выходе защиты

Известно, что большая часть ОЗЗ в начальной стадии повреждения изоляции в электрических сетях 6–10 кВ имеет дуговой перемежающийся характер [10, 14]. Однако доля ДПОЗЗ, протекающих в соответствии с теориями W. Petersen и J.F. Peters, J. Slepian, при которых повторные зажигания и гашения заземляющей дуги имеют упорядоченный характер, по данным [15] весьма невелика и не превышает нескольких процентов от общего

числа замыканий в защищаемой сети. Осциллограммы на рис. 4 иллюстрируют функционирование исследуемого исполнения ТНЗНП при близком к реальному характеру ДПОЗЗ. Анализ этих осциллограмм показывает, что на дуговой стадии ОЗЗ возникают значительные погрешности замера угла сдвига фаз  $\varphi(nT)$ , включая изменение его знака, что при определенных условиях (длительности горения дуги, длительности бестоковых

пауз и т.д.) может привести к излишним срабатываниям защиты (рис. 4,е).

Исследования на имитационных моделях показали, что вероятность излишних срабатываний ТНЗНП при внешних дуговых ОЗЗ существенно зависит от сглаживания текущего значения сигнала  $\varphi(nT)$  на выходе преобразователя  $F_4$  (рис. 2), а также от величины временной задержки на срабатывание  $t_{уст}$ . Сглаживание функции  $\varphi(nT)$  в модели ТНЗНП осуществлялось посредством вычисления текущего среднего на интервале 3–5 выборок. Время срабатывания защиты в модели было принято равным  $t_{уст} = 50$  мс. Отметим также, что несколько меньшие искажения замера  $\varphi(nT)$  при равных условиях обеспечивает алгоритм двух выборок.

При внутренних дуговых ОЗЗ, как и при внешних замыканиях, также имеют место искажения замера воздействующей величины органа направления мощности  $\varphi(nT)$ , однако в целом к отказу срабатывания ТНЗНП они могут привести только при кратковременных самоустраняющихся замыканиях.

Таким образом, исследования на имитационных моделях позволяют сделать вывод, что исполнения ТНЗНП, основанные на использовании ортогональных составляющих полного напряжения и тока нулевой последовательности, не позволяют во всех случаях обеспечить устойчивость функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

Отметим, что достаточно широко применяемые в настоящее время исполнения ТНЗНП на электронной или микросредовой базе, как правило, также используют для

действия полные токи и напряжения нулевой последовательности, а для отстройки от влияния на работу защиты переходных процессов при ДПОЗЗ в схемах формирования сравниваемых величин используют фильтры низкой частоты для подавления высокочастотных составляющих и задержку по времени срабатывания.

**Исследование динамической устойчивости функционирования ТНЗНП, основанной на использовании фазных соотношений между составляющими основной частоты напряжения и тока нулевой последовательности.** Исследования проводились на имитационной модели цифровой ТНЗНП, структурно-функциональная схема измерительной части которой приведена на рис. 5, где приняты следующие обозначения:  $FFT_{u1}$ ,  $FFT_{i1}$  – цифровые преобразователи, реализующие быстрый алгоритм для вычисления дискретного преобразования Фурье;  $F_{u2}$ ,  $F_{i2}$ ,  $F_{u3}$ ,  $F_{i3}$ ,  $F_{\varphi}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$  – то же, что и на рис. 2. Остальная часть схемы имитационной модели защиты выполнена аналогично схеме на рис. 2.

Исследования динамической устойчивости ТНЗНП, основанной на использовании фазных соотношений между составляющими основной частоты напряжения и тока нулевой последовательности, как и рассмотренного выше исполнения ТНЗНП (рис. 2), проводились при внешних и внутренних ДПОЗЗ по теориям W. Petersen и J.F. Peters, J. Slepian, а также при дуговом ОЗЗ, имитирующем случайный неупорядоченный характер повторных зажигания и гашений заземляющей дуги.

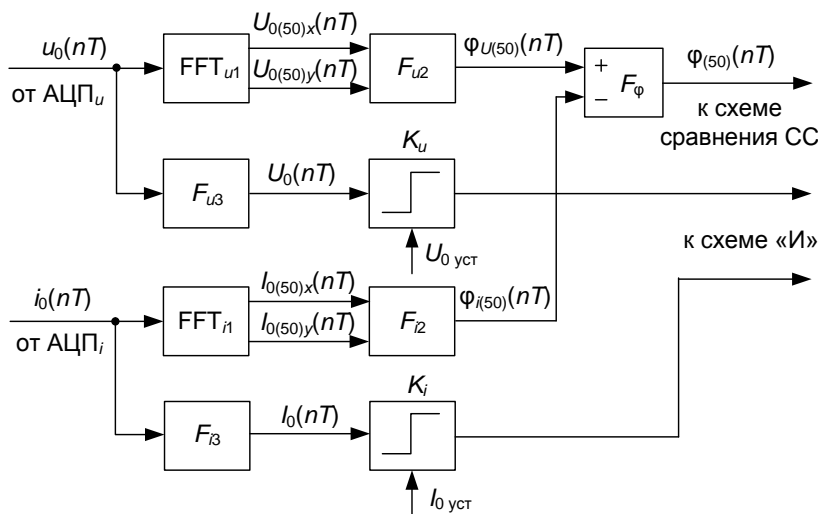


Рис. 5. Структурно-функциональная схема измерительной части ТНЗНП, основанной на контроле фазных соотношений составляющих основной частоты напряжения и тока нулевой последовательности



На рис. 6–8 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входных сигналов  $u_0(t)$  и  $i_0(t)$  и сигналов на выходах ос-

новных функциональных блоков в схеме имитационной модели ТНЗНП (рис. 5 и рис. 2) при внешних и внутреннем дуговых ОЗЗ.

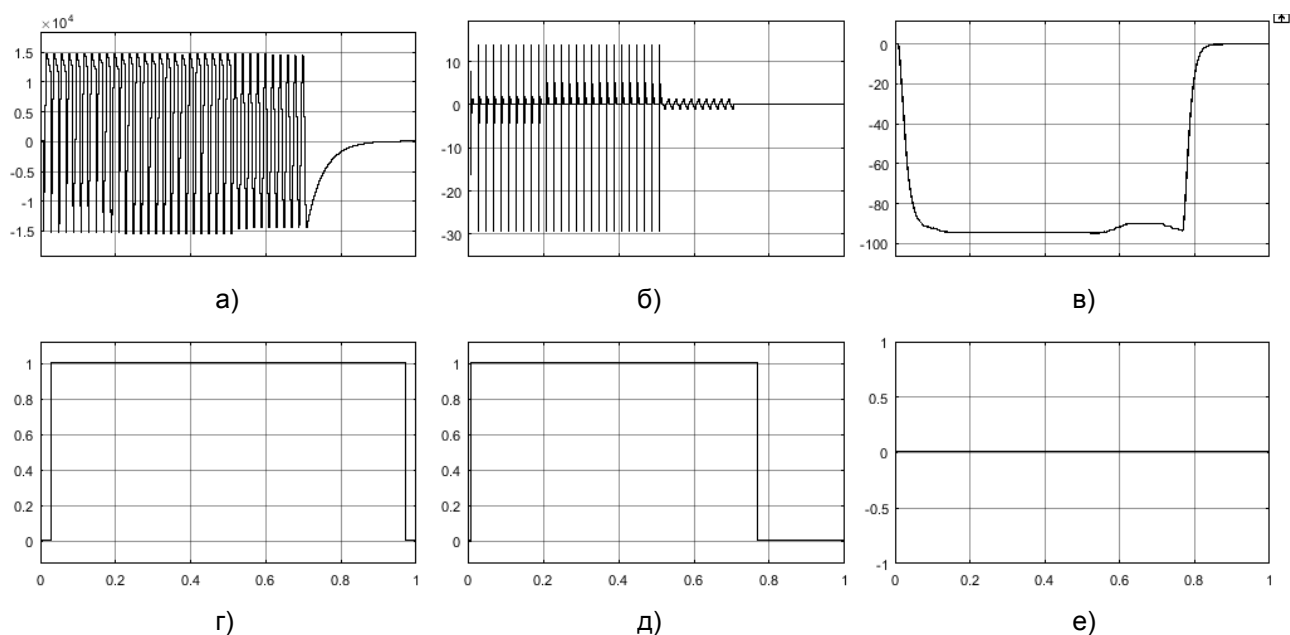


Рис. 6. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования ТНЗНП, основанной на использовании составляющих основной частоты 50 Гц напряжения и тока нулевой последовательности, при внешнем дуговом ОЗЗ по теории J.F. Peters и J. Slepian, переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 5$  А на присоединении с собственным емкостным током  $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$ : а –  $u_0(t)$ ; б –  $i_0(t)$ ; в – сигнал на выходе преобразователя  $F_4 \varphi_U(nT)$ ; г – сигнал на выходе пускового органа по напряжению  $K_U$ ; д – сигнал на выходе пускового органа по току  $K_I$ ; е – сигнал на выходе защиты

