

Intelligent System of Relay Protection of Electrical Network 6-10 kV with the Implementation of Automatic Correction of the Operation Set Point

Shilin A.A., Dement'ev S.S., Dikarev P.V.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to develop the architecture and working algorithm of intelligent relay protection of an electrical network with an isolated neutral. "Intellectualization" of relay protection is necessary to increase its sensitivity and reliability. This problem is relevant due to the accident rate of overhead power lines and incorrect operation of traditional relays. This is due to the fact that the set point is not adjusted according to the deviation of the line parameters with changing environmental and load conditions. The purpose of the study is achieved by solving the following problems: the concept of supplementing an electronic relay with a mechanism for correcting the operation set point is proposed. The use of the digital shadow of the electrical network is substantiated. The digital shadow interrogates the sensor system. The advantage of using a digital shadow as part of relay protection has been proven. This allows emulating faults and estimating currents to correct the setpoint. The most significant result of the study is an example of the implementation of intelligent relay protection using a digital shadow in the form of an artificial neural network. The application of a neural network for approximating the current function of a two-phase short circuit is demonstrated. The significance of the results lies in the improvement of the sensitivity and selectivity of current protection due to the digital shadow for working out emergency modes. The convenience of operating and reproducing a digital shadow in the form of a neural network is noted.

Keywords: power supply reliability, relay protection and automation, digital shadows, artificial neural networks, adaptive systems, smart grid.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.02>

UDC: 621.315.17

Sistem inteligent de protecție cu relee a rețelei electrice 6-10 kV cu implementarea corectării automate a setării de preluare

Șilin A.A., Dementiev S.S., Dikarev P.V.

Universitatea tehnică de Stat din Volgograd
Volgograd, Federația Rusă

Rezumat. Scopul studiului este de a elabora arhitectura și algoritmul de lucru al unui sistem inteligent de protecție cu relee ale rețelei electrice cu neutru izolat. „Intellectualizarea” protecției cu relee este necesară pentru a crește sensibilitatea și fiabilitatea acesteia. Această problemă este relevantă din cauza ratei de accidentare a liniilor electrice aeriene și a funcționării incorecte a releelor tradiționale. Acest lucru se întâmplă din cauza incapacității de a regla curentul de setare a releului în conformitate cu abaterea parametrilor primari ai liniei de alimentare atunci când se schimbă condițiile de mediu și puterea transmisă. Scopul studiului se realizează prin rezolvarea următoarelor probleme: se propune conceptul de completare a protecției clasice de curent, realizată pe baza unui releu electronic, cu un mecanism de corectare adaptivă a punctului de referință de declanșare. Este fundamentată utilizarea umbrei digitale a rețelei electrice. Umbra digitală interoghează sistemul de senzori. Avantajul utilizării unei umbre digitale ca parte a protecției releului a fost dovedit. Acest lucru permite emularea defecțiunilor și estimarea curenților pentru a corecta valoarea de referință. Cel mai semnificativ rezultat al studiului este un exemplu de implementare a protecției releului inteligent folosind o umbră digitală sub forma unei rețele neuronale artificiale. Este demonstrată aplicarea unei rețele neuronale pentru aproximarea funcției curente a unui scurtcircuit bifazat. Semnificația rezultatelor constă în îmbunătățirea sensibilității și selectivității protecției curentului datorită umbrei digitale pentru elaborarea modurilor de urgență. Se remarcă comoditatea operațiunii și reproducerii unei umbre digitale sub forma unei rețele neuronale.

Cuvinte-cheie: fiabilitatea sursei de alimentare, protecția și automatizarea cu relee, umbre digitale, rețele neuronale artificiale, sisteme adaptive, rețele activ-adaptative.

Интеллектуальная система релейной защиты электрической сети 6-10 кВ с реализацией автоматической коррекции уставки срабатывания

Шилин А.А., Дементьев С. С., Дикарев П.В.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке архитектуры и алгоритма функционирования интеллектуальной системы релейной защиты электрической сети с изолированной нейтралью. Важность «интеллектуализации» релейной защиты объясняется необходимостью повышения её чувствительности и надёжности срабатывания. Данная проблема не теряет свою актуальность ввиду высокой аварийности воздушных линий электропередачи и частых случаев некорректной работы релейной защиты традиционной конфигурации. Это происходит ввиду отсутствия возможности настройки тока уставки реле в соответствии с отклонением первичных параметров линии электропередачи при изменении условий окружающей среды и передаваемой мощности. Поставленная цель исследования достигается решением следующих задач: в статье предложена концепция дополнения классической токовой защиты, выполненной на основе электронного реле, механизмом адаптивной коррекции уставки срабатывания. Для реализации данного механизма обосновано применение цифровой тени электрической сети, «следующей» за ней исходя из результатов опроса распределённой системы датчиков. Доказано преимущество использования цифровой тени в составе структуры релейной защиты, что позволяет эмулировать любые виды переходных процессов с учётом текущих параметров сети и оценивать токи короткого замыкания для отстройки срабатывания реле. Наиболее существенным результатом исследования является пример технической реализации интеллектуальной системы релейной защиты, использующей цифровую тень электрической сети в виде искусственной нейронной сети. При помощи нейросимулятора продемонстрированы все этапы применения нейронной сети: выбор количества нейронов в скрытом слое персептрона, подготовка данных для обучения, процесс обучения нейронной сети и её тренировки с целью аппроксимации многомерной функции тока двухфазного короткого замыкания. Значимость полученных результатов заключается в возможности существенного улучшения чувствительности и обеспечения селективности токовой защиты электрической сети посредством применения цифровой тени для отработки аварийных режимов. Отмечается удобство оперирования цифровой тенью и лёгкость её воспроизведения при реализации в виде нейросети.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, релейная защита и автоматика, цифровые тени, искусственные нейронные сети, адаптивные системы, активно-адаптивные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим систему релейной токовой защиты магистральной электрической сети с изолированной нейтралью (рис. 1) от всех видов многофазных коротких замыканий (КЗ) К (в том числе с замыканием на землю). Проанализируем абсолютно селективную защиту (срабатываемую без задержки - токовую отсечку - исключительно на защищаемом участке сети), основным измерительным органом которых является орган тока ТА. Входная воздействующая величина - ток измерительных трансформаторов тока ТА. Параметр срабатывания - ток срабатывания реле - наименьшее значение тока в органе, при котором он устойчиво срабатывает [1].

Очевидно, что ток уставки реле выбирается исходя из наиболее «тяжелого» для идентификации режима короткого замыкания, отличающегося наименьшим током.

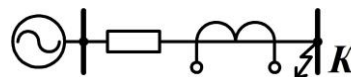


Рис. 1. Схема системы релейной защиты.¹

Подобный режим имеет место при коротком замыкании двух фаз К⁽²⁾ в самом конце защищаемого участка, как это показано на рис. 1. При этом для улучшения чувствительности в качