ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ[1]

В.А. Шуин, Е.А. Воробьева, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор для защиты от однофазных замыканий на землю наиболее широкое применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности. Недостатками указанных защит являются низкая селективность и устойчивость их функционирования, обусловленная влиянием переходных процессов при дуговых замыканиях на землю, а также не всегда достаточная чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление. В связи с этим актуальна разработка новых принципов выполнения токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.
Материалы и методы: При разработке принципов выполнения и алгоритмов адаптивной токовой защиты от замыканий на землю использованы результаты, полученные на основе исследований переходных процессов при замыканиях на землю на основе аналитической модели для двухчастотной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ, а также полные имитационные модели в системе Matlab, учитывающие основные особенности конфигурации и распределенный характер параметров кабельных линий сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор.
Результаты: Предложен принцип выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, основанный на использовании соотношений составляющих основной частоты и высших гармонических составляющих в диапазоне частот до 1,5–2 кГц тока нулевой последовательности и производной напряжения нулевой последовательности.
Выводы: Предложенный принцип выполнения токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ позволяет значительно расширить область ее возможного применения и обеспечить адаптивность алгоритма ее функционирования к влиянию основных переменных факторов – переходных процессов при дуговых замыканиях и переходного сопротивления в месте повреждения. Достоверность полученных результатов подтверждают результаты исследований эффективности функционирования адаптивной токовой защиты от замыканий на землю, проведенных на математических моделях в системе Matlab, имитирующих переходные и установившиеся режимы при устойчивых и дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали и алгоритм функционирования предложенной адаптивной токовой защиты от данного вида повреждений.

Ключевые слова: некомпенсированные кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, токовые защиты от замыканий на землю, адаптивная токовая защита.

Principles of implementing adaptive earth fault current protection in 6–10 kV uncompensated cable networks

V.A. Shuin, E.A. Vorobyova, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: Protection of 6–10 kV cable networks with isolated neutral and neutral grounding through a high-resistance resistor against single-phase earth faults is normally provided by zero sequence overcurrent protection. The disadvantages

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в Ивановском государственном энергетическом университете в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» на тему «Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

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

of such protection are the low selectivity and operation stability caused by the influence of transient processes in arcing ground faults, and also sometimes insufficient sensitivity to faults through transient resistance. We propose an adaptive principle of implementating zero sequence current protection for increasing its technical efficiency.
Materials and Methods: To develop the execution principles and algorithms of adaptive earth-fault current protection, we used the results obtained by studying transient processes at earth faults based on the analytical model for two-frequency equivalent circuit of the 6–10 kV cable network and complete simulation models in Matlab taking into account the main configuration features and distributed characteristics of 6–10 kV cable network lines operating with an isolated neutral or neutral grounding through a high-resistance resistor.
Results: A principle has been proposed for implementating adaptive earth fault current protection in 6–10 kV cable networks with an isolated neutral or with neutral grounding through a high-resistance resistor. The principle is based on using the ratios of the fundamental frequency components and the higher harmonic components in the frequency range up to 1,5–2 kHz of the zero current sequence and zero sequence voltage derivative.
Conclusions: The proposed principle of implementing current protection against earth faults in 6–10 kV uncompensated cable networks significantly expands the scope of its possible application and ensures the adaptability of the operation algorithm to the influence of the main variables – transients in arc faults and transient resistance in the fault location. The reliability of the obtained results is confirmed by the studies of the efficiency of adaptive earth fault current protection operation conducted in Matlab on mathematical models simulating transient and steady-state regimes with stable and arcing ground faults in 6–10 kV cable networks with different neutral grounding modes and the operation algorithm of the proposed adaptive current protection from this fault type.

