

napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [Damage of power transformers with voltage 110–500 kV during exploitation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.

3. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Kulyukhin, S.A., Mit'kin, Yu.A., Vdoviko, V.P. Metodologicheskie aspekty razvitiya chastichnykh razryadov i kontrolya izolyatsii silovykh transformatorov v ekspluatatsii [Methodological aspects of the development of partial discharges and insulation control of power transformers during operation]. *Energetik*, 2017, no. 9, pp. 16–20.

4. Mayorov, A.V., L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Ershov, B.G. Prognozirovaniye sroka sluzhby silovykh transformatorov i avtotransformatorov elektricheskikh setey [Prediction of operating age of power transformer and electric networks autotransformers]. *Energetik*, 2018, no. 11, pp. 17–20.

5. Alekseev, B.A. Krupnye silovye transformatory. Ekspluatatsionnaya nadezhnost', kontrol' sostoyaniya i otsenka rabotosposobnosti [Large power transformers. Operational reliability, condition monitoring and performance assessment]. *Energetika za rubezhom: prilozhenie k zhurnalu «Energetik»*, 2008, issue 2, pp. 3–56.

6. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Cherezov, A.V. Razvitiye sistemy normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii dlya obespecheniya ekspluatatsionnoy

nadezhnosti silovykh transformatorov i avtotransformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Development of system of technical documentation to ensure operational reliability of power transformers and autotransformers of 110 kV and above]. *Elektricheskie stantsii*, 2013, no. 11, pp. 54–59.

7. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Diagnosticheskie statisticheskie kharakteristiki probivnykh napryazheniy masla deystvuyushchikh silovykh transformatorov 110 kV [Diagnostic statistical characteristics of oil breakdown voltage of 110 kV power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 40–46.

8. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskiy, I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [The course of probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow: Nauka, 1965. 512 p.

9. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 1969. 576 p.

10. Gumbel', E. *Statistika ekstremal'nykh znacheniy* [Statistics of extreme values]. Moscow: Mir, 1965. 351 p.

11. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Y.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technique of high voltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. 608 p.

*Мельникова Ольга Сергеевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, адрес: Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 124, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

*Melnikova Olga Sergeevna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate professor of the Department of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics, address: 34 Rabfakovskaya street, building A, room 124, Ivanovo, Russia, 153003, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

УДК 621.316.925

## РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТОКИ ПИТАЮЩИХ СТОРОН, ДЛЯ ЛИНИИ С НЕСКОЛЬКИМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Л.М. КОЛЕСОВ<sup>1</sup>, В.В. МОЖЖУХИНА<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «ВиВа Энерго», г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: mvv277@gmail.com

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** На ЛЭП 110–220 кВ в качестве резервной защиты от междуфазных коротких замыканий используется третья ступень дистанционной защиты. Основной проблемой ее использования при наличии на линии нескольких ответвлений является обеспечение эффективности дальнего резервирования при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений. Решение проблемы дальнего резервирования возможно при расширении информационно-формационной базы защиты. В настоящее время выпол-

няются разработки резервных защит линий с ответвлениями с контролем токов и их составляющих при использовании канала связи, а также на основе алгоритмических моделей объекта. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма действия дистанционной защиты, обеспечивающей требуемую чувствительность при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений.

**Материалы и методы.** Применены аналитические методы определения замера сопротивления и имитационное моделирование в среде пакетов Simulink и SimPowerSystems системы Matlab. Оценка эффективности дальнего резервирования произведена на основе критерия возможности распознавания режимов коротких замыканий за трансформаторами ответвлений.

**Результаты.** Получены аналитические выражения для определения замера сопротивления при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений и в режиме нагрузки. Разработаны критерии оценки возможности распознавания защитой режимов коротких замыканий за трансформаторами ответвлений. Установлено, что основным фактором, влияющим на замер предлагаемой защиты, является соотношение между мощностью защищаемого трансформатора и суммарной мощностью нагрузки всех ответвлений, а использование нескольких измерительных органов сопротивления с собственными характеристиками срабатывания для ответвлений с трансформаторами разной мощности обеспечивает распознавание режимов при любых реально возможных соотношениях мощностей ответвительных подстанций.

**Выводы.** Применение разработанного авторами варианта реализации дистанционной защиты позволяет обеспечить требуемую чувствительность при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений и решить проблему дальнего резервирования на линии с несколькими ответвлениями. Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием аналитического решения и имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** линия с несколькими ответвлениями, трансформатор ответвлений, дистанционная защита, дальнее резервирование, чувствительность, междуфазные короткие замыкания

## DISTANCE BACKUP PROTECTION USING SUPPLY CURRENTS ON A LINE WITH SEVERAL BRANCHES

L.M. KOLESOV<sup>1</sup>, V.V. MOZHZHUKHINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup> ViVa Energo Ltd, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: mvv277@gmail.com

### Abstract

**Background.** The third step of distance protection is used as backup protection against phase-to-phase short circuits on 110–220 kV transmission lines. The main problem when using these protections on a line with several branches is to ensure the effectiveness of distant backup protection in case of phase-to-phase short circuits behind branch transformers of substations. The effective solution to distant backup protection is possible to provide by expanding the information base of protection. Currently, backup protection of lines with branches is being developed with control of currents and their components when using a communication channel, and based on algorithmic models of the facility. In this regard, the urgent task is to develop an algorithm for the distance protection ensuring the required sensibility during short circuits on the lower voltage side of the branch transformers.

**Materials and Methods.** Analytical methods of determining the impedance measurement and simulation in Simulink and SimPowerSystems of the Matlab modeling system are used. The effectiveness of distant backup protection can be evaluated on the basis of recognition possibility of short circuit modes behind the branch transformers.

