УДК 621.311

Иван Александрович Галанин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: galanin@rza.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Схема замещения кабельной сети 6–10 кВ для локации однофазных замыканий на землю с применением искусственной нейронной сети

Авторское резюме

Состояние вопроса. Локация однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ является актуальной задачей, особенно в условиях сложных переходных процессов и различных режимов заземления нейтрали. Традиционные методы, основанные на анализе токов и напряжений нулевой последовательности, часто требуют сложных и длительных вычислений и не всегда обеспечивают высокую точность определения места замыкания. Применение искусственных нейронных сетей позволяет повысить эффективность локации однофазных замыканий на землю за счет автоматического анализа переходных процессов и адаптации к изменяющимся условиям и параметрам сети. Однако для обучения и тестирования нейронной сети необходима точная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ.
Материалы и методы. Для исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю использованы Т-образная и Г-образная схемы замещения кабельной линии 6–10 кВ. Моделирование выполнено в MATLAB/Simulink, а также с использованием разработанной нейронной сети для определения места повреждения на основе параметров переходных процессов.
Результаты. Предложена Т-образная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ, учитывающая часть сети за местом замыкания на землю. Обученная нейронная сеть продемонстрировала высокую точность локации повреждения при различных режимах заземления нейтрали и переходных сопротивлениях.
Выводы. Использование Т-образной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ при обучении и проверке искусственной нейронной сети в основе способа локации однофазных замыканий на землю позволяет повысить его селективность и адаптивность, что особенно важно для сетей с напряжением 6–10 кВ, работающих с различными режимами заземления нейтрали, при различных видах замыканий на землю.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, переходный процесс при замыкании на землю, искусственная нейронная сеть, защита на основе нейронной сети, кабельные сети 6–10 кВ

Ivan Aleksandrovich Galanin
Ivanovo State Power Engineering University, Graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: galanin@rza.ru

Tatyana Yurievna Shadrikova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Equivalent circuit of a 6–10 kV cable network for locating single-phase earth faults using an artificial neural network

Abstract

Background. Location of single-phase earth faults in 6–10 kV cable networks is a challenging task, especially in the presence of complex transient processes and various neutral grounding regimes. Traditional methods based on the analysis of zero-sequence currents and voltages often require complex and time-consuming calculations and do not always provide high fault location accuracy. The use of artificial neural networks improves the efficiency of single-phase earth fault location through automatic transient analysis and adaptation to changing network conditions and parameters. However, training and testing the neural network requires an accurate equivalent circuit for the 6–10 kV cable network.

© Галанин И.А., Шадрикова Т.Ю., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 62–71.

Materials and methods. To study transient processes during earth faults, T-shaped and L-shaped equivalent circuits of a 6–10 kV cable line have been used. Modeling of ground faults has been performed in MATLAB/Simulink. Also, an artificial neural network has been developed to determine the location of damage based on transient parameters.
Results. A T-shaped equivalent circuit for a 6–10 kV cable network is proposed, taking into account the portion of the network beyond the earth fault location. The trained neural network has demonstrated high fault location accuracy under various neutral grounding conditions and transient resistances.
Conclusions. The use of a T-shaped equivalent circuit for a 6–10 kV cable network in training and testing an artificial neural network as the basis of the method of locating single-phase earth faults allows increasing its selectivity and adaptability. It is especially important for networks with a voltage of 6–10 kV operating with different neutral grounding modes for different types of earth faults.

Key words: single-phase earth faults, earth-fault transient process, artificial neural network, neural network-based protection, 6–10 kV cable networks

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.062-071

Введение. В системах городского и промышленного электроснабжения значительная часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные сети среднего напряжения 6–10 кВ. В таких сетях однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) представляют серьезную проблему для эксплуатации электроэнергетических систем, снижая надежность электроснабжения потребителей. Несмотря на развитие способов выполнения защиты от данного вида повреждения [1–3], локация повреждений остается сложной задачей из-за различия режимов заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор, различные варианты резистивного заземления нейтрали и др.) и видов замыканий – устойчивые (металлические или через переходное сопротивление), дуговые неустойчивые (дуговые перемежающиеся, дуговые прерывистые, кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ) [4, 5]. Традиционные параметрические способы локации ОЗЗ, основанные на контроле токов и напряжений нулевой последовательности, часто требуют сложных расчетов и не всегда обеспечивают достаточную точность.

Методы машинного обучения, а именно аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), все более широко используются для решения задач электроэнергетики. Применение искусственных нейронных сетей (ИНС) открывает новые возможности для автоматизации процесса локации ОЗЗ [6, 7]. ИНС способны анализировать переходные процессы, учитывать нелинейные эффекты и адаптироваться к изменяющимся параметрам сети – электрическим величинам контура нулевой последовательности, используемым для выявления ОЗЗ, которые зависят от режима заземления нейтрали сети, а также от разновидности ОЗЗ и величины переходного сопротивления в месте повреждения. Однако для эффективного обучения ИНС необходимо, чтобы схема замещения кабельной сети 6–10 кВ учитывала часть сети за местом ОЗЗ.

В связи с этим актуальной является задача выбора расчетной схемы замещения для обучения и тестирования алгоритма локации ОЗЗ на основе ИНС с учетом технических возможностей микропроцессорного терминала РЗА.

Материалы и методы. Для расчета переходных процессов при ОЗЗ рассматривалась модель кабельной сети 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали (рис. 1), состоящая из питающей системы С с активно-индуктивным сопротивлением $Z_{сис}$, защищаемой кабельной линии (КЛ) с трансформатором тока нулевой последовательности ТТ1 и внешней сети.

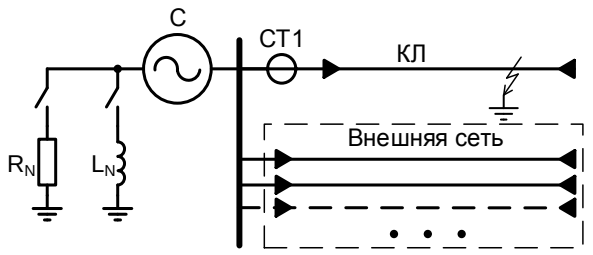


Рис. 1. Схема кабельной сети 6–10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ

Моделирование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали (рис. 1) выполнено в одной из наиболее эффективных и универсальных систем имитационного моделирования MATLAB с пакетом расширения Simulink. Создание имитационной модели требует упрощений для снижения длительности расчета и вычислительной мощности, поэтому на рис. 1 внешняя сеть, состоящая в общем случае из многих линий, представлена в виде схемы замещения (СЗ) одной эквивалентной КЛ, а защищаемая линия – схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Линия 6–10 кВ может быть задана различными схемами замещения:

1) Г-образная СЗ без учета емкости за местом ОЗЗ [8, 9];

2) Г-образная СЗ с учетом емкости за местом однофазного замыкания [10];

3) Т-образная СЗ с учетом емкости за местом однофазного замыкания.

Г-образная схема замещения в [8, 9] применялась для получения упрощенного анали-

тического решения, ее достоверность подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Переходный процесс в СЗ [10] описывается дифференциальным уравнением 6-го порядка, и аналитическое решение в общем виде невозможно, как и для Т-образной СЗ, учитывающей емкость за местом ОЗЗ. Однако неучет в схеме замещения участка КЛ за местом ОЗЗ искажает результат расчета электрических величин переходного процесса, особенно при «близких» ОЗЗ (к шинам центра питания), так как за местом ОЗЗ остается существенная часть линии. Составляющие переходного процесса, обусловленные этим участком, будут в значительной мере влиять на измерения тока и напряжения нулевой последовательности. При этом современные системы имитационного моделирования, такие как MATLAB/Simulink, позволяют выполнить расчет на более точной СЗ. В связи с этим для обучения и проверки ИНС в основе предлагаемого способа локации ОЗЗ принята наиболее точная и наиболее полная из рассматриваемых СЗ схема кабельной сети 6–10 кВ, в которой КЛ представлены Т-образной схемой замещения, а также учтены емкости за местом замыкания на землю (рис. 2).

В СЗ линии (рис. 2) учитываются: полное сопротивление прямой последовательности участка до места ОЗЗ $Z_{1н}$ и за местом повреждения $Z_{1к}$; полное сопротивление земли участка до и после места ОЗЗ $Z_{3н}$ и $Z_{3к}$ соответственно; междуфазная емкость участка КЛ до места замыкания $C_{мн}$ и после места ОЗЗ $C_{мк}$; емкость фазы на землю участка защищаемой линии до места повреждения $C_{0н}$ и после $C_{0к}$. Внешняя сеть (рис. 1, 2) смоделирована Т-образной СЗ эквивалентной кабельной линии с параметрами такой величины, чтобы суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$ соответствовал заданному. На рис. 2 для наглядности не отображены сопротивления, соответствующие активным потерям в изоляции кабеля, не превышающим 5–7 % от емкостных [4], но указанные сопротивления учтены в расчетах. Режим заземления нейтрали задается сопротивлением Z_N. Сопротивления нагрузки $Z_н$ на рис. 2 показаны пунктиром и могут не учитываются, так как они много больше продольного сопротивления КЛ (в рабочем диапазоне частот устройств защиты от ОЗЗ до 2–3 кГц), из-за чего составляющие переходного процесса при ОЗЗ, обусловленные нагрузочными сопротивлениями, в токе и напряжении нулевой последовательности малы.

При моделировании кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1) в целях получения большого числа возможных данных для обучения и проверки ИНС в основе способа локации ОЗЗ варьировались параметры, приведенные в таблице.

Для обучения нейронной сети на модели (рис. 2) рассчитывались следующие параметры электрических величин переходных процессов при ОЗЗ:

- ток нулевой последовательности защищаемого присоединения $3i_0$;
- напряжение нулевой последовательности на шинах ЦП $3u_0$;
- амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики составляющих переходных токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$.

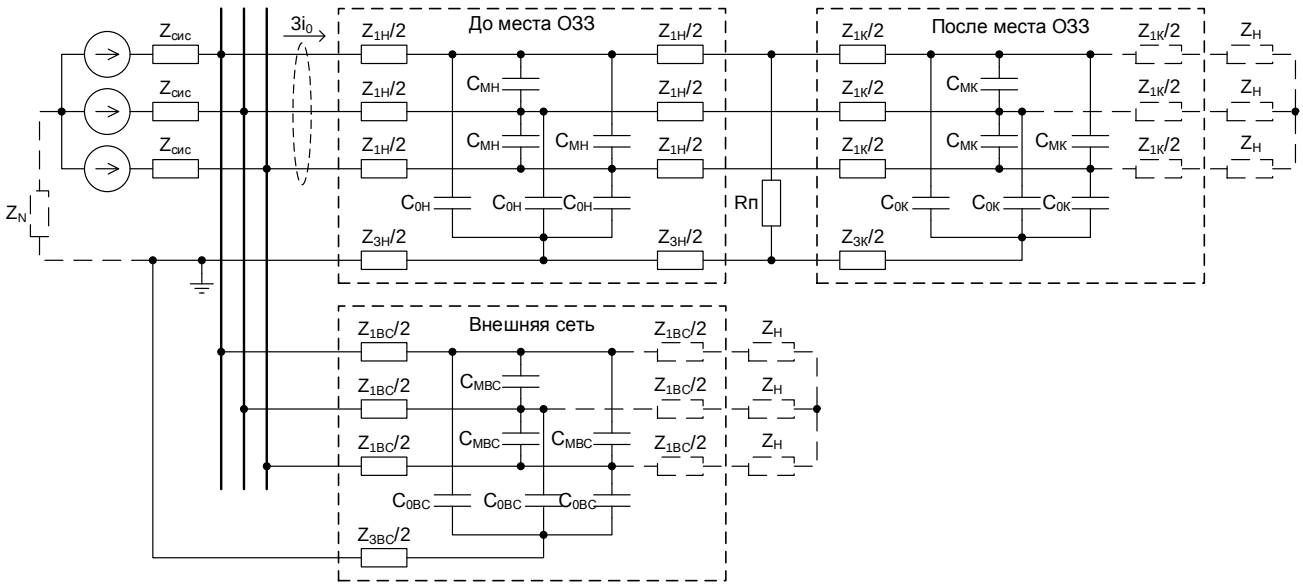


Рис. 2. Трехфазная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1) на основе Т-образной схемы КЛ

