

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

---

УДК 621.316

**Никита Андреевич Родин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново,  
e-mail: nikita\_iv\_96@mail.ru

### **Избиратель поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи напряжением 110–500 кВ с применением органа сопротивления нулевой последовательности**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В целях определения поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи напряжением 110–500 кВ применяется ряд способов, один из которых основан на применении измерительных органов сопротивления прямой последовательности. Указанный способ не позволяет в полной мере определить тип повреждения, так как обладает зоной нечувствительности к части повреждений в окрестностях места перехода с воздушного участка на кабельный. Другие способы, основанные на применении дистанционных измерительных органов, могут быть эффективны только при определенных соотношениях длин кабельного и воздушного участков. В связи с этим актуальной является задача повышения эффективности избирателей поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи с применением измерительных органов сопротивления.

**Материалы и методы.** Исследование проведено с использованием методов анализа электрических цепей, метода симметричных составляющих. Реализация дистанционного измерительного органа нулевой последовательности произведена в системе автоматизированного проектирования MathCAD, обработка результатов – в программном комплексе MATLAB.

**Результаты.** Предложен способ определения поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи напряжением 110–500 кВ с использованием дистанционных измерительных органов нулевой последовательности, обладающий повышенной эффективностью по сравнению с классическими измерительными органами сопротивления прямой последовательности. Проведено исследование влияния взаимного угла между электродвижущими силами систем по сторонам кабельно-воздушной линии электропередачи реальной конфигурации и сопротивления дуги в месте повреждения на эффективность предложенного способа определения поврежденного участка.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют повысить эффективность применения дистанционных измерительных органов в целях определения поврежденного кабельного участка кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ с последующим сигналом запрета действия автоматического повторного включения.

**Ключевые слова:** автоматическое повторное включение, кабельно-воздушная линия электропередачи, измерительный орган сопротивления нулевой последовательности, однофазное короткое замыкание

**Nikita Andreevich Rodin**

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nikita\_iv\_96@mail.ru

## Selector of a fault section of a 110–500 kV mixed transmission line using a zero-sequence impedance relay

### Abstract

**Background.** To identify a fault section of a 110–500 kV mixed power transmission line, several methods are used. One of them is based on the application of positive-sequence impedance measuring units. This method doesn't fully allow determining the type of fault, as it has a dead zone for certain faults in the vicinity of the transition point from the overhead section to the cable section. Other methods based on the use of impedance measuring units can only be effective under specific ratios of the lengths of the cable and overhead sections. Thus, the task to improve the effectiveness of identifying the fault section of a mixed power transmission line using impedance measuring units is highly relevant.

**Materials and methods.** The study has been conducted using electrical circuit analysis methods and the method of symmetrical components. The implementation of a zero-sequence impedance measuring unit has been carried out in the MathCAD computer-aided design system. The research results have been processed using the MATLAB software package.

**Results.** A method to identify the fault section of a 110–500 kV mixed power transmission line is proposed, using zero-sequence impedance measuring units. This method demonstrates improved effectiveness compared to conventional positive-sequence impedance measuring units. A study has been conducted to investigate the influence of two factors on the effectiveness of the proposed method to identify the fault section: the mutual angle between the electromotive forces of the systems on either side of the mixed power transmission line of a real-world configuration, the arc resistance at the fault location.

**Conclusions.** The obtained results make it possible to improve the effectiveness of using impedance measuring units to identify the fault cable section of 110–500 kV mixed power transmission lines, followed by issuing a prohibition signal to block autoreclosing.