**Results.** Analytical expressions have been obtained to determine the impedance measurement during phase-to-phase short-circuits behind a branch transformer and under load conditions. Criteria have been developed to assess the proposed protection possibility to recognize the mode of phase-to-phase short circuits behind the branch transformer. Studies have shown that the main factor determining the possibility of mode recognition is the ratio between the protected transformer power and the total power of the branches loads. The use of several impedance measuring elements with their own response characteristics for branches with transformers of different capacities provides mode recognition for any possible correlation of power of branch substations.

**Conclusions.** The use of the distance protection implementation option developed by the authors allows providing the required sensitivity for short circuits behind branch transformers and to solve the problem of distance backup line protection on a line with several branches. The reliability of the data obtained is confirmed by the correspondence of analytical research and simulation results.

**Key words:** line with several branches, distance protection, distant backup protection, sensitivity, phase-to-phase short circuit

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.6.049-059

**Введение.** В настоящее время на ЛЭП 110–220 кВ с двусторонним питанием в качестве резервной защиты от междуфазных коротких замыканий (КЗ) используется дистанционная защита (ДЗ) линии [1], подключаемая к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН) одного из концов линии в месте установки. Основной проблемой при применении указанной защиты на линии с несколькими ответвлениями является обеспечение эффективности дальнего резервирования (ДР) при междуфазных КЗ на стороне низшего напряжения (НН) трансформаторов ответвительных подстанций (ПС) [2–5].

Особенностью линии с несколькими ответвительными ПС является наличие на ответвлениях трансформаторов разной мощности. Зачастую оказывается невозможным обеспечить полноценное дальнейшее резервирование ввиду недостаточной чувствительности резервной ступени ДЗ при междуфазных КЗ на стороне НН ответвительных ПС с трансформаторами малой мощности [6–8]. Также возможности резервной ступени ДЗ ограничены необходимостью отстройки от суммарной нагрузки всех ответвлений и перетока мощности по защищаемой линии.

Для повышения эффективности дальнего резервирования на линии с несколькими ответвлениями выявлена необходимость расширения информационной базы релейной защиты [7, 8]. Современные разработки защит дальнего резервирования для линий с несколькими ответвлениями при наличии двустороннего питания выполняются на основе токовых защит и их разновидностей (с контролем фазных токов, их ортогональных, симметричных, аварийных составляющих) с использованием канала связи [7], а также на основе алгоритмических моделей объекта [8]. Активное развитие и внедрение систем связи и передачи данных в настоящее время обуславливает достаточную доступность информации для целей релейной защиты. Для решения вопроса ДР на линиях с ответвлениями разной мощности представляется целесообразным развитие резервной защиты на основе дистанционного принципа

с использованием канала связи между питающими подстанциями.

Для повышения чувствительности при КЗ на стороне НН трансформатора ответвления разработан алгоритм функционирования ДЗ с использованием волоконно-оптического канала связи (ВОЛС) [9]. Орган сопротивления дополнительной ступени ДЗ выполняется на базе виртуального реле сопротивления (РС), включаемого на сумму токов двух питающих концов линии и напряжение в месте ответвления, полученное математическим смещением напряжения на шинах подстанции в месте установки защиты падением напряжения на сопротивлении участка линии до ответвления. Для повышения чувствительности при двухфазных КЗ на стороне НН трансформатора ответвлений данный измерительный орган сопротивления (ИОС) включается на фазные величины.

Разработанный алгоритм действия резервной ступени дистанционной защиты [10] применим и для случая линии с несколькими ответвлениями [11].

При наличии на линии нескольких ответвительных ПС с трансформаторами разной мощности предлагается использовать несколько ИОС. В качестве примера рассмотрим вариант реализации предлагаемой дистанционной защиты дальнего резервирования для линии с двумя ответвлениями (рис. 1). Замер ИОС<sub>1</sub> защиты ДЗ<sub>1</sub> для действия при КЗ за трансформатором Т1 определяется выражением

$$Z_{\text{зам}T1} = \frac{\dot{U}_{C1} - \dot{I}_1 Z_{\text{Л1}}}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}, \quad (1)$$

а замер ИОС<sub>2</sub> для действия при КЗ за трансформатором Т2 определяется выражением

$$Z_{\text{зам}T2} = \frac{\dot{U}_{C1} - \dot{I}_1 (Z_{\text{Л1}} + Z_{\text{Л3}})}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}, \quad (2)$$

где  $\dot{U}_{C1}$  – напряжение на шинах подстанции в месте установки защиты;  $Z_{\text{Л1}}$  и  $(Z_{\text{Л1}} + Z_{\text{Л3}})$  – сопротивление участка линии от места установки защиты до ответвления 1 и 2 соответственно;  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  – ток через защиту и ток противоположного конца линии.

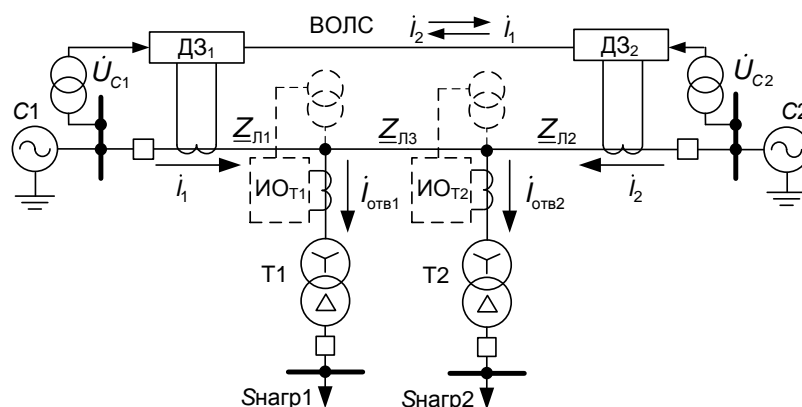


Рис. 1. Схема ДЗ, включаемой на сумму токов питающих концов линии и напряжение в месте от- ветвления

Исследуем функционирование предлагаемого ИОС при наличии на линии нескольких ответвлений. В качестве объекта исследований рассмотрим ЛЭП 110–220 кВ с ответвлениями при наличии двустороннего питания, предметом исследований является резервная ступень предлагаемой ДЗ.