Варьируемые параметры модели кабельной сети 6–10 кВ и диапазоны их изменения

Параметр	Диапазон изменения
Ток трехфазного КЗ на шинах центра питания (ЦП), кА	5–50
Сечение защищаемой КЛ, мм^2	70, 95, 120, 150, 240
Длина защищаемой линии, м	200–4000
Суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, А	3–20
Переходное сопротивление в месте ОЗЗ $R_{\text{п}}$ [11, 12], Ом	0,01–5000
Удаленность места замыкания от шин ЦП, %	5–95

Сравнение аналитического решения переходного процесса при ОЗЗ на основе предложенной схемы и упрощенного аналитического решения. Для верификации модели кабельной сети 6–10 кВ (рис. 2) выполнено сравнение аналитического расчета электрических величин переходного процесса при ОЗЗ на основе предложенной СЗ и с использованием известного упрощенного аналитического решения [9, 10], подтвержденного экспериментальными данными.

Для аналитического расчета переходного процесса при ОЗЗ по Т-образной СЗ (рис. 2) составлена операторная схема замещения на основе метода симметричных составляющих, по которой вычислены операторный ток нулевой последовательности поврежденного присоединения $i_0(p)$ и операторное напряжение нулевой последовательности на шинах системы $u_0(p)$*:*

$$Z_k(p)\, I_k(p) = E_k(p), \qquad (1)$$

где Z_k – матрица контурных сопротивлений в операторной форме; E_k – вектор-матрица контурных ЭДС в операторной форме; I_k – вектор-матрица контурных токов в операторной форме.

Полученные операторные токи и напряжения раскладываются на сумму простейших дробей:

$$X(p) = \sum \frac{A}{p - B}, \qquad (2)$$

где A и B – комплексные коэффициенты; $X(p)$ – операторный ток или напряжение.

С помощью обратного преобразования Лапласа из полученного операторного выражения (2) находится аналитическое решение переходного процесса вида

$$X(t) = \sum A\, e^{Bt}, \qquad (3)$$

где A и B – комплексные коэффициенты; $X(t)$ – зависимость тока или напряжения от времени.

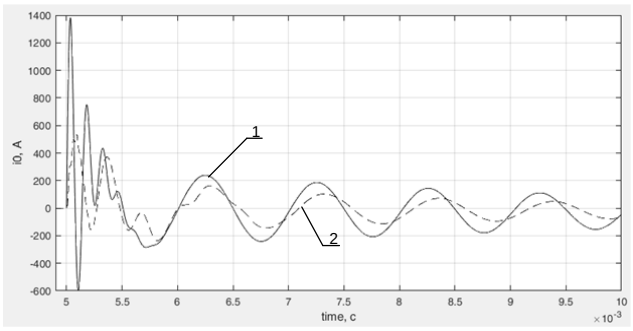
В сумме $X(t)$ разделяется на пары слагаемых с комплексно-сопряженными коэффициентами A и B, поэтому аналитическое решение может быть преобразовано к виду

$$X(t) = \sum \alpha e^{\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \qquad (4)$$

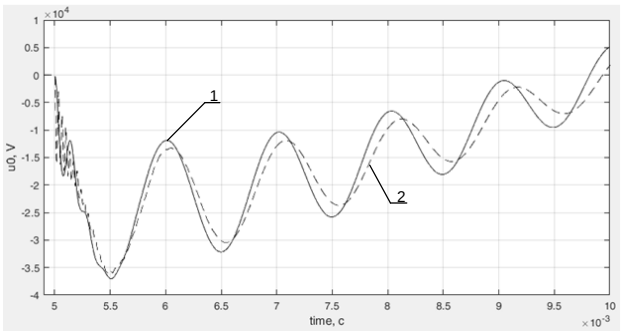
где α, β, ω и φ – действительные коэффициенты.

Сравнение токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$, полученных на основе аналитических решений переходного процесса при ОЗЗ по выражениям (1)–(4) и на основе выражений, предложенных в [9, 10], приведено на рис. 3. Кривые построены в программном комплексе MATLAB.

Анализ полученных осциллограмм (рис. 3) показывает, что результаты расчетов на основе Т-образной СЗ и на основе упрощенного решения [9, 10] имеют расхождения, достигающие по амплитуде ~60 % по току $3i_0$ и ~40 % по напряжению $3u_0$ (относительно Г-образной СЗ) и до ~80 % по частоте разрядной и ~2,5 % зарядной составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Такие погрешности могут оказать существенное влияние на обучение ИНС в основе способа локации ОЗЗ в части расчета высокочастотных и среднечастотных составляющих электрических величин переходного процесса, поэтому в качестве расчетной модели сети 6–10 кВ принята модель с использованием Т-образной СЗ, учитывающей часть линии за местом ОЗЗ.



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений: пунктирная линия – на основе трехфазной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ (рис. 2); сплошная линия – по упрощенному решению [9, 10] для кабельной сети с $I_{C\Sigma}$ = 20 А: а – тока $3i_0$ поврежденного присоединения; б – напряжения $3u_0$ на шинах ЦП

Исследование влияния переходного сопротивления и удаленности ОЗЗ на параметры тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Для электрических схем, содержащих одиночный колебательный контур, активное сопротивление оказывает влияние на скорость затухания колебаний и определяет сам колебательный характер переходного процесса, но не влияет на собственную частоту колебаний. В случае сложных схем, включающих множество реактивных элементов и колебательных контуров, активное переходное сопротивление может влиять на конфигурацию контуров, что косвенно изменяет собственную частоту колебаний составляющих переходного процесса.