**Key words:** autoreclosing, mixed power transmission line, zero-sequence impedance measuring device, single-phase ground faults

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.3.025-030

**Состояние вопроса.** Измерительные органы (ИО) сопротивления получили широкое распространение в комплексах ступенчатых защит линий электропередачи (ЛЭП) и автотрансформаторов электрических сетей напряжением 110–750 кВ<sup>1</sup>. Однако дистанционные ИО находят свое применение также для определения поврежденного участка кабельно-воздушных линий (КВЛ), что предусматривает формирование характеристики срабатывания таким образом, чтобы был сформирован безусловный запрет автоматического повторного включения (АПВ) при повреждении в пределах кабельного участка [1]. Указанное достигается путем гарантированного охвата комплексного сопротивления кабельного участка характеристикой срабатывания при его расположении в начале ЛЭП [2], что позволяет отключить КВЛ с последующим запретом АПВ (рис. 1,а). При расположении кабельной вставки на расстоянии от начала и конца линии ИО сопротивления настраивают таким образом, чтобы гарантированно не охватить комплексное сопротивление кабельного участка [1]. В этом случае дистанционные ИО действуют на разрешение АПВ КВЛ (рис. 1,б).

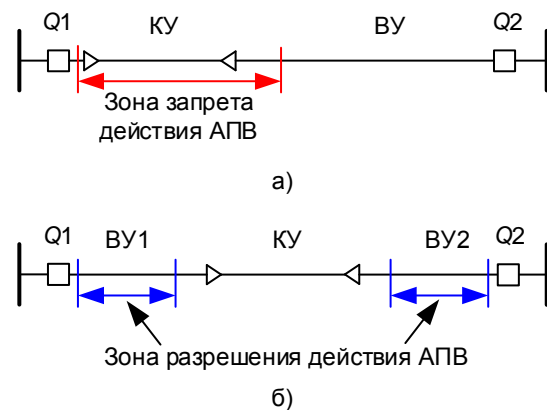


Рис. 1. Зона действия дистанционного ИО при организации АПВ КВЛ: а – расположение кабельного участка в начале ЛЭП; б – расположение кабельной вставки на расстоянии от начала и конца ЛЭП

Для организации запрета АПВ КВЛ в настоящее время применяются микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), в которых дистанционные ИО от однофазных КЗ производят замер сопротивления прямой последовательности (ПП) [3], которое определяется следующим выражением [4]:

$$Z_3 = \frac{U_\phi}{i_\phi + \frac{Z_{0уд} - Z_{1уд}}{Z_{1уд}} i_0}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13 февраля 2019 года № 101 «Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики».

где  $\dot{U}_\phi$  – напряжение поврежденной фазы;  $i_\phi$  – сила тока в поврежденной фазе;  $i_0$  – ток нулевой последовательности (НП), протекающий через место измерения;  $Z_{\text{туд}}$  – комплексное значение удельного сопротивления ПП;  $Z_{\text{оуд}}$  – комплексное значение удельного сопротивления НП.

В [5] представлен способ определения поврежденного участка КВЛ с использованием дистанционных ИО, позволяющий однозначно решить проблему определения поврежденного участка в случае заземления экранов кабелей в одной точке. Способ основан на большом отличии сопротивлений кабельной линии при повреждении изоляции между жилой и экраном кабеля и однофазном КЗ в месте перехода воздушных и кабельных участков. Для реализации способа важно, чтобы место заземления экрана было расположено на расстоянии от места расположения переходного пункта, что приводит к скачкообразному изменению замера сопротивления при перемещении места повреждения вдоль КВЛ (рис. 2).

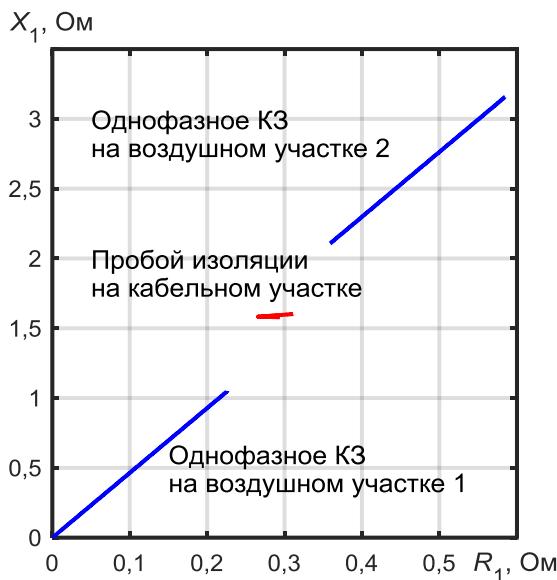


Рис. 2. Замер ИО сопротивления при перемещении места повреждения от начала к концу КВЛ напряжением 220 кВ (длина каждого участка равна 2 км, место заземления экранов – середина кабельной вставки)