Целью исследований является разработка алгоритма действия ДЗ дальнего резервирования, обеспечивающей требуемую чувствительность при коротких замыканиях на стороне НН ответвительных подстанций с трансформаторами разной мощности. Задачами исследований являются анализ влияния на замер предлагаемого ИОС различных факторов (параметров режима работы, сети, КЗ) и оценка возможности распознавания режимов междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора защищаемого ответвления предлагаемой ДЗ на основе разработанного критерия при наличии на линии нескольких ответвлений.

**Материалы и методы.** Для решения поставленных задач использованы аналитические методы определения замера ИОС ДЗ, математическое моделирование в среде Mathcad и имитационное моделирование в среде пакетов Simulink и SimPowerSystems системы Matlab.

Для исследования функционирования предлагаемого ИОС на линии с несколькими ответвлениями была разработана математическая модель участка сети, представленная на рис. 2.

Наличие на линии нескольких ответвлений заменялось двумя ответвлениями, одно из которых являлось защищаемым трансформатором с нагрузкой, а второе – эквивалентной нагрузкой остальных ответвлений.

Для данной схемы составлена система уравнений для определения замера предла-

гаемого ИОС в симметричном режиме работы сети:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{\text{отв}1}}{Z_{C1} + Z_{Л1}}, \quad i_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\text{отв}2}}{Z_{C2} + Z_{Л2}}, \\ i_3 = \frac{\dot{U}_{\text{отв}1} - \dot{U}_{\text{отв}2}}{Z_{Л3}}, \\ i_{\text{экв.отв}1} = \frac{\dot{U}_{\text{отв}1}}{Z_{\text{экв.отв}1}}, \quad i_{\text{экв.отв}1} = i_1 + i_3, \\ i_{\text{экв.отв}2} = \frac{\dot{U}_{\text{отв}2}}{Z_{\text{экв.отв}2}}, \quad i_{\text{экв.отв}2} = i_2 - i_3, \\ \dot{U}_{C1} = \dot{E}_1 - i_1 Z_{C1}, \\ \dot{U}_{C2} = \dot{E}_2 - i_2 Z_{C2}, \\ Z_{\text{зам}T1} = \frac{\dot{U}_{C1} - i_1 Z_{Л1}}{i_1 + i_2}, \\ Z_{\text{зам}T2} = \frac{\dot{U}_{C1} - i_1 (Z_{Л1} + Z_{Л3})}{i_1 + i_2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

При решении системы уравнений сопротивления прямой и обратной последовательностей принимались равными. Токи и напряжения, а также переходное сопротивление в месте КЗ приведены к стороне высшего напряжения (ВН). Коэффициенты трансформации ТН и ТТ для упрощения не учитывались, так как в рассматриваемых линейных режимах они влияют лишь на масштабы получаемых характеристик.

Система уравнений для определения замеров сопротивления ИО предлагаемой ДЗ составлена только для симметричного режима работы сети (трехфазное КЗ и режим нагрузки), поскольку при двухфазном КЗ на стороне НН трансформаторов ответвлений со схемой соединения обмоток Y/Δ-11 замер по одной из фаз предлагаемого ИОС, включаемого на фазные величины токов и напряжений, будет соответствовать замеру при симметричном трехфазном КЗ.

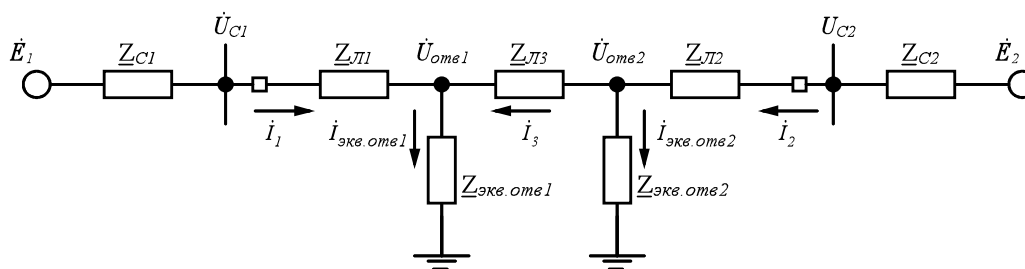


Рис. 2. Схема замещения участка сети

В результате решения системы уравнений получены аналитические выражения для определения замеров ИОС предлагаемой ДЗ при междуфазных КЗ за трансформатором ответвления и в режиме нагрузки, позволяющие учитывать комплексное влияние таких факторов, как соотношение мощностей, модулей и фаз эквивалентных ЭДС питающих систем, соотношение сопротивлений участков линии, мощность и величина нагрузки трансформаторов ответвлений, переходное сопротивление в месте КЗ и др.

По полученным аналитическим выражениям в среде Mathcad составлена программа расчета замера сопротивления предлагаемой защиты, учитывающая указанные выше факторы, при трехфазном КЗ на стороне НН трансформатора ответвления и в режиме нагрузки.

Для проверки полученных результатов с использованием программного комплекса Matlab были разработаны математические модели рассматриваемого участка сети, математические модели предлагаемого ИОС, а также комплексные математические модели системы «объект-устройство».

Рассматривались случаи установки на защищаемом ответвлении трансформаторов мощностью от 2,5 до 80 МВА.