В схеме замещения распределительной электрической сети переходное сопротивление, выступающее в качестве активного элемента, разделяет схему на две части: до и после точки однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Таким образом, переходное сопротивление определяет структуру колебательных контуров и взаимосвязь между частями схемы, расположенными до и после точки ОЗЗ.

Из-за большого количества колебательных контуров (большого количества реактивных элементов) в электрических величинах переходного процесса при замыкании на землю содержится множество составляющих с различными параметрами (амплитудами, частотами и временами затухания).

Анализ полученных осциллограмм переходных токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$ при замыканиях на землю показал, что составляющие с временем затухания менее 0,08 мс, несмотря на возможную высокую начальную амплитуду, не оказывают существенного влияния на параметры переходного процесса ввиду их очень быстрого затухания, поэтому эти короткоживущие составляющие исключались из дальнейшего анализа. Также были исключены составляющие с очень малой амплитудой, не отличимые от естественных шумов в реальных устройствах РЗА.

В электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ принято выделять зарядную и разрядную составляющие, а также составляющую промышленной частоты 50 Гц [9, 10]. В настоящем исследовании для наглядности выделяется только одна составляющая – доминирующая, имеющая наибольшую амплитуду среди всех остальных составляющих. На рис. 4–7 приведены зависимости частоты доминирующей составляющей от переходного сопротивления $R_п$.

На рис. 8, 9 приведены зависимости амплитудно-частотных характеристик электрических величин переходного процесса от переходного сопротивления $R_п$. Составляющие разделены на частотные полосы:

- составляющие частотой 50 Гц (круглые маркеры точек);
- зарядная составляющая (маркеры точек треугольники вверх);
- разрядная составляющая (ромбовидные маркеры точек);
- высокочастотные составляющие переходного процесса, частота которых выше 20 кГц (маркеры точек треугольники вниз).

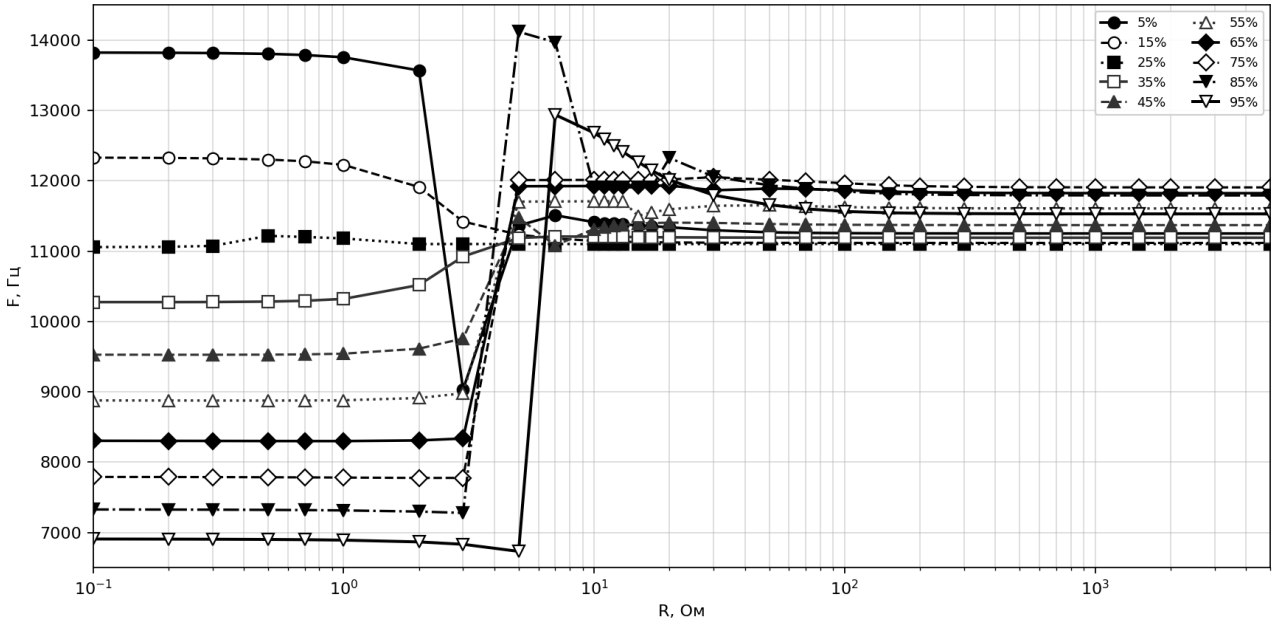


Рис. 4. Зависимость частоты доминирующей составляющей тока $3i_0$ поврежденного присоединения от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ПС (от 5 до 95 % длины линии) для кабельной сети 10 кВ с изолированной нейтралью и $I_{C\Sigma}$ = 20 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