Key words: 6–10 kV uncompensated cable networks, single-phase earth faults, earth fault current protection, adaptive current protection.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.3.029-037

Введение. Наиболее широкое применение в кабельных сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) [1–5]. Основным недостатком различных исполнений ТЗНП (на электромеханической, микроэлектронной или микропроцессорной базе) является необходимость отстройки по току срабатывания от влияния переходных процессов при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), обусловливающая значительное (в 2–4 раза) снижение чувствительности защиты как при устойчивых, так и при дуговых замыканиях в защищаемой зоне. Область возможного применения традиционных исполнений ТЗНП ограничивается присоединениями, собственный емкостный ток которых $I_{C\ собс}$ не превышает ~15–20 % от величины суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ [3–6]. Доля присоединений, для которых не выполняется условие $I_{C\ собс} \leq (0{,}15–0{,}2)I_{C\Sigma}$, на центрах питания (ЦП) кабельных сетей – шинах 6–10 кВ понизительных подстанций и ГРУ ТЭЦ – может составлять до ~30 % и более [6]. Недостатком ТЗНП является также не всегда достаточная чувствительность при внутренних ОЗЗ через переходное сопротивление [5].

На присоединениях, имеющих $I_{C\ собс} > (0{,}15–0{,}2)I_{C\Sigma}$, должны применяться токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП), условия селективности которых при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ, в отличие от ТЗНП, не ограничены относительными значениями собственного емкостного тока $I_{C\ собс}$ защищаемого присоединения. Однако указанные преимущества ТНЗНП обеспечиваются в основном при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ). Известно, что некоторые исполнения таких защит, по данным эксплуатации, ведут себя неудовлетворительно при ОЗЗ с перемежающимися дугами из-за возможных в переходных режимах нарушений фазных соотношений между напряжением $\underline{U}_0(t)$ и током $\underline{I}_0(t)$ нулевой последовательности [2, 4, 7, 8]. Недостатком направленных защит от ОЗЗ являются также отказы их функционирования из-за возможных в реальных условиях эксплуатации ошибок в полярности подключения вторичных цепей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП).

Поэтому задача совершенствования принципов выполнения токовых защит от ОЗЗ является актуальной, прежде всего для ЦП некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Одним из перспективных направлений решения рассматриваемой задачи является применение адаптивных защит от ОЗЗ.

Принцип адаптивности защиты от ОЗЗ. Под адаптивной релейной защитой понимается концепция защиты, которая позволяет и пытается найти корректировку различных функций защит для того, чтобы сделать их более приспособленными к действующим условиям электрической сети [9]. Применительно к защите от ОЗЗ основными переменными факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на условия ее функционирования, в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ являются параметры электрических величин переходных процессов при дуговых ОЗЗ и величина переходного сопротивления в месте повреждения.

Известные предложения по выполнению адаптивных токовых защит от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью основной целью имеют повышение их чувствительности к замыканиям через переходное сопротивление

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

[10, 11]. Для этого первичный ток срабатывания ТЗНП автоматически уменьшается с уменьшением коэффициента полноты замыкания, определяемого отношением измеренного значения напряжения нулевой последовательности к номинальному фазному напряжению $b = U_0/U_{ф.н}$. При УОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью ток $3I_0$, подводимый к защите, линейно зависит от полноты замыкания на землю b, что обеспечивает относительную простоту адаптации чувствительности защиты к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения. При ДПОЗЗ значения I_0 и U_0, подводимые к защите, в общем случае изменяются в разной степени в зависимости от параметров сети и поврежденной линии, места ОЗЗ в сети, интервалов времени между повторными пробоями изоляции, условий гашений и повторных зажиганий заземляющей дуги и других факторов, поэтому адаптивные ТЗНП на основе указанного выше принципа не позволяют обеспечить повышение селективности и чувствительности при дуговых замыканиях. В то же время известно [12–15], что большую часть ОЗЗ, особенно в начальной стадии развития повреждения изоляции, в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью составляют ДПОЗЗ. Поэтому свойство адаптивности должно обеспечивать эффективность функционирования защиты от ОЗЗ не только при повреждениях через большое переходное сопротивление, но и в условиях влияния на форму и значения подводимых величин переходных процессов при дуговых замыканиях.

Принцип действия адаптивной ТЗНП с двумя подведенными величинами. В [16, 17] показано, что в переходных режимах ОЗЗ для составляющей основной частоты 50 Гц, а также для высших гармонических составляющих переходных токов, связанных с разрядом емкостей поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз сети, в диапазоне частот до 1,5–2 кГц в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью с приемлемой точностью выполняется соотношение

$$3i_{03} = -3C_{0\Sigma}\frac{du_0}{dt}, \qquad (1)$$

где $i_{03}(t)$ – ток нулевой последовательности в месте ОЗЗ; $u_0(t)$ – напряжение нулевой последовательности.

Ток $3i_{03}$ в указанном выше диапазоне частот распределяется по неповрежденным линиям пропорционально их собственным емкостям фаз на землю:

$$3i_{0\,неп} = 3C_{0\,собс}\frac{du_0}{dt}, \qquad (2)$$

а ток в поврежденном присоединении $3i_{0\,пов}$ в сети с изолированной нейтралью равен взятой с обратным знаком сумме токов $3i_{0\,неп}$ всех неповрежденных присоединений:

$$3i_{0\,пов} = -\sum_{k=1}^{n-1} 3i_{0k\,неп} = -3\left(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс.пов}\right)\frac{du_0}{dt}, \qquad (3)$$

где $3C_{0\,собс.\,пов}$ – собственная емкость фаз на землю поврежденного присоединения.

Из (2) и (3) для среднеквадратичных значений токов $3i_{0\,неп}$ и $3i_{0\,пов}$ получим:

$$3I_{0\,неп}(t) = 3C_{0\,собс}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^t\left(\frac{du_0}{dt}\right)^2 dt} = 3C_{0\,собс}U_0^{'}(t); \qquad (4)$$

$$3I_{0\,пов}(t) = 3\left(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс}\right)\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^t\left(\frac{du_0}{dt}\right)^2 dt} = \qquad (5)$$

$$= 3\left(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс}\right)U_0^{'}(t),$$

где $3I_{0неп}(t)$, $3I_{0пов}(t)$ – текущие среднеквадратичные значения токов нулевой последовательности в установившемся и переходных режимах ОЗЗ для неповрежденного и поврежденного присоединений соответственно.

На основе соотношений (4) и (5) можно выполнить адаптивную ТЗНП, обеспечивающую устойчивые несрабатывания как в установившихся, так и в переходных режимах внешних ОЗЗ, если текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0уст}(t)$ регулировать при изменениях значения $U'_0(t)$ в соответствии с условием

$$I_{0уст}(t) \geq K_{отс}3I_{0\,неп}(t) = K_{отс}3C_{0\,собс}U_0^{'}(t), \qquad (6)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерения тока $3I_0(t)$ и погрешности схемы формирования уставки $I_{0уст}(t)$ (для токовых защит от ОЗЗ, основанных на использовании высших гармонических составляющих тока $3i_0$, $K_{отс}$ можно принять равным 1,5[2]).

При внутренних ОЗЗ устойчивые срабатывания защиты обеспечиваются при условии

$$3I_{0\,пов}(t) = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})U_0^{'}(t) \geq K_{ч.мин}I_{0уст}(t), \qquad (7)$$

где $K_{ч.мин}$ = 1,5 – минимальный коэффициент чувствительности для токовых защит от ОЗЗ на основе высших гармонических составляющих[3].

При внешних ДПОЗЗ, характеризуемых небольшими интервалами времени Δt между повторными бросками переходного тока (например, 10–20 мс, в соответствии с классическими теориями W. Petersen или J.F. Peters, J. Slepian), когда среднеквадратичное значение тока $3I_0(t)$ в защищаемом присоединении может увеличиваться в несколько раз, среднеквадратичное значение производной $U'_0(t)$ и текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0уст}(t)$ также пропорционально увеличиваются, обеспечивая устойчивые несрабатывания защиты. При внутренних ДПОЗЗ, характеризуемых увеличенными до нескольких десятков миллисе-

[2] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.
[3] Там же.

кунд интервалами времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги, а также при внутренних УОЗЗ через большое переходное сопротивление, в соответствии с (7) значения $U'_0(t)$ и уставки по току срабатывания $I_{0уст}(t)$ синхронно уменьшаются, обеспечивая повышение чувствительности защиты.