Исследования проводились при изменении угла сдвига фаз ЭДС второй системы по отношению к первой в пределах  $-45^\circ \div 45^\circ$ , изменении отношения модулей ЭДС второй системы к первой в пределах  $0,9 \div 1,1$ , изменении отношения мощностей систем С1 и С2 в пределах  $0,25 \div 4,0$ , изменении переходного сопротивления в месте КЗ на стороне НН в пределах  $0 \div 0,3$  номинального сопротивления защищаемого трансформатора, изменении коэффициента трансформации за счет учета РПН, изменении величины нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА при постоянном  $\text{tg}(\varphi_2) = 0,5$  (принят для обобщенной нагрузки 110 кВ), а также с учетом коэффициента самозапуска

двигательной нагрузки  $K_{\text{зап}} = 1,5; 2,0; 2,5$  в нагрузочном режиме.

При анализе учитывались изменения соотношений модулей и угла сдвига фаз ЭДС питающих систем только в пределах, обеспечивающих протекание токов в ЛЭП, не превышающих длительно допустимых значений.

Достоверность полученных данных подтверждается сходимостью результатов аналитического решения и имитационного моделирования.

Для оценки возможности распознавания режимов междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора ответвления предлагаемой ДЗ при наличии на линии нескольких ответвлений использовались два критерия: различие между областями режимов по величине сопротивления и по углу.

В качестве критерия возможности распознавания по величине предлагается использовать относительное значение разности замера ИОС в режиме без КЗ и при КЗ на стороне НН защищаемого трансформатора к величине замера при КЗ ( $\Delta Z_*$ ). В качестве критерия возможности распознавания по углу – наименьшую разность углов между областями замеров сопротивления в режимах КЗ и в режимах без КЗ ( $\Delta \varphi$ ).

Таким образом, критерии возможности распознавания режимов определяются следующими выражениями:

$$\Delta Z_* = \frac{\min(Z_{\text{зап}} - Z_{\text{КЗ}})}{Z_{\text{КЗ}}}, \quad (4)$$

$$\Delta \varphi = \varphi_{\text{КЗ}} - \varphi_{\text{зап}}, \quad (5)$$

где  $Z_{\text{КЗ}}$  и  $\varphi_{\text{КЗ}}$  – величина и угол замера ИОС при КЗ за трансформатором;  $Z_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$  – величина и угол замера ИОС в режиме самозапуска нагрузки ответвлений.

На рис. 3 приведены пояснения к определению критериев  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  для двух случаев. Чем больше значения  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$ , тем выше возможность распознавания имеет устройство.

Для определения возможности распознавания рассматривались наиболее тяже-

лые режимы с точки зрения разности измеряемых параметров КЗ на стороне НН трансформатора ответвления и режимов без КЗ. В качестве наиболее тяжелого режима без КЗ рассматривался режим самозапуска суммарной нагрузки всех ответвительных ПС. Замер ИОС в режиме КЗ на стороне НН трансформатора ответвления определялся с учетом максимального нагрузочного режима эквивалентного ответвления.

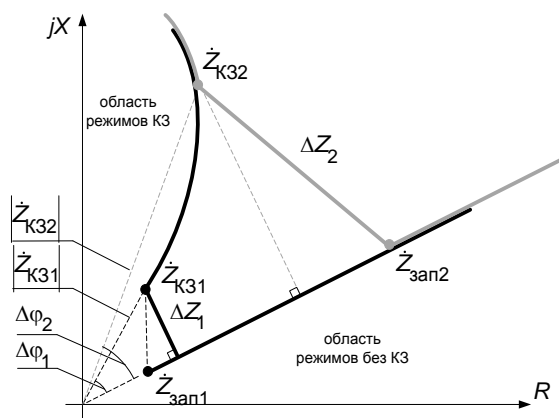


Рис. 3. Определение критериев возможности распознавания режимов: черный – при большом отношении суммарной нагрузки ответвлений к мощности защищаемого трансформатора ответвления; серый – при малом отношении суммарной нагрузки к мощности трансформатора

Исследования  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  проводились для случаев установки электродвигателей нагрузки ( $K_{зап}$ ) на защищаемом ответвлении трансформаторов мощностью от 2,5 до 80 МВА при эквивалентной мощности нагрузки остальных ответвлений от 0 до 200 МВА и различном коэффициенте запуска.

**Результаты исследования.** Проведенный анализ функционирования разработанного ИОС при изменении параметров сети показал, что соотношение мощностей и углов ЭДС питающих систем, соотношение сопротивлений участков линий и систем не оказывают влияния на замер сопротивления предлагаемой ДЗ дальнего резервирования.

Существенное влияние на замер ИОС оказывают нагрузка эквивалентного ответвления, переходное сопротивление в месте КЗ и РПН трансформаторов.

На рис. 4 показано изменение замеров сопротивления ИО в нагрузочном режиме и при КЗ на стороне НН двухобмоточного, трехобмоточного, двухобмоточного с расщеплением трансформаторов мощностью от 2,5 до 80 МВА при изменении нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА и

коэффициенте запуска двигателей в нагрузочном режиме  $K_{зап} = 2,0$ .