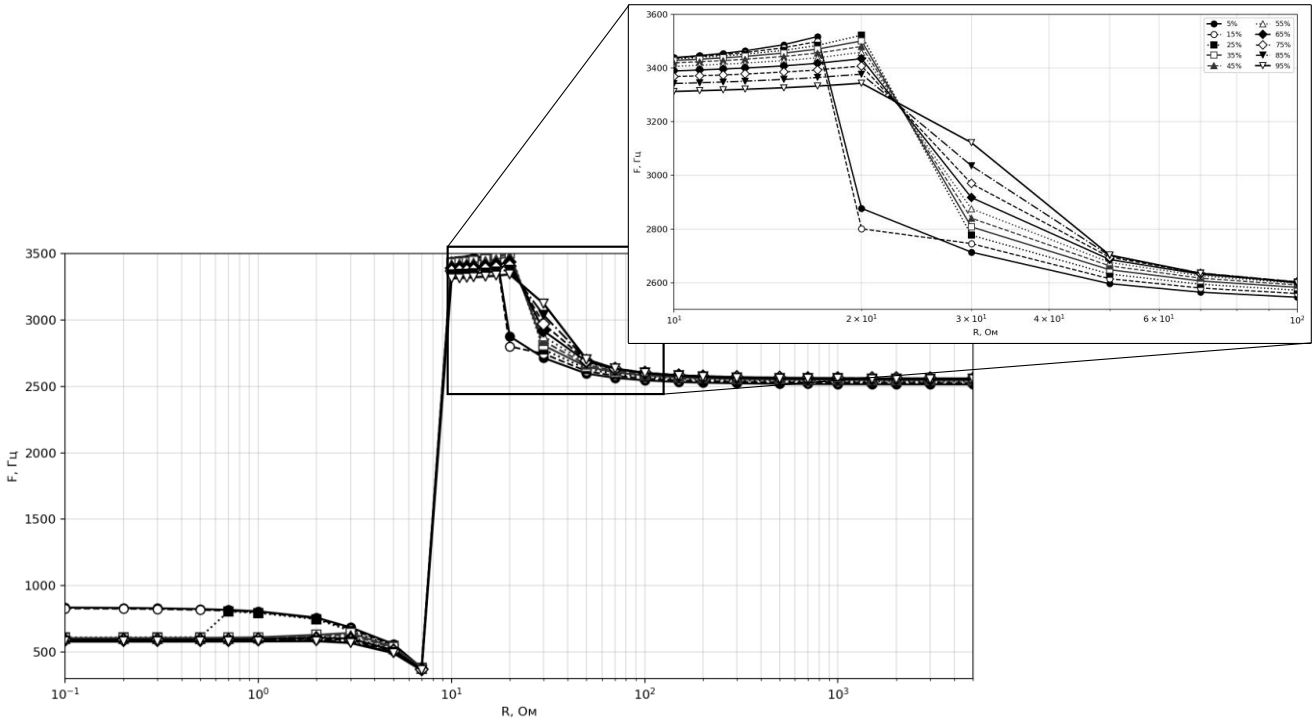


Рис. 5. Зависимость частоты доминирующей составляющей тока $3i_0$ поврежденного присоединения от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ПС (от 5 до 95 % длинны линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

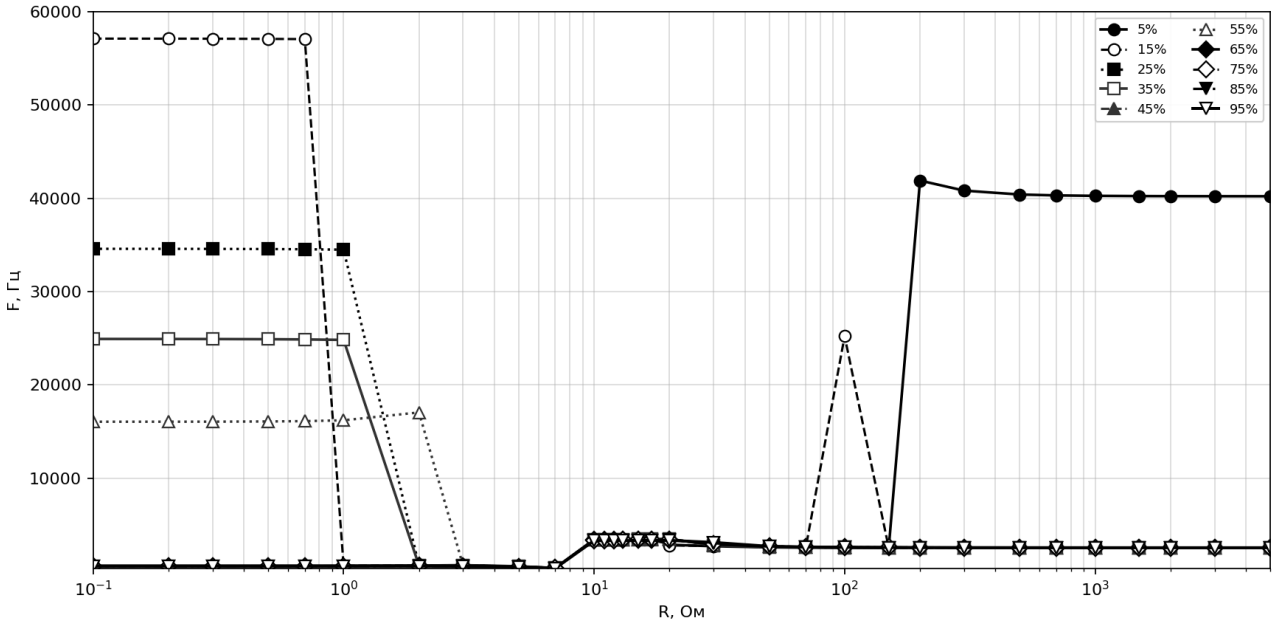


Рис. 6. Зависимость частоты доминирующей составляющей напряжения $3u_0$ на шинах ПС от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ЦП (от 5 до 95 % длины линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (с учетом составляющих частотой свыше 20 кГц)