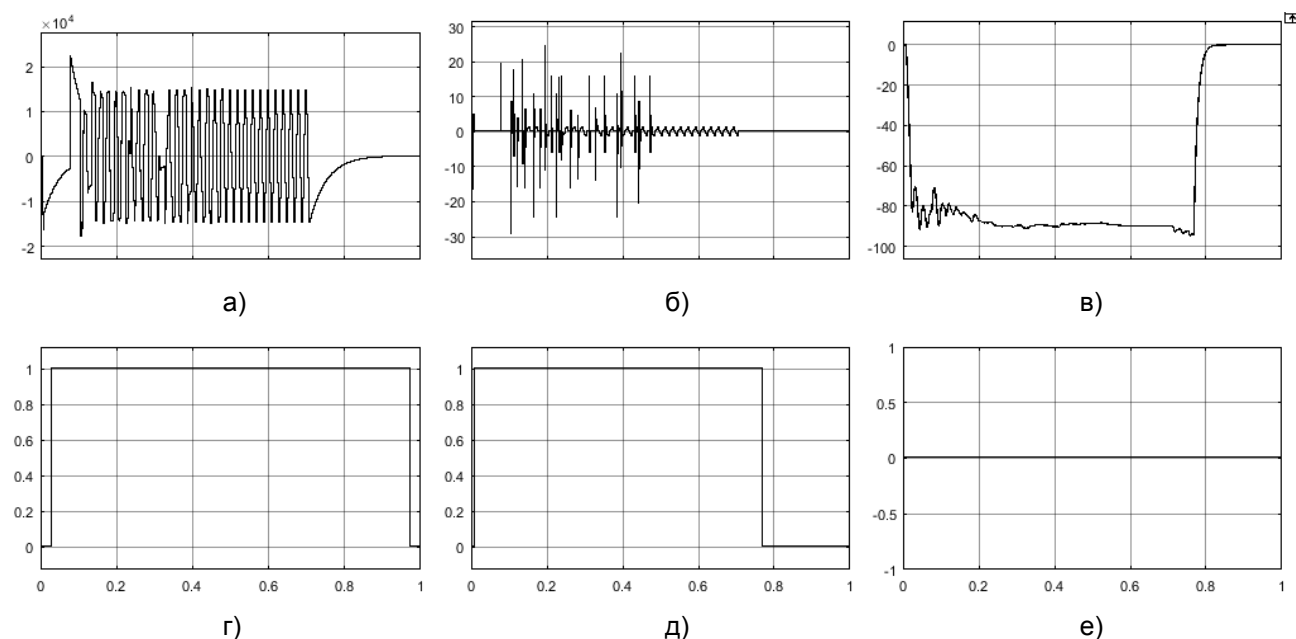


Рис. 7. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования ТНЗНП, основанной на использовании составляющих основной частоты 50 Гц напряжения и тока нулевой последовательности, при внешнем дуговом ОЗЗ с неупорядоченными повторными пробоями изоляции (реальном), переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 5$  А на присоединении с собственным емкостным током  $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$ : а –  $u_0(t)$ ; б –  $i_0(t)$ ; в – сигнал на выходе преобразователя  $F_4 \varphi_U(nT)$ ; г – сигнал на выходе пускового органа по напряжению  $K_U$ ; д – сигнал на выходе пускового органа по току  $K_I$ ; е – сигнал на выходе защиты