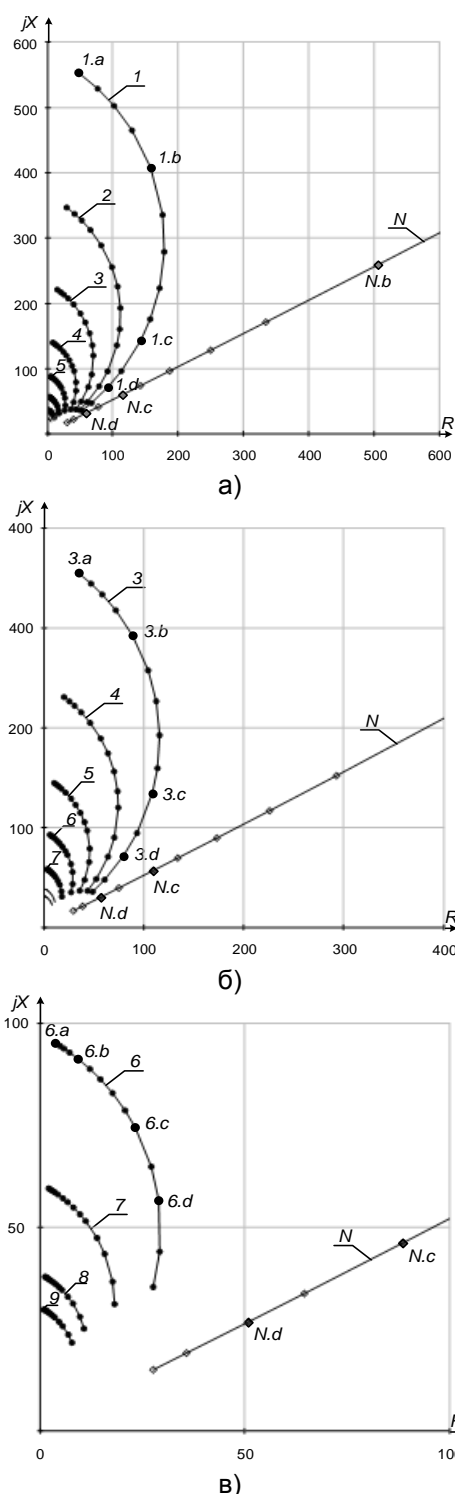


Рис. 4. Замер сопротивления ИОС: при КЗ (кривые 1–9 соответствуют  $S_{Т1} = 2,5, 4,0, 6,3, 10, 16, 25, 40, 63, 80$  МВА) на стороне НН трансформатора ответвления Т1 мощностью от 2,5 до 80 МВА: а – двухобмоточного; б – трехобмоточного; в – двухобмоточного с расщеплением, и в режиме нагрузки (кривая N) при изменении нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА (точки a, b, c, d соответствуют  $S_{нагр2} = 0, 10, 50, 100$  МВА)

На рис. 5 в качестве примера показано изменение замеров сопротивления ИО при КЗ на стороне НН двухобмоточного трансформатора мощностью 2,5 МВА, трехобмоточного трансформатора мощностью 6,3 МВА, двухобмоточного трансформатора с расщеплением мощностью 25 МВА при изменении значения переходного сопротивления от 0 до 0,3 сопротивления трансформатора, установленного на защищаемом ответвлении, при изменении нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА.

На рис. 6 приведены результаты замера ИОС для ответвления с установленным двухобмоточным трансформатором мощностью 2,5 МВА, трехобмоточным трансформатором мощностью 6,3 МВА, двухобмоточным трансформатором с расщеплением мощностью 25 МВА для среднего и крайних положений РПН при аналогичном изменении нагрузки эквивалентного ответвления.

Результаты показали, что величина нагрузки эквивалентного ответвления оказывает наиболее существенное влияние на возможность распознавания режимов предлагаемой ДЗ, поскольку с увеличением мощности нагрузки эквивалентного ответвления область замеров сопротивления в режиме КЗ приближается к области замеров в режиме без КЗ. Переходное сопротивление в месте КЗ и положение РПН в большей степени влияет на замер при КЗ за трансформаторами малой мощности.

Для оценки эффективности функционирования предлагаемого ИОС выявлена необходимость проведения анализа возможности распознавания режимов междуфазных КЗ на стороне НН трансформатора защищаемого ответвления и режима без КЗ с учетом влияния рассмотренных факторов на основе разработанного критерия.

Результаты исследований показали, что величины  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  при любых мощностях защищаемого трансформатора и суммарной нагрузки в рассмотренных режимах зависят от соотношения мощностей нагрузки ответвлений. В связи с этим для унификации результатов исследования построены зависимости критериев  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  от относительного значения мощности нагрузки  $S_{нагр*}$ , определяемого отношением суммарной мощности нагрузки ответвлений к но-

минальной мощности защищаемого трансформатора:

$$S_{нагр*} = \frac{S_{нагр2} + S_{нагрТ1}}{S_{номТ1}}, \quad (6)$$

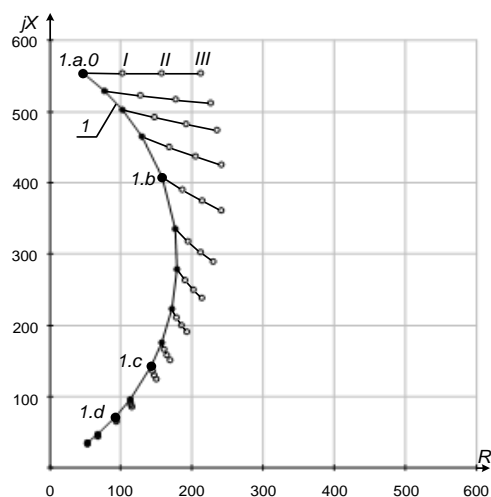
где  $S_{нагр2}$  и  $S_{нагрТ1}$  – мощность нагрузки эквивалентного и защищаемого ответвлений соответственно;  $S_{номТ1}$  – номинальная мощность защищаемого трансформатора.

В ходе анализа полученных результатов выявлено, что для каждого расчетного режима значения величин  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  однозначно определяются для любого возможного  $S_{нагр*}$  при изменении мощности защищаемого трансформатора и эквивалентной мощности нагрузки остальных ответвлений. В качестве примера на рис. 7 показано изменение  $\Delta Z_*$  и  $\Delta \varphi$  в зависимости от  $S_{нагр*}$  при  $K_{зап} = 1,5; 2,0; 2,5$ .