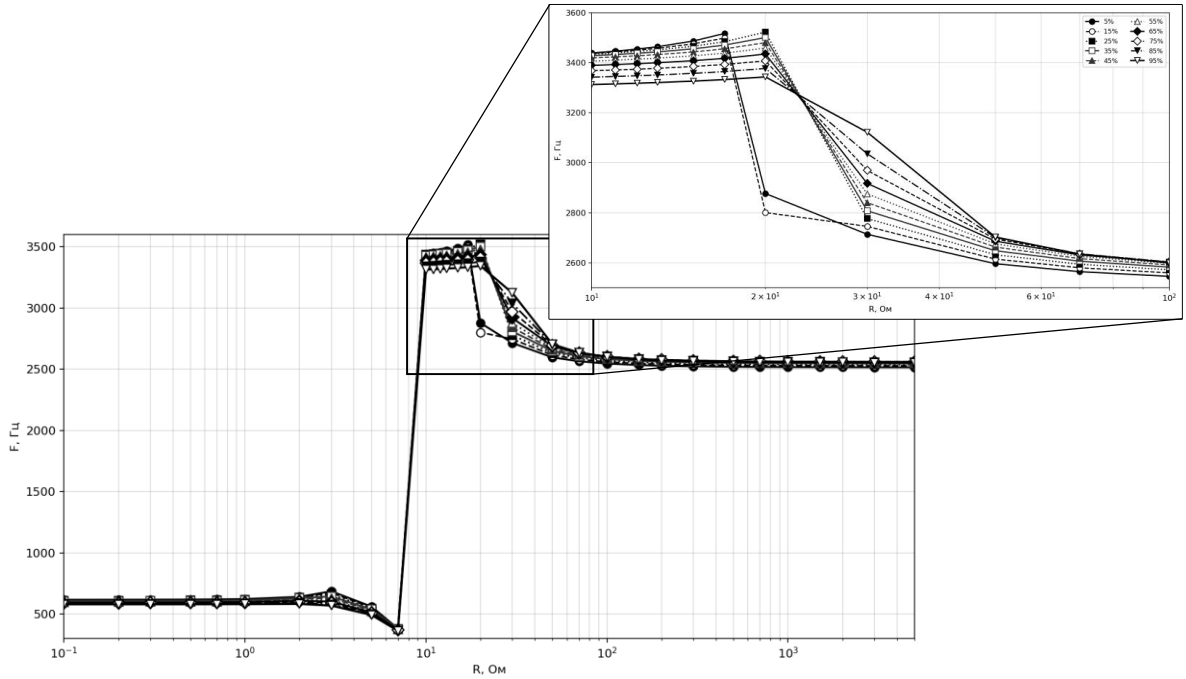


Рис. 7. Зависимость частоты доминирующей составляющей напряжения $3u_0$ на шинах ПС от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ЦП (от 5 до 95 % длины линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

Анализ полученных зависимостей (рис. 4–9) позволяет сделать следующие выводы:

1. Частоты составляющих переходного процесса $3i_0$ и $3u_0$ при ОЗЗ могут значительно изменятся. Из рис. 8,а частота зарядной составляющей тока $3i_0$ при удаленности в 5 % от ЦП изменяется с 2077 Гц при переходном сопротивлении $R_п$ 0,01 Ом до 3077 Гц при $R_п$ = 5000 Ом. Наиболее быстрое изменение происходит при переходном сопротивлении $R_п$ от 7 до 50 Ом.

2. Для всех режимов заземления нейтрали при переходном сопротивлении $R_п$ до 10 Ом зарядная составляющая $3i_0$ переходного процесса по амплитуде в десятки раз превосходит составляющую 50 Гц. При превышении значения $R_п$ свыше 10 Ом амплитуда зарядной составляющей резко снижается и при $R_п$ около 30 Ом амплитуды этих составляющих становятся соизмеримы.

3. При величине переходного сопротивления $R_п$ свыше 100 Ом зарядная составляющая тока $3i_0$ переходного процесса в разы и десятки раз меньше составляющей промышленной частоты 50 Гц.

4. Зарядная составляющая в напряжении $3u_0$ при малом переходном сопротивлении соизмерима с составляющей основной гармоники. При $R_п$ свыше 10 Ом амплитуда зарядной составляющей также резко снижается, как и в токе нулевой последовательности.

5. При переходном сопротивлении $R_п$ около 500 Ом зарядная составляющая $3i_0$ и $3u_0$ переходного процесса становится неотличима от шума.

6. Амплитуда разрядной составляющей при увеличении переходного сопротивления изменяется более плавно, чем зарядная составляющая, и может быть зафиксирована при больших переходных сопротивлениях (около 5 кОм).

7. Зависимость частоты доминирующей составляющей при малых переходных сопротивлениях (до 10 Ом) обратна удаленности от шин ЦП, т. е. чем ближе замыкание, тем выше частота доминирующей составляющей как в переходном токе, так и в переходном напряжении. При больших переходных сопротивлениях R зависимость становится прямой, т. е. чем ближе замыкание, тем ниже частота доминирующей составляющей переходного процесса. Но следует отметить, что удаленные замыкания (свыше 75 % длины линии от шин ЦП) часто не подчиняются такому правилу.

Для наглядности на рис. 8, 9 также приведены проекции переходного сопротивления $R_п$ на плоскость.

Результаты расчетов для компенсированного и комбинированного режимов работы нейтрали идентичны, поэтому данные для комбинированной нейтрали не приведены.