Из (6) и (7) можно получить условие применимости адаптивной ТЗНП:

$$3C_{0\,собс*} = \frac{3C_{0\,собс*}}{3C_{0\Sigma}} = I_{C\,собс*} \le \frac{1}{1+K_{отс}K_{ч.мин}}, \quad (8)$$

где $I_{C\,собс*}$ – относительное значение собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

Из (8) при $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,5 получим

$$I_{C\,собс*} \le \frac{1}{1+1{,}5\cdot 1{,}5} \approx 0{,}31,$$

что значительно расширяет область возможного применения адаптивной токовой защиты по сравнению с традиционной ТЗНП.

В кабельных сетях с заземлением нейтрали через высокоомный резистор ток $3i_{0неп}$ при внешних ОЗЗ, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется соотношением (2), а условия несрабатывания адаптивной защиты – соотношением (6). При внутренних ОЗЗ ток нулевой последовательности в поврежденном присоединении рассчитывается по формуле

$$3i_{0\,пов} = -\sum_{k=1}^{n-1} 3i_{0k\,неп} = -3\left(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс.пов}\right)\frac{du_0}{dt} - \frac{u_0}{R_N}, \quad (9)$$

где R_N – сопротивление заземляющего нейтраль сети резистора, выбираемого, как правило, из условия[4]

$$R_N \approx X_{C\Sigma} = \frac{1}{3\omega C_{0\Sigma}}. \quad (10)$$

Среднеквадратичное значение тока нулевой последовательности в поврежденном присоединении

$$3I_{0\,пов}(t) = \sqrt{\left[3\left(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс}\right)U_0'(t)\right]^2 + \left[\frac{U_0}{R_N}\right]^2}, \quad (11)$$

т.е. всегда больше, чем в сети с изолированной нейтралью.

Таким образом, высокоомное заземление нейтрали не влияет на рассмотренный принцип действия адаптивной ТЗНП, но увеличивает ее чувствительность при внутренних ОЗЗ. Следует отметить, что влияние заземляющего резистора R_N на чувствительность адаптивной ТЗНП проявляется в основном в установившемся режиме ОЗЗ. В переходных режимах высокочастотные емкостные токи значительно больше активной составляющей тока ОЗЗ u_0/R_N и последняя не оказывает существенного влияния на среднеквадратичное значение тока $3I_{0пов}(t)$.

Адаптивная токовая защита от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ. Упрощенная структурно-функциональная схема, поясняющая принцип действия разработанной адаптивной ТЗНП для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор [18], приведена на рис. 1.

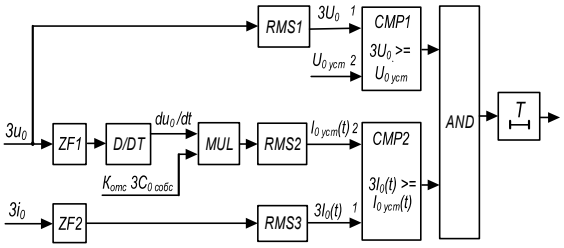

Рис. 1. Структурно-функциональная схема адаптивной ТЗНП для кабельных сетей 6–10 кВ

Схема защиты включает следующие основные функциональные узлы и элементы: *ZF*1, *ZF2* – полосовые фильтры, выделяющие из тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ сумму составляющей основной частоты 50 Гц и высших гармонических составляющих в диапазоне до 1,5–2 кГц; *D*/*DT* – дифференциатор; *MUL* – блок умножения; *RMS*1–*RMS*3 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; *CMP*1, *CMP*2 – блоки сравнения значений двух величин; *T* – элемент временной задержки на срабатывание.

Блоки *RMS*1 и *CMP*1 образуют пусковой орган (ПО) по напряжению $3U_0$, обеспечивающий отстройку защиты от режимов, не связанных с ОЗЗ (электромагнитных наводок во вторичных цепях тока в пусковых режимах электродвигателей, при внешних коротких замыканиях за трансформаторами приемных ТП 6–10/0,4 кВ и др.).

Текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0уст}(t)$ на входе 2 схемы сравнения *CMP*2 формируется умножением в блоке *MUL* текущего значения производной du_0/dt на выходе дифференциатора на величину параметра настройки защиты $K_{отс}3C_{0собс}$ и вычислением текущего среднеквадратичного значения результата перемножения указанных величин в блоке *RMS*2. Текущее значение тока $3I_0(t)$ на входе 1 схемы сравнения *CMP*2 формируется в блоке *RMS*3. Дуговые ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью могут существенно различаться интервалами времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги – от 10–20 мс до нескольких десятков миллисекунд. В [6] показано, что опасные для контролируемой сети перенапряжения с кратностью $K_П = U_{макс}/U_{ф.н}$ = 2,5–2,6 и более в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью возникают при дуговых ОЗЗ, характеризуемых значениями Δt до 50–60 мс. Для обес-

[4] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

печения устойчивости функционирования схемы сравнения *СМР*2 при всех разновидностях ДПОЗЗ, представляющих опасность для защищаемой сети, время усреднения при вычислении среднеквадратичного значения блоками *RMS*2 и *RMS*3 целесообразно также принять равным $T_{уср} \geq 60$ мс.

Материалы и методы. Эффективность функционирования адаптивной ТЗНП на основе рассмотренных выше принципов ее выполнения исследована на математических моделях в системе Matlab, имитирующих переходные и установившиеся режимы при устойчивых и дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. В моделях учитывались распределенный характер параметров кабельных линий, основные особенности конфигурации и реальные параметры кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. Достоверность результатов в части моделирования переходных процессов при дуговых ОЗЗ в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ подтверждается их совпадением с результатами, полученными другими авторами на моделях или при экспериментальных исследованиях в реальных сетях [13–15].

Результаты исследования. На рис. 2, 3 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие алгоритм функционирования адаптивной ТЗНП при различных разновидностях внутренних и внешних ОЗЗ (ДПОЗЗ и УОЗЗ) в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью.