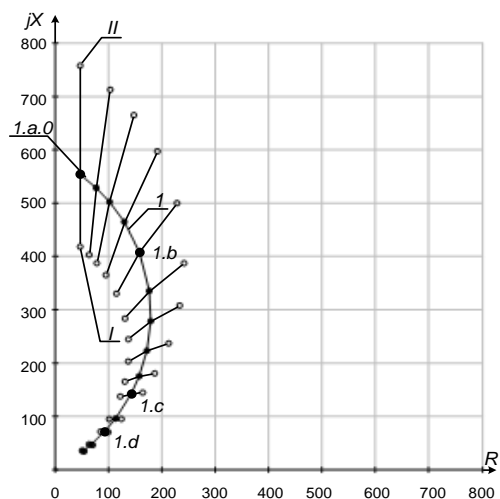
Анализ полученных результатов (рис. 7) показывает, что величина  $\Delta Z_*$  во всех рассмотренных режимах является положительной, а значит, предлагаемый ИОС способен распознать режимы КЗ и без КЗ для любых реально возможных соотношений между мощностью защищаемого трансформатора и суммарной мощностью нагрузки. При малых значениях  $\Delta Z_*$  для распознавания режимов следует дополнительно использовать критерий по углу  $\Delta \varphi$ .

**Выводы.** На ЛЭП 110-220 кВ с двусторонним питанием при наличии нескольких ответвительных подстанций с трансформаторами разной мощности для действия при междуфазных КЗ на стороне НН трансформаторов ответвлений предлагается применять ДЗ с несколькими ИОС с собственными характеристиками срабатывания.

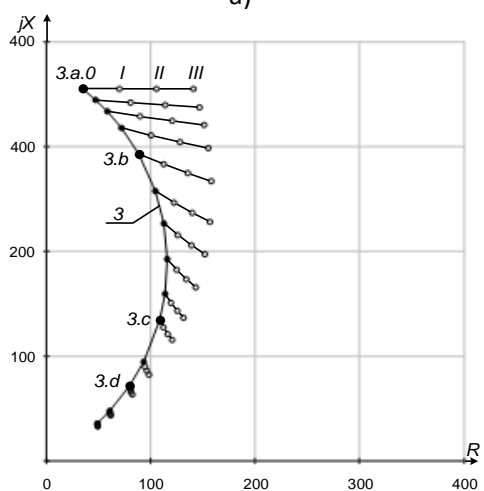
Для предлагаемой защиты основным фактором, определяющим возможность распознавания режимов, является соотношение между мощностью суммарной нагрузки ответвлений и мощностью защищаемого трансформатора. Для оценки возможности распознавания разработанным ИОС режимов КЗ за трансформатором защищаемого ответвления и режима без КЗ предлагается использовать два критерия: минимальную разность углов между областями КЗ и без КЗ и наименьшее значение сопротивления между указанными областями.



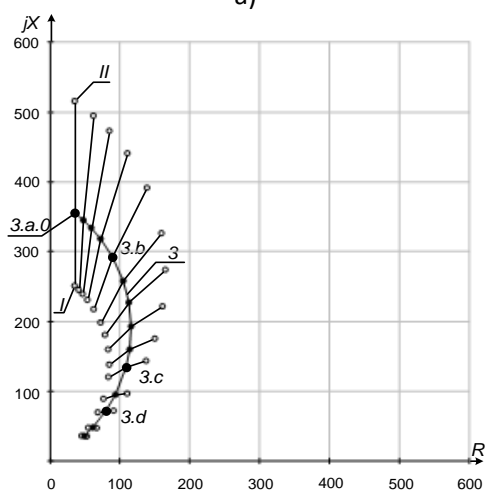
а)



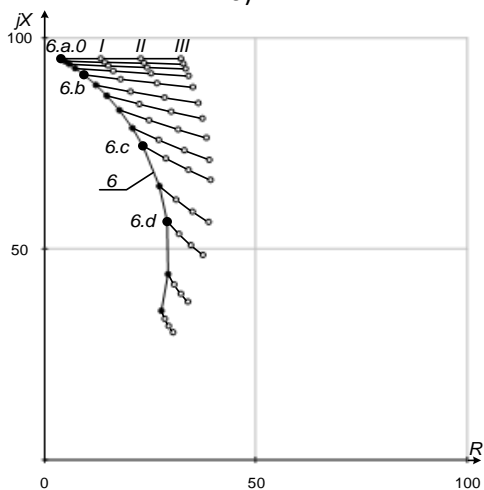
а)



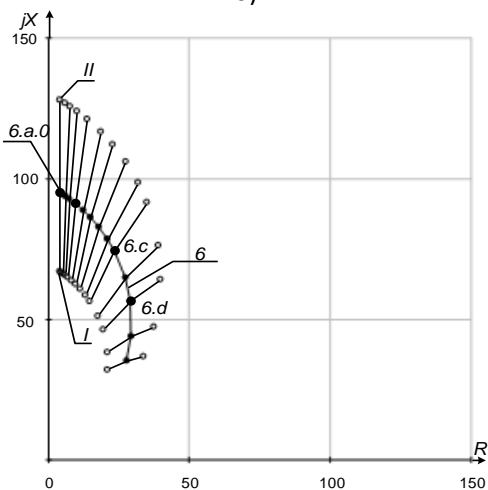
б)



б)



в)



в)

Рис. 5. Замер сопротивления ИОС при КЗ через переходное сопротивление  $R_n$  (точки 0 –  $R_n = 0$ ; I –  $R_n = 0,1X_T$ ; II –  $R_n = 0,2X_T$ ; III –  $R_n = 0,3X_T$ ) на стороне НН: а – двухобмоточного (2,5 МВА); б – трехобмоточного (6,3 МВА); в – двухобмоточного с расщеплением (25 МВА) трансформатора ответвления Т1 при изменении нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА (точки а, б, с, d соответствуют  $S_{НАГР2} = 0, 10, 50, 100$  МВА)