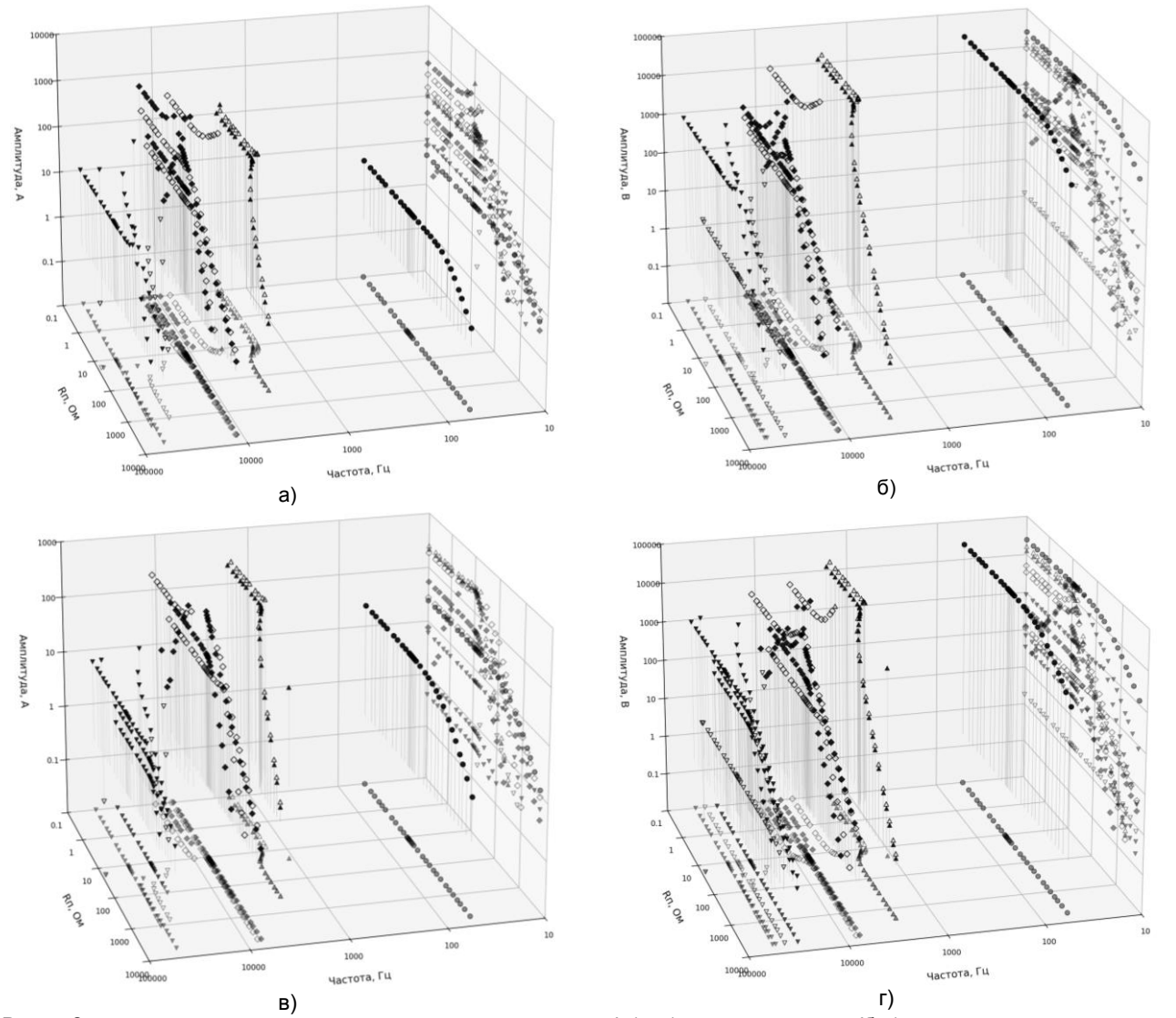


Рис. 8. Зависимости амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ (а, в) и напряжения $3u_0$ (б, г) от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности 5 и 95 % (закрашенный маркер – 5 %; полый маркер – 95 %): а, б – для изолированного режима заземления нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 20 А); в, г – для высокоомного режима заземления нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 15 А)

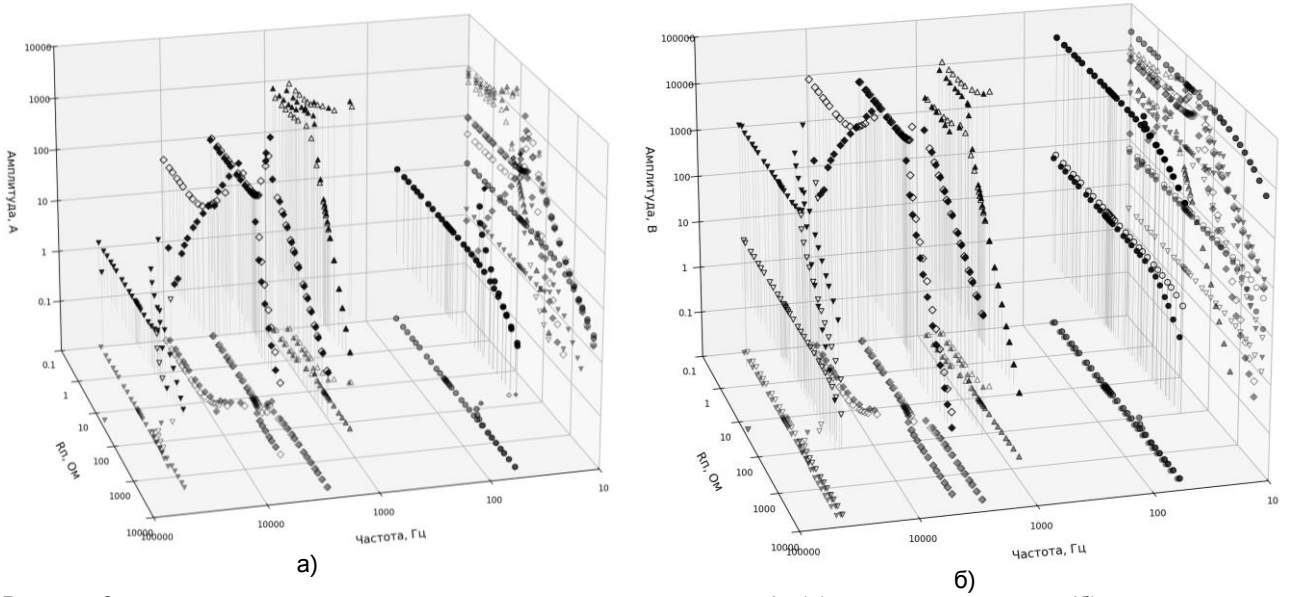


Рис. 9. Зависимости амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ (а) и напряжения $3u_0$ (б) от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности 5 и 95 % (закрашенный маркер – 5 %; полый маркер – 95 %) для компенсированного режима работы нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 60 А)

Нейронная сеть для локации ОЗЗ. Для решения задачи локации ОЗЗ разработана полносвязная ИНС на фреймворка Keras [13, 14]. Предложенная сеть состоит из шести скрытых слоев с убывающим числом нейронов. На каждом слое принята функция активации LeakyReLU с коэффициентом 0,3 для отрицательных значений. В качестве входной величины используется только ток $3i_0$ защищаемого присоединения и его производная. Выходной слой имеет 1 нейрон со значением, соответствующим удаленности места замыкания от шин ЦП.