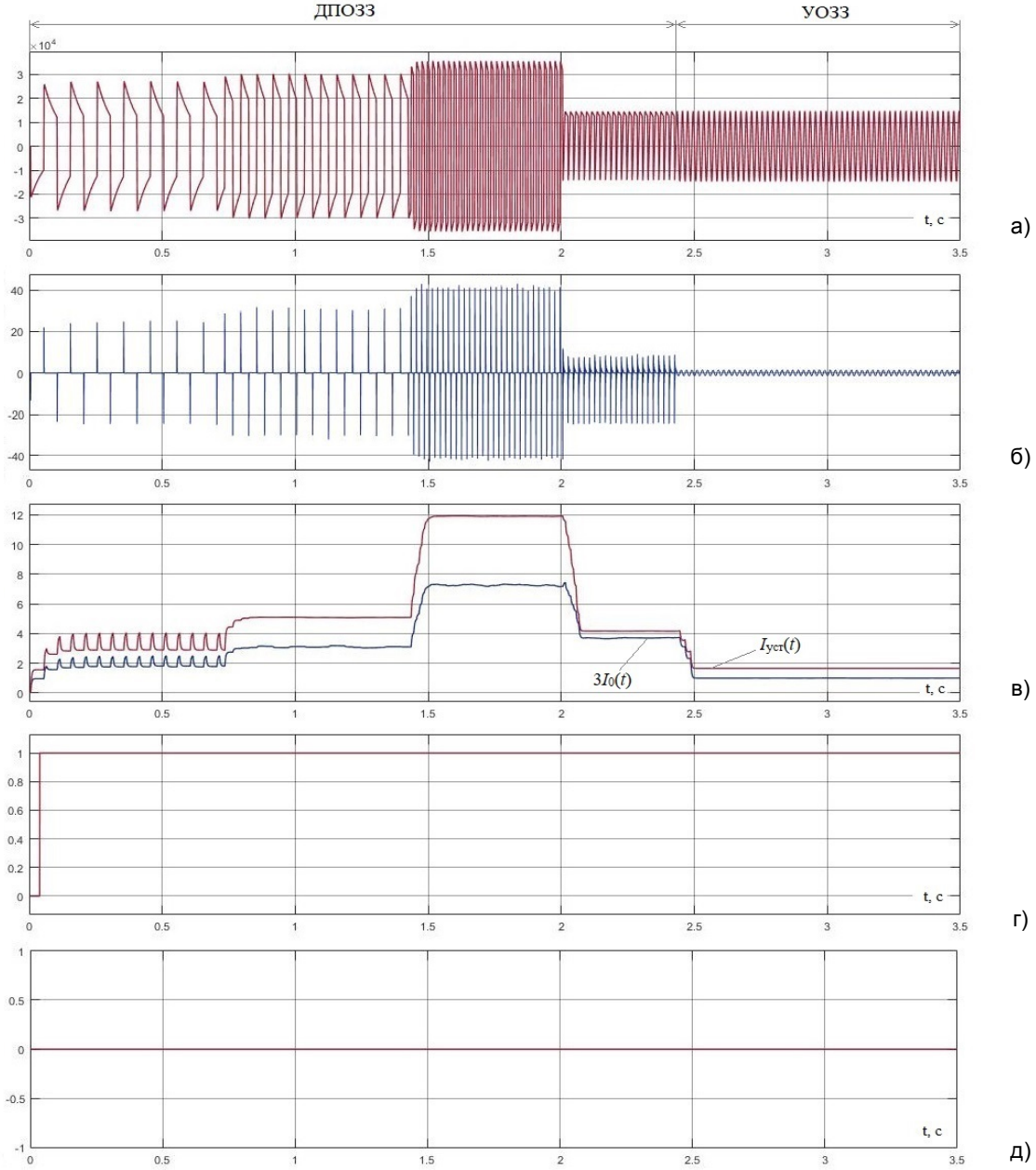

Рис. 2. Осциллограммы работы адаптивной ТЗНП при внешнем ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью: а – напряжение $3u_0(t)$; б – ток $3i_0(t)$; в – текущие значения $3I_0(t)$ и $I_{0уст}(t)$; г – сигнал на выходе ПО; д – сигнал на выходе защиты (при задержке на срабатывание $T_{ср} = 0$)