Несмотря на то что благодаря разрыву в замере сопротивления при перемещении места повреждения вдоль КВЛ может быть построен способ однозначного определения поврежденного участка КВЛ, его эффективность ограничивается соотношением длин кабельного и воздушного участков, так как характеристики ИО сопротивления должны быть сформированы с учетом погрешностей измерительных преобразователей, а также неточностей расчета первичных электрических величин<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

В соответствии с вышесказанным и принимая во внимание, что способ определения поврежденного участка КВЛ с использованием ИО сопротивления предусматривает только программную реализацию без изменения аппаратной части устройств РЗА, актуальной является задача повышения эффективности избирателей поврежденного участка (ИПУ) КВЛ, основанных на использовании дистанционных ИО.

**Материалы и методы.** Для повышения эффективности ИПУ КВЛ может быть использован факт значительно большего соотношения сопротивлений НП кабельной линии при однофазном КЗ и пробое изоляции между жилой и экраном, по сравнению с аналогичными соотношениями сопротивлений ПП [6]. В современных микропроцессорных устройствах РЗА ИО сопротивления НП, по сравнению с дистанционными ИО ПП, не реализуются по причине их меньшей эффективности: индуктивное сопротивление НП линии выше сопротивления ПП не менее чем в 3 раза<sup>3</sup>, что приводит к снижению чувствительности таких органов. Однако в случае реализации ИПУ, который действует только в пределах КВЛ и не предназначен для осуществления функций релейной защиты, применение ИО НП позволяет повысить его отстроенность и чувствительность по сравнению с классическими ИО ПП из-за большой разницы сопротивлений НП кабельной линии при пробое изоляции и однофазном КЗ.

Замер дистанционного ИО НП формируется исходя из анализа схем замещения прямой, обратной (ОП) и нулевой последовательностей (рис. 3).

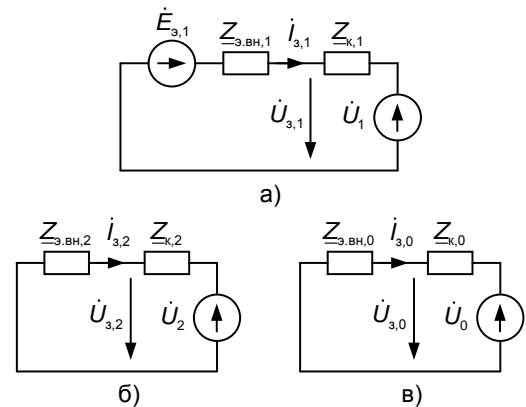


Рис. 3. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой последовательностей для формирования замера ИО сопротивления НП:  $\dot{E}_{3,1}$  – эквивалентная ЭДС ПП;  $Z_{\text{э,вн,1}}, Z_{\text{э,вн,2}}, Z_{\text{э,вн,0}}$  – эквивалентное сопротивление ПП, ОП и НП внешней сети;  $i_{3,1}, i_{3,2}, i_{3,0}$  – ток ПП, ОП и НП в месте измерения;  $Z_{\text{к,1}}, Z_{\text{к,2}}, Z_{\text{к,0}}$  – сопротивление ПП, ОП и НП от места измерения до места КЗ;  $\dot{U}_{3,1}, \dot{U}_{3,2}, \dot{U}_{3,0}$  – напряжение ПП, ОП и НП в месте измерения;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$  – напряжение ПП, ОП и НП в месте КЗ

<sup>3</sup> Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007.