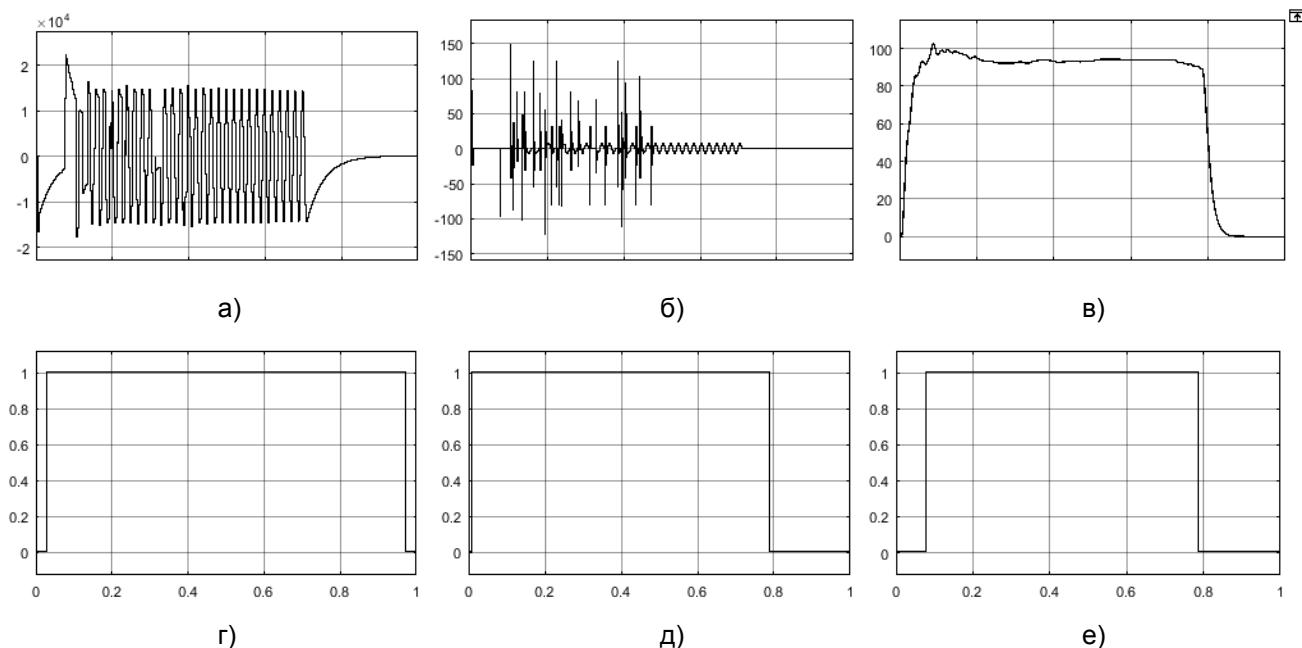


Рис. 8. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования ТНЗНП, основанной на использовании составляющих основной частоты 50 Гц напряжения и тока нулевой последовательности, при внутреннем дуговом ОЗЗ с неупорядоченными повторными пробоями изоляции (реальном), переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 5$  А на присоединении с собственным емкостным током  $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$ : а –  $u_0(t)$ ; б –  $i_0(t)$ ; в – сигнал на выходе преобразователя  $F_4 \varphi_{\nu}(nT)$ ; г – сигнал на выходе пускового органа по напряжению  $K_{\nu}$ ; д – сигнал на выходе пускового органа по току  $K_i$ ; е – сигнал на выходе защиты

Осциллограммы, приведенные на рис. 6–8, иллюстрируют достаточно высокую устойчивость и точность замера измерительным органом направления мощности исследуемого исполнения ТНЗНП угла  $\varphi_{(50)}(nT)$  между векторами напряжения  $\underline{U}_{0(50)}(nT)$  и тока  $\underline{I}_{0(50)}(nT)$  как в переходных режимах дуговой стадии ОЗЗ, так и в установившемся режиме замыкания на землю. Высокую динамическую устойчивость функционирования рассматриваемого исполнения ТНЗНП можно объяснить тем, что и в установившемся, и в переходных режимах ОЗЗ для сети с изолированной нейтралью справедливы следующие соотношения:

$$3i_{0(50)\text{неп}} = 3C_{0\text{собс}} \frac{du_{0(50)}}{dt}; \quad (15)$$

$$3i_{0(50)\text{повр}} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}) \frac{du_{0(50)}}{dt}, \quad (16)$$

т.е. составляющая основной частоты 50 Гц в токе нулевой последовательности неповрежденного присоединения в любых режимах опережает составляющую основной частоты напряжения нулевой последовательности на  $90^\circ$ , а в поврежденном отстает на  $90^\circ$ .

Таким образом, исполнения цифровых ТНЗНП, основанные на выделении ортого-

нальных составляющих тока  $i_0(t)$  и напряжения  $u_0(t)$ , для обеспечения высокой устойчивости функционирования не только в установившемся, но и в переходных режимах ОЗЗ должны использовать для контроля фазных соотношений не полное напряжение и ток нулевой последовательности, а их составляющие основной частоты 50 Гц.