Рис. 6. Замер сопротивления ИОС при КЗ на стороне НН: а – двухобмоточного (2,5 МВА); б – трехобмоточного (6,3 МВА); в – двухобмоточного с расщеплением (25 МВА) трансформатора ответвления Т1 с учетом положения РПН (точки 0 – среднее положение, I –  $-\Delta U_{рпн}$ , II –  $+\Delta U_{рпн}$ ) при изменении нагрузки эквивалентного ответвления от 0 до 200 МВА (точки а, б, с, d соответствуют  $S_{НАГР2} = 0, 10, 50, 100$  МВА)



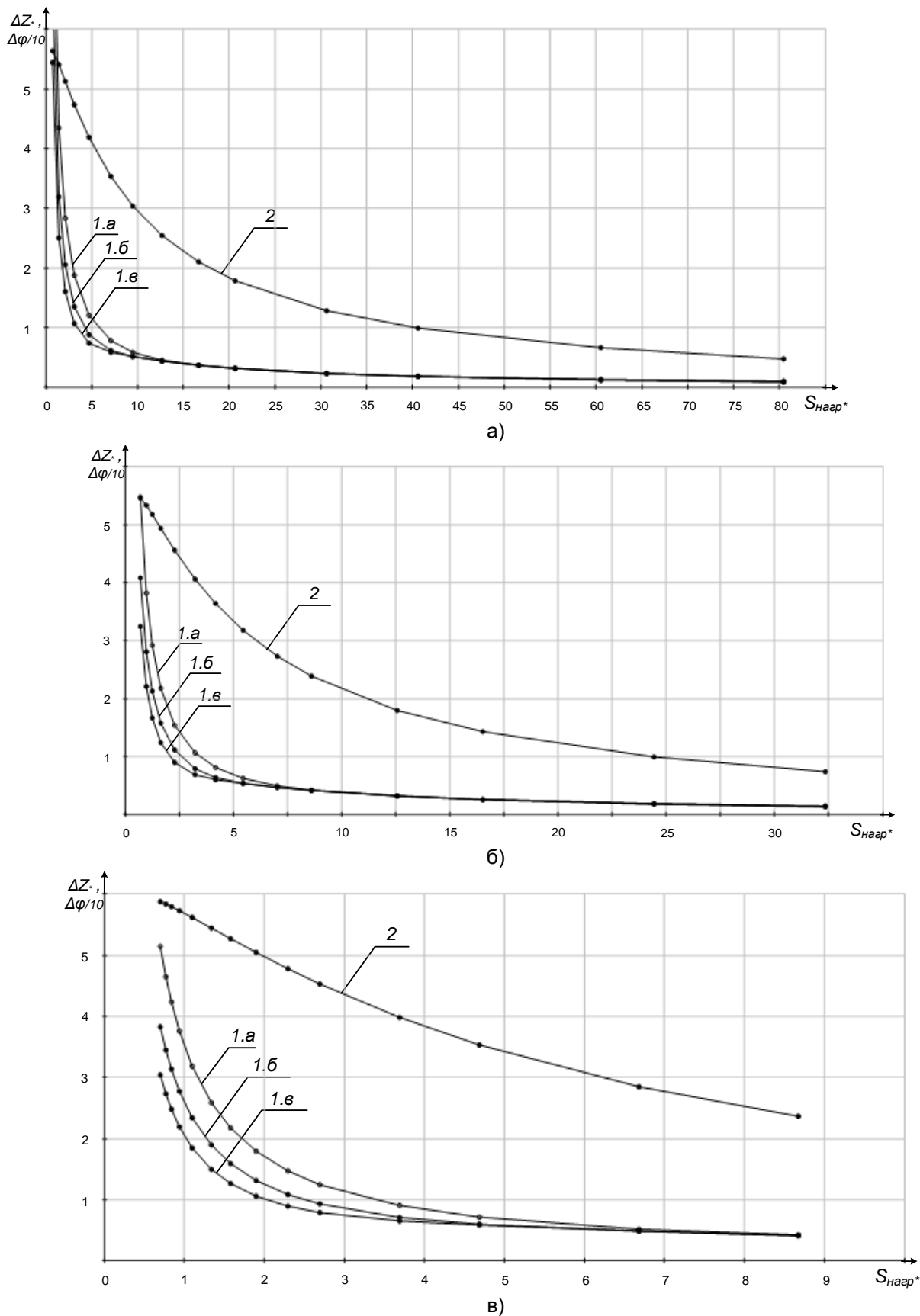


Рис. 7. Зависимости  $\Delta Z^*$  (кривая 1.а, 1.б, 1.в – при  $K_{зап} = 1,5; 2,0; 2,5$  соответственно) и  $\Delta\phi$  (кривая 2) от  $S_{нагр}^*$  предлагаемой ДЗ для случая установки на защищаемом ответвлении: а – двухобмоточного; б – трехобмоточного; в – двухобмоточного с расщеплением трансформатора

Предлагаемый ИОС ДЗ обеспечивает распознавание режимов КЗ и без КЗ при любых реально возможных соотношениях между мощностью защищаемого трансформатора и суммарной мощностью нагрузки всех ответвлений линии.

### Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. **Рубинчик В.А.** Резервирование отключения коротких замыканий в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.
3. **Нагай В.И.** Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
4. **Нагай В.И., Нагай В.В.** Резервирование в распределительных сетях напряжением 6–110 кВ: проблемы и решения // *Электро*. – 2002. – № 6. – С. 29–33.
5. **Нагай В.И., Нагай И.В.** Проблемы и решения дальнего резервирования трансформаторов ответвительных и промежуточных подстанций // *Релейщик*. – 2009. – № 4. – С. 30–35.
6. **Исследование** функционирования защиты дальнего резервирования воздушной линии 110 кВ с отпаечными трансформаторами / Р.Г. Исаков, В.М. Лопухов, А.А. Шурупов, И.А. Кошельков // Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем России РЕЛАВЭКСПО: тез. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2015. – С. 53–54.
7. **Особенности** функционирования релейной защиты воздушных линий с ответвлениями [Электронный ресурс] / И.В. Нагай, В.И. Нагай, А.В. Украинцев и др. // Релейная защита и автоматика энергосистем: Междунар. конф. – М., 2017. – Режим доступа: [https://www.rza-expo.ru/doc/rza\\_materialy3.pdf](https://www.rza-expo.ru/doc/rza_materialy3.pdf)
8. **Васильев Д.С., Тарасова В.Н.** Совершенствование защиты дальнего резервирования для линий электропередачи с ответвительными подстанциями // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 01(22). – С. 26–31.
9. **Патент** 2573595 Российская Федерация МПК H02H3/40, G01R 31/08. Устройство для дистанционной защиты линии электропередачи с ответвлением / Л.М. Колесов, В.В. Можжухина; опубл. 20.01.2016, Бюл. №2.
10. **Колесов Л.М., Можжухина В.В.** Выполнение ступени дистанционной защиты с использованием информации о токах питающих концов линии с ответвлением // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – Вып. 4. – С. 44–53.
11. **Колесов Л.М., Можжухина В.В.** Анализ возможности распознавания режимов резервной дистанционной защитой, использующей сумму токов двух сторон, на линии с несколькими от-

ветвлениями // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения). Т. 3. *Электротехника*. – Иваново, 2015. – С. 442–445.

### References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh system* [Relay protection of electrical power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 520 p.
2. Rubinchik, V.A. *Rezervirovanie otklyucheniya korotkikh zamykaniy v elektricheskikh setyakh* [Short circuit protection in electric networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 120 p.
3. Nagay, V.I. *Releynaya zashchita otvetvitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey* [Relay protection of branch stations of electrical networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2002. 312 p.
4. Nagay, V.I., Nagay, V.V. *Rezervirovanie v raspreditel'nykh setyakh napryazheniem 6–110 kV: problemy i resheniya* [Redundancy in distribution networks with a voltage of 6–110 kV: problems and solutions]. *Elektro*, 2002, no. 6, pp. 29–33.
5. Nagay, V.I., Nagay, I.V. *Problemy i resheniya dal'nego rezervirovaniya transformatorov otvetvitel'nykh i promezhutochnykh podstantsiy* [Distant backup protection of branch and intermediate substation transformers: problems and solutions]. *Releyshchik*, 2009, no. 4, pp. 30–35.
6. Isakov, R.G., Lopukhov, V.M., Shurupov, A.A., Koshel'kov, I.A. *Issledovanie funktsionirovaniya zashchity dal'nego rezervirovaniya vozduшной linii 110 kV s otpaechnymi transformatorami* [Investigation of distance backup protection of an overhead 110 kV line with tap-off transformers]. *Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem Rossii RELAVEKSP0»* [Proceedings of the 3d International Conference on Relay Protection and Russian Electric Power Grid Automation, RELAVEXPO]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 53–54.
7. Nagay, I.V., Nagay, V.I., Ukraintsev, A.V., Sary, S.V., Kireev, P.S. *Osobennosti funktsionirovaniya releynoy zashchity vozdushnykh liniy s otvetvleniyami* [Operation features of relay protection of overhead lines with branches]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem»* [International Conference on Relay Protection and Power System Automation]. Moscow, 2017. Available at: [https://www.rza-expo.ru/doc/rza\\_materialy3.pdf](https://www.rza-expo.ru/doc/rza_materialy3.pdf)
8. Vasil'ev, D.S., Tarasova, V.N. *Sovershenstvovanie zashchity dal'nego rezervirovaniya dlya liniy elektroperedachi s otvetvitel'nyimi podstantsiyami* [Improving of distance backup protection for power lines with branch substations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2016, no. 01(22), pp. 26–31.
9. Kolesov, L.M., Mozzhukhina, V.V. *Ustroystvo dlya distantsionnoy zashchity linii el-*

*ektroperedachi s otvetvleniem* [Device for remote protection of power lines with a branch]. Patent RF, no. 2573595, 2016.

10. Kolesov, L.M., Mozhzhukhina, V.V. Vypolnenie stupeni distantsionnoy zashchity s ispol'zovaniem informatsii o tokakh pitayushchikh kontsov linii s otvetvleniem [Designing of a distance protection stage based on data on branched line supply end current]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 4, pp. 44–53.

11. Kolesov, L.M., Mozhzhukhina, V.V. Analiz vozmozhnosti raspoznavaniya rezhimov rezervnoy distantsionnoy zashchitoy, ispol'zuyushchey summu

tokov dvukh storon, na linii s neskol'kimi otvetvleniyami [Analysis of the possibility of recognizing the modes by distant backup protection using the sum of the currents of two ends on a line with several branches]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on State and Prospects of Electric and Thermal Technology Development]. Ivanovo, 2015, vol. 3, pp. 442–445.

---

*Колесов Лев Михайлович,*

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: kolesovlm@yandex.ru

*Kolesov Lev Mihaylovich,*

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

*Можжухина Виктория Владимировна,*

ООО «ВиВа Энерго», магистр, инженер, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: mvv277@gmail.com

*Mozhzhukhina Viktoria Vladimirovna,*

ViVa Energo Ltd, Master student, engineer, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: mvv277@gmail.com