Результаты расчетов на модели сети 6–10 кВ по рис. 2 в MATLAB подтверждают правильность функционирования разработанного способа локации ОЗЗ при различных видах замыканий на землю и удаленности повреждения от шин центра питания [15].

Выводы. Для моделирования переходных процессов при ОЗЗ в целях обучения ИНС в основе способа локации замыкания на землю выбрана Т-образная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ, учитывающая часть сети за местом ОЗЗ, с возможностью задания различных режимов заземления нейтрали.

Анализ зависимостей амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности ОЗЗ от шин ЦП для различных режимов заземления нейтрали, полученных на основе выбранной схемы замещения, показал:

1) переходное сопротивление $R_п$ в значительной степени определяет характер переходного процесса:

– при малых значениях $R_п$ (до 10 Ом) доминирует высокочастотная зарядная составляющая (в десятки раз выше промышленной частоты);

– при значениях $R_п$ выше 10 Ом ее амплитуда резко падает;

– начиная с 30–100 Ом преобладает составляющая 50 Гц;

2) поведение зарядной и разрядной составляющих различно:

– зарядная составляющая чувствительна к $R_п$: при $R_п \geq 500$ Ом она соизмерима с шумами;

– разрядная составляющая в меньшей степени зависит от $R_п$: ее можно регистрировать даже при высоких $R_п$ (до 5 кОм);

3) зависимость частоты составляющих переходного процесса от удаленности места замыкания меняется с ростом $R_п$:

– при малых $R_п$ (до 10 Ом) частота тем выше, чем ближе замыкание к шинам центра питания (обратная зависимость);

– при больших $R_п$ зависимость становится прямой: близкие замыкания дают более низкую частоту (исключение – удаленные замыкания свыше 75 % длины линии);

4) напряжение $3u_0$ изменяется качественно так же, как ток $3i_0$, но при малых $R_п$ зарядная составляющая в напряжении $3u_0$ соизмерима с составляющей основной частоты, а не превосходит ее в десятки раз, как в токе $3i_0$.

3. Исследования в MATLAB на предложенной полной модели сети 6–10 кВ разработанного способа локации ОЗЗ, определяющего расстояние до места повреждения, на основе обученной ИНС подтверждают правильность его функционирования при различных видах замыканий на землю и удаленности повреждения от шин центра питания и переходных сопротивлениях $R_п$ в месте замыкания.

Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.

2. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.

3. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33). – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

4. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.

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

6. **Argyropoulos P.E**., **Lev-Ari H**. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30, issue 5. – P. 2215–2223. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2429590.

7. **Guo M.-F., Yang N.-C., You L.-X.** Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – Vol. 99, July. – P. 706–721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013.

8. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.

9. **Особенности** использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, Д.И. Ганджаев, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 32–41.

10. **Воробьева Е.А.** Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2018. – 206 с.

11. **Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д.** Переходное сопротивление в месте ОЗЗ // Новости Электротехники. – 2017. – № 4. – С. 24–27.

12. **Шабанов В.А., Степанова В.Д.** Графоаналитическое исследование режимов однофазного замыкания // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 123–134.

13. **Круглов В.В., Борисов В.В.** Нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2002. – 382 с.

14. **Keras**. Keras API documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://keras.io/

15. **Галанин И.А., Шадрикова Т.Ю.** Обучение нейронной сети для дистанционного определения места замыкания на землю в кабельных сетях среднего напряжения // Энергоинновации: материалы науч.-практ. конф. Молодежной секции РНК СИГРЭ. – Иваново, 2025. – С. 83–86.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976.

2. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: Energoprogress, 2001. 104 p.

3. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit [Earth faults in networks 6–35 kV. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, no. 3(33). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

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

5. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk′yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel′nykh setyakh [Arc groundfault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

6. Argyropoulos, P.E., Lev-Ari, H. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, issue 5, pp. 2215–2223. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2429590.

7. Guo, M.-F., Yang, N.-C., You, L.-X. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks. *International journal of electric power and energy systems,* 2018, vol. 99, July, pp. 706–721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013.

8. Shuin, V.A. Nachal′nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel′nykh setyakh 6–10 kV [Initial phase ratios of electrical quantities during transient processes in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo,* 1991, no. 10, pp. 58–61.

9. Shuin, V.A., Gandzhaev, D.I., Sarbeeva, O.A., Shagurina, E.S. Osobennosti ispol′zovaniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa v zashchitakh ot zamykaniy na zemlyu elektricheskikh setey 6–10 kV [Features of using electrical quantities of the transient process in ground fault protection of 6–10 kV electrical networks]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 32–41.

10. Vorob'eva, E.A. *Sovershenstvovanie printsipov vypolneniya adaptivnykh tokovykh i admitansnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV*. Diss. … kand. tekhn. nauk [Improving the principles of adaptive current and admittance protection against ground faults in 6-10 kV cable networks. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2018. 206 p.

11. Kuchumov, L., Kuznetsov, A., Chervochkov, D. Perekhodnoe soprotivlenie v meste OZZ [Transient resistance at the point of the earth fault]. *Novosti Elektrotekhniki*, 2017, no. 4, pp. 24–27.

12. Shabanov, V.A., Stepanova, V.D. Grafoanaliticheskoe issledovanie rezhimov odnofaznogo zamykaniya [Graph-analytical study of single-phase short circuit modes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 123–134.

13. Kruglov, V.V., Borisov, V.V. *Neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Neural networks. Theory and practice]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2002. 382 p.

14. Keras. Keras API documentation. Available at: https://keras.io/

15. Galanin, I.A., Shadrikova, T.Yu. Obuchenie neyronnoy seti dlya distantsionnogo opredeleniya mesta zamykaniya na zemlyu v kabel′nykh setyakh srednego napryazheniya [Training a neural network to remotely detect ground faults in medium-voltage cable networks]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energoinnovatsii» Molodezhnoy sektsii RNK SIGRE* [Proceedings of scientific and practical conference. The Youth Section of the Russian National Committee of CIGRE “Energy Power Innovations”]. Ivanovo, 2025, pp. 83–86.