Для демонстрации эффективности ИПУ с применением дистанционного ИО НП рассмотрена КВЛ напряжением 220 кВ с двусторонним питанием, входящая в состав филиала ПАО «Россети» Хабаровское ПМЭС, кабельный участок которой расположен на расстоянии от начала и конца линии (рис. 5).

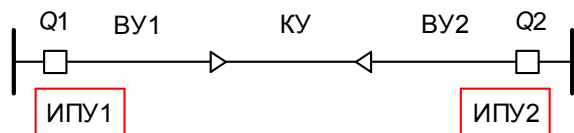


Рис. 5. Исследуемая КВЛ напряжением 220 кВ

Экран кабельного участка заземлен в середине. Линия состоит из кабельного и воздушных участков, сопоставимых по длине, что делает применение дистанционных ИО НП не эффективным в целях реализации ИПУ КВЛ.

Параметры исследуемого участка электрической сети представлены в таблице.

#### Параметры элементов исследуемого участка электрической сети

Наименование параметра	Значение	Единицы измерения
<b>Эквивалентная энергосистема 1</b>		
Номинальное напряжение	220	кВ
Активное сопротивление	0,1	Ом
Индуктивное сопротивление	2,7	Ом
<b>Эквивалентная энергосистема 2</b>		
Номинальное напряжение	220	кВ
Активное сопротивление	0,04	Ом
Индуктивное сопротивление	1,9	Ом
<b>Воздушный участок 1</b>		
Тип провода	АС-400/51	–
Тип опоры	П26М	–
Длина участка	4,6	км
Длина гирлянды изоляторов	2,5	м
<b>Кабельный участок</b>		
Марка кабеля	220 кV 1000 SQmm CU/XLPE/CWS/HDP E TAIHAN 1x1000/185-127/220	–
Расстояние между кабелями фаз	0,35	м
Способ прокладки кабелей	В вершинах равнобедренного треугольника	–
Длина участка	3	км
<b>Воздушный участок 2</b>		
Тип провода	АС-400/51	–
Тип опоры	ПС-220-5Т	–
Длина участка	4,4	км
Длина гирлянды изоляторов	2,5	м

Модель электрической сети разработана в программном комплексе MathCAD с применением модели кабельного участка, позволяющей имитировать пробой изоляции между жилой и экраном [11].

Экспериментальная часть заключалась в моделировании однофазного КЗ и пробоя изоляции между жилой и экраном в местах перехода с одного участка на другой. Для утяжеления режима при однофазном КЗ производились следующие опыты:

- изменение взаимного угла между ЭДС систем от  $-60$  до  $60$  градусов при металлическом однофазном КЗ;

- увеличение сопротивления дуги в месте однофазного КЗ от  $0$  до  $50 \text{ Ом}^4$  при фиксированном взаимном угле между ЭДС систем, равном  $-60$  и  $60$  градусам;

- устойчивый пробой изоляции между жилой и экраном кабеля с сопротивлением дуги, равным  $0,1 \text{ Ом}$  [12], при изменяющемся в пределах от  $-100$  до  $100$  градусов взаимном угле между ЭДС систем.

На рис. 6 показаны годографы векторов сопротивления НП, полученные при моделировании повреждений, представленных выше, а также характеристика срабатывания ИПУ с применением ИО НП.

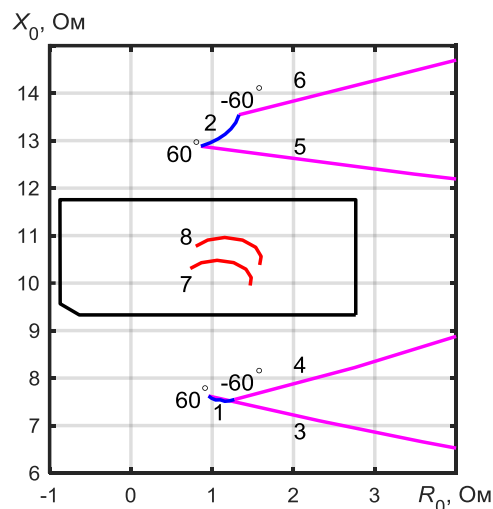


Рис. 6. Характеристика срабатывания ИПУ с применением дистанционных ИО НП и годографы векторов сопротивления в заданных режимах