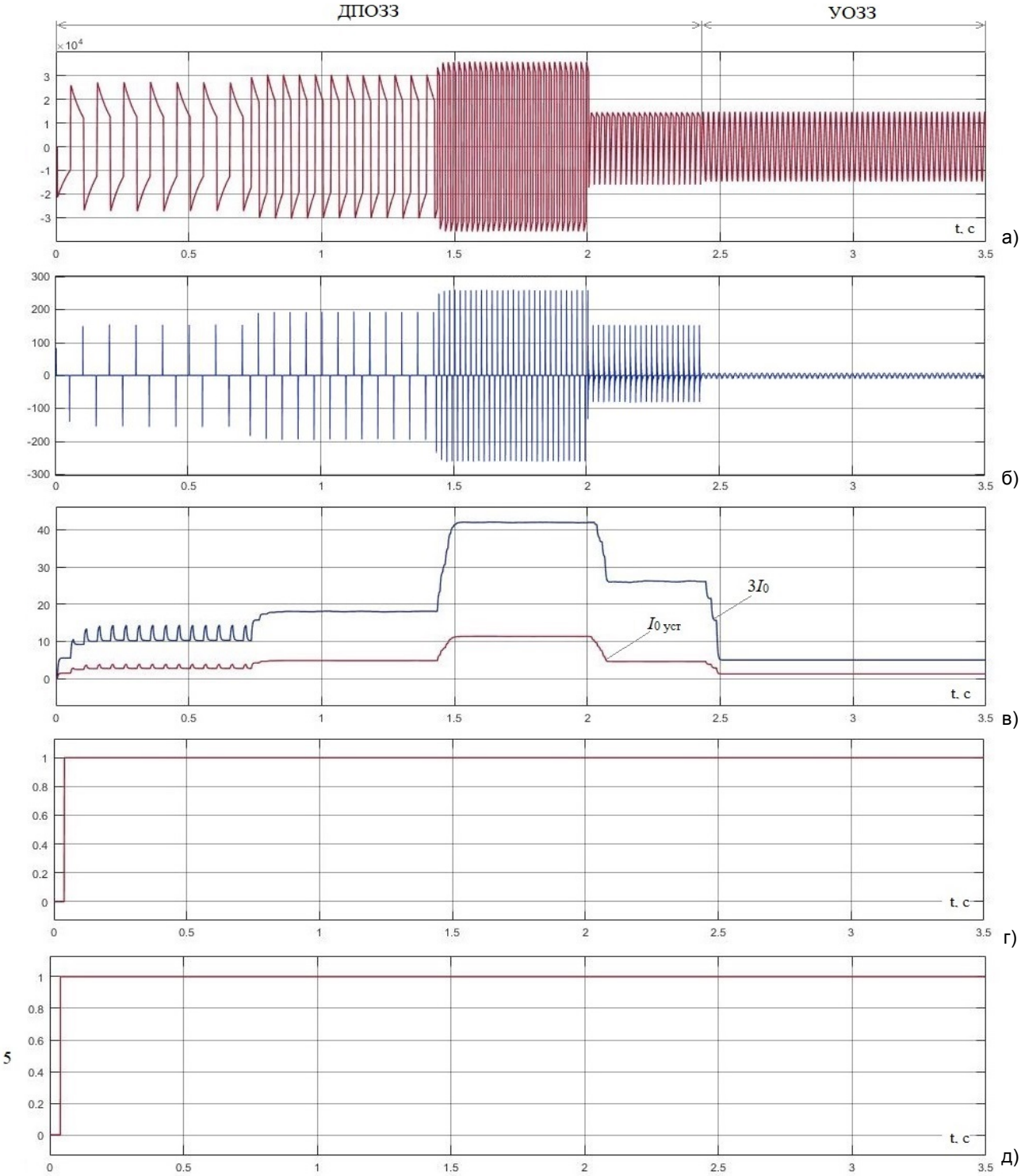

Рис. 3. Осциллограммы работы адаптивной ТЗНП при внутреннем ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью (1–5 то же, что и на рис. 2)

Согласно осциллограммам (рис. 2, 3), можно видеть, что адаптивная ТЗНП для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью автоматически подстраивается под изменяющиеся условия функционирования, обеспечивая заданную селективность и высокую чувствительность как на стадии ДПОЗЗ, так и в установившемся режиме замыкания на землю.

Выводы. Применение принципа адаптивности в максимальных токовых защитах от ОЗЗ некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ должно обеспечивать приспособление алгоритмов их функционирования к влиянию основных переменных факторов – переходных процессов при дуговых замыканиях и переходного сопротивления в месте повреждения.

Адаптивную токовую защиту от ОЗЗ, удовлетворяющую требованию по п. 1, в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через вы-

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

сокоомный резистор можно выполнить на основе сравнения суммы составляющей основной частоты и высших гармонических составляющих в диапазоне частот до 1,5–2 кГц тока и производной напряжения нулевой последовательности.

Предложенный принцип выполнения адаптивной ТЗНП позволяет значительно расширить область возможного применения токовых защит от ОЗЗ по сравнению с традиционными неадаптивными ТЗНП на объектах некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, оборудованных первичными преобразователями для измерения напряжения нулевой последовательности или всех фазных напряжений, к которым относятся все центры питания и распределительные подстанции.