**Результаты исследования.** На основе исследований, выполненных на имитационных моделях электрических сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, установлены причины возможных отказов функционирования (излишних срабатываний и отказов срабатывания) цифровых токовых направленных защит от ОЗЗ в динамических режимах функционирования. Показано, что использование в ТНЗНП полных напряжения и тока нулевой последовательности не позволяет обеспечить высокую устойчивость функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ из-за искажений фазных соотношений сравниваемых величин. Установлено, что использование в ТНЗНП ортогональных составляющих рабочей частоты напряжения и тока нулевой последовательности позволяет исключить отказы их функционирования при любой разновидности ДПОЗЗ.

**Выводы.** Для обеспечения высокой устойчивости функционирования как в установившихся режимах ОЗЗ, так и в условиях влияния переходных процессов при замыканиях через перемежающуюся дугу токовые направленные защиты от данного вида повреждений должны выполняться на основе составляющих рабочей частоты 50 Гц напряжения и тока нулевой последовательности.

#### Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
2. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.
3. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
4. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
5. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники, 2005. – № 3 (33). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.
6. **Multiparameter Current Protections Against Ground Faults in 6–10 kV Cable Networks / A.N. Golubev, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova, V.A. Shuin // Power Technology and Engineering.** – January 2018. – Vol. 51, no. 5. – P. 602–610.
7. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>.
8. **Борухман В.А.** Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.
9. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
10. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
11. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – H. 47, 48.
12. **Peters J.F., Slepian J.** Voltage Induced by Aereign Grounds // Tr. AIEE. – 1928, Apr. – P. 478.
13. **Защита** сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова,

Г.А. Евдокунина, А.И. Таджикибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.

14. **Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

15. **Белянин А.А., Лачугин В.Ф., Иванов С.В.** Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в сети 6–35 кВ // Релейщик. – 2013. – № 2. – С. 24–27.

#### References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976. 560 p.
2. Andreev, V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 639 p.
3. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.
4. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», «Energetik», 2001. 104 p.
5. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit* [Earth faults in 6–35 kV grid. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTehniki*, 2005, vol. 3(33). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>
6. Golubev, A.N., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. *Multiparameter Current Protections Against Ground Faults in 6–10 kV Cable Networks. Power Technology and Engineering*, January 2018, vol. 51, no. 5, pp. 602–610.
7. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennye zashchity. Vliyanie elektricheskoy dugi na napravlennye zashchity* [Earth faults in 6–35 kV grids. Directed protection. The effect of an electric arc on directional protection]. *Novosti ElektroTehniki*, 2006, vol. 1(37). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>
8. Borukhman, V.A. *Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu* [On operation of selective protection against earth faults in 6–10 kV grids and measures for their improvement]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.
9. Shneerson, E.M. *Tsifovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.
10. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with

isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

11. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47–48.

12. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Foreign Grounds. *Tr. AIEE*, 1928, P. 478.

13. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV grids against overvoltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 272 p.

14. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye замыканиа на землю в кабел'nykh setyakh [Arc earth fault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

15. Belyanin, A.A., Lachugin, V.F., Ivanov, S.V. Opyt vnedreniya selektivnoy zashchity ot замыканий на землю в сети 6–35 kV [Experience in implementing selective protection against earth faults in 6–35 kV network]. *Releyshchik*, 2013, no. 2, pp. 24–27.

---

*Тютиков Владимир Валентинович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, e-mail: tvv@ispu.ru  
*Tyutikov Vladimir Valentinovich,*  
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Vice-Rector for Research, Head of Technological Processes Automation Department, e-mail: tvv@ispu.ru

*Кутумов Юрий Дмитриевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: rza@rza.ispu.ru  
*Kutumov Yuri Dmitrievich,*  
Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Шадрикова Татьяна Юрьевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: stu@rza.ispu.ru

*Shadrikova Tatyana Yuryevna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: stu@rza.ispu.ru

*Шуин Владимир Александрович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

*Shuin Vladimir Alexandrovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

УДК 621.321

## **ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

**О.С. МЕЛЬНИКОВА**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В целях продления сроков службы и обеспечения работоспособности маслонеполненного трансформаторного оборудования в эксплуатации большое внимание уделяется разработке методов контроля состояния их маслобарьерной изоляции. При контроле технического состояния трансформаторного масла определяется класс чистоты жидкости в зависимости от номинального