Годографы векторов сопротивлений при однофазных металлических КЗ в окрестностях переходных пунктов КВЛ (рис. 6, кривые 1 и 2) не попадают в область срабатывания. Аналогичная ситуация наблюдается и при изменении переходного сопротивления от  $0$  до  $50 \text{ Ом}$  при предельном взаимном угле между ЭДС систем, равном  $-60$  и  $60$  градусам (рис. 6, кривые 3–6).

<sup>4</sup> СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования.

При пробое между жилой и экраном кабеля вблизи переходного участка годографы векторов сопротивления располагаются внутри области срабатывания (рис. 6, кривые 7 и 8).

Результаты моделирования показывают, что при всевозможных повреждениях изоляции кабельной вставки происходит срабатывание ИПУ, чего не наблюдается при однофазных КЗ на воздушных участках.

**Выводы.** Разработанный способ определения поврежденного участка позволяет повысить эффективность применения АПВ на КВЛ напряжением 110–500 кВ без использования дополнительной аппаратуры. Применение ИО сопротивления НП повышает эффективность ИПУ по сравнению с использованием классических дистанционных ИО ПП.

Полученное выражение для замера сопротивления НП может быть использовано не только в целях определения поврежденного участка КВЛ, но также и для реализации функций РЗА (например, в системах регистрации аварийных сигналов и процессов или в комплексах релейной защиты автотрансформаторов).

#### Список литературы

1. **Дмитриев М.В.** Кабельные линии высокого напряжения. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 688 с.
2. **Давлетшина А.М.** Организация релейной защиты и автоматики линий электропередачи с кабельным участком в начале линии // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т., Казань, 28–30 апреля 2021 г. – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2021. – С. 328–331.
3. **Шнеерсон Э.М.** Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
4. **Goldsborough S.L., Smith R.M.** A new distance ground relay // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1936. – Vol. 55, No. 6. – P. 697–703.
5. **Автоматическое** повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ с применением дистанционного метода определения поврежденного участка / Д.Ю. Вихарев, Е.А. Воробьева, А.Ю. Мурзин, Н.А. Родин // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 4. – С. 19–27.
6. **Логинов П.А., Мурзин А.Ю., Родин Н.А.** Определение продольных параметров прямой и нулевой последовательностей кабельной линии из схем замещения из опыта пробоя изоляции между жилой и экраном // Энергоинновации: материалы науч.-практ. конф. Молодежной секции РНК СИГРЭ, Иваново, 27 ноября 2025 года. – Иваново, 2025. – С. 106–109.
7. **Линт Г.Э.** Симметричные составляющие в релейной защите. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 160 с.
8. **Аржанников Е.А., Чухин А.М.** Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: учеб. пособие. – Иваново, 1998. – 74 с.
9. **Колесов Л.М., Можжухина В.В.** Реализация дистанционной защиты дальнего резервирования, использующей токи питающих сторон, для линии с несколькими ответвлениями // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 6. – С. 49–59.
10. **Ziegler G.** Numerical distance protection: principles and application (Siemens). – Erlangen: Publicis-MCft-Verl., 2005.
11. **Вихарев Д.Ю., Мурзин А.Ю., Родин Н.А.** Математическая модель кабельной линии электропередачи напряжением 110–500 кВ для имитации пробоя изоляции между жилой и экраном // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 5. – С. 50–58.
12. **Ширковец А.И., Губаев Д.Ф.** Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых ка-

белей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9–10. – С. 121–134.