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 // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3 (33) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.
6. **Оценка** чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина и др. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 3. – С. 50–55.
7. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37) [Электронный ресурс]. – 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. **Horowitz S.H., Phadke A.G., Thorp J.S.** Adaptive transmission system relaying // IEEE Trans, on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3, no. 4. – P. 1436–1458.
10. **Патент** 2088010 Российская Федерация, МПК H02H3/16, H01H83/20. Реле защиты / В.И. Кашкалов; заявл. 19.08.1994; опубл. 20.08.1997.
11. **Патент** 2422964 Российская Федерация, МПК H02H3/16, G01R31/08. Устройство токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю (варианты) / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков; заявл. 17.03.2010; опубл. 27.06.2011.
12. **Шалыт Г.М.** Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – С. 77–97.
13. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 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. **Защита** сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 268 с.
16. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
17. **Винокурова Т.Ю., Воробьева Е.А., Шуин В.А.** О выборе рабочего диапазона частот устройств защиты от замыканий на землю на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ // Материалы докл. IX Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». В 4 т. Т. 1; под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С. 373.
18. **Патент** 2629375 Российская Федерация, H02H 3/16. Устройство адаптивной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина, С.Н. Пашковский; заявл. 17.08.2017; опубл. 29.08.2017. Бюл. № 25.

References

1. Fedoseyev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh system* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976. 560 p.
2. Andreyev, 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 electric 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 [Ground faults in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of different protection types]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, no. 3(33). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.
6. Al-Khomidi, M.S. Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Otsenka chuvstvitel'nosti tokovykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Estimation of the sensitivity of current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 50–55.
7. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennye zashchity. Vliyanie elektricheskoy dugi na napravlennye zashchity [Ground faults in 6–35 kV networks. Directional protection. The effect of the electric arc on directional protection]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2006, no. 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 the operation of selective earth fault protection in 6–10 kV networks and measures to improve it]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.

9. Horowitz, S.H., Phadke, A.G., Thorp, J.S. Adaptive transmission system relaying. *IEEE Trans*, on Power Delivery, vol. 3, no. 4, 1988, pp. 1436–1458.

10. Kashkalov, V.I. *Rele zashchity* [Protection relays]. Patent RF, no. 2088010, 1997.

11. Sapunkov, M.L., Khudyakov, A.A. *Ustroystvo tokovoy zashchity elektricheskikh setey ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu (varianty)* [A device of current protection of electric networks from single-phase earth faults (variants)]. Patent RF, no. 2422964, 2011.

12. Shalyt, G.M. Povyshenie effektivnosti profilaktiki izolyatsii v kabel'nykh setyakh [Increasing the effectiveness of insulation damage prevention in cable networks]. *Trudy VNIIE* [Collected works of the National Research and Development Institute of Electric Power Industry]. Moscow: Gosenergoizdat, 1959, issue 8, pp. 77–97.

13. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Ground faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

14. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arcin ground faults in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

15. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV overvoltage networks]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 268 p.

16. Shuin, V.A. Vliyanie razryada emkosti povrezhdennoy fazy na perekhodnyy protsess pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 3–10 kV [Influence of the capacity discharge of the damaged phase on the transient process in case of earth faults in 3–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1983, no. 12, pp. 4–9.

17. Vinokurova, T.Yu., Vorobyova, E.A., Shuin, V.A. O vybore rabochego diapazona chastot ustroystv zashchity ot zamykaniy na zemlyu na osnove perekhodnykh protsessov v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [On selecting of the working frequency range of devices of protection against earth faults based on transients in 6–10 kV cable networks]. *Materialy dokladov IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Tinchurinskie chteniya» v 4 t., t. 1* [Proceedings of the IX International Youth Scientific Conference «Tinchurin Readings» in 4 vol., vol. 1]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2014, p. 373.

18. Shuin, V.A., Shadrikova, T.Yu., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Pashkovsky, S.N. *Ustroystvo adaptivnoy zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [A device of adaptive protection from single-phase earth faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents]. Patent RF, no. 2629375, 2017.

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: shuin@rza.ispu.ru
Shuin Vladimir Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
tel. (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Добрягина Ольга Александровна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: sarbeeva_olga@mail.ru
Dobryagina Olga Aleksandrovna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
tel. (4932) 26-99-06,
e-mail: sarbeeva_olga@mail.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: stu@rza.ispu.ru
Shadrikova Tatyana Yuryevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
e-mail: stu@rza.ispu.ru

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

Воробьева Екатерина Андреевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: rza@rza.ispu.ru
Vorobyova Ekaterina Andreyevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-graduate Student of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
tel. (4932) 26-99-06,
e-mail: rza@rza.ispu.ru

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