#### References

1. **Dmitriev, M.V.** *Kabel'nye linii vysokogo napryazheniya* [High-voltage cable lines]. Saint-Petersburg: POLITEKH-PRESS, 2021. 688 p.
2. **Davletshina, A.M.** Organizatsiya releynoy zashchity i avtomatiki liniy elektroperedachi s kabel'nym uchastkom v nachale linii [Organization of relay protection and automation of power transmission lines with a cable section at the beginning of the line]. *Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Energetika i tsifrovaya transformatsiya» (Tinchurinskie chteniya – 2021)*. V 3 t., Kazan', 28–30 aprelya 2021 g. [Proceedings of international youth scientific conference Tinchurin Readings – 2021 «Energy and Digital Transformation». In 3 vols., Kazan, April 28–30, 2021]. Kazan': ООО ПК «Астор и Я», 2021, pp. 328–331.
3. **Shneerson, E.M.** *Distantsionnye zashchity* [Distance protections]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 448 p.
4. **Goldsborough, S.L., Smith, R.M.** A new distance ground relay. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1936, vol. 55, no. 6, pp. 697–703.
5. **Vikharev, D.Yu., Vorob'eva, E.A., Murzin, A.Yu., Rodin, N.A.** Avtomaticheskoe povtornoe vklyuchenie kabel'no-vozdushnykh liniy elektroperedachi napryazheniem 110–500 kV s primeneniem distantsionnogo metoda opredeleniya povrezhdennogo uchastka [Autoreclosing of 110–500 kV mixed transmission lines using a distance method to determine the damaged section]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 4, pp. 19–27.
6. **Loginov, P.A., Murzin, A.Yu., Rodin, N.A.** Opredelenie prodol'nykh parametrov pryamoy i nulevoy posledovatel'nostey kabel'noy linii iz skhem zameshcheniya iz opyta proboya izolyatsii mezhdru zhiloy i ekranom [Determining the positive and zero sequences parameters of a cable line based on equivalent circuit in the case of insulation breakdown between the core and the screen]. *Energoinnovatsii: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii Molodezhnoy seksii RNK SIGRE. Ivanovo, 27 noyabrya 2025 g.* [Energy innovations: Proceedings of the Scientific and Practical Conference of the RNC SIGRE Youth Section, Ivanovo, November 27, 2025]. Ivanovo, 2025, pp. 106–109.
7. **Lint, G.E.** *Simmetrichnye sostavlyayushchie v releynoy zashchite* [Symmetrical components in relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 1996. 160 p.
8. **Arzhannikov, E.A., Chukhin, A.M.** *Metody i pribory opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya na liniyakh* [Methods and devices for determining the location of a short circuit on lines]. Ivanovo, 1998. 74 p.
9. **Kolesov, L.M., Mozzhukhina, V.V.** Realizatsiya distantsionnoy zashchity dal'nego rezervirovaniya, ispol'zuyushchey toki pitayushchikh storon, dlya linii s neskol'kimi otvetvleniyami [Distance backup protection using supply currents on a line with several branches]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 6, pp. 49–59.
10. **Ziegler, G.** Numerical distance protection: principles and application (Siemens). Erlangen: Publicis-MCft-Verl., 2005.
11. **Vikharev, D.Yu., Murzin, A.Yu., Rodin, N.A.** Matematicheskaya model' kabel'noy linii elektroperedachi napryazheniem 110–500 kV dlya imitatsii proboya izolyatsii mezhdru zhiloy i ekranom [Mathematical model of 110–500 kV power cable line for simulating insulation breakdown between the conductor and the shield]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 5, pp. 50–58.
12. **Shirkovets, A.I., Gubaev, D.F.** Matematicheskaya model' gorennya odnofaznoy dugi v izolyatsii silovyykh kabeley s graficheskoy interpretatsiyey razvitiya proboya na osnove nelineynogo soprotivleniya dugovogo kanala [Mathematical model of arcing in power cable insulation with graphical interpretation of breakdown development based on nonlinear resistance of arc channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2012, no. 9–10, pp. 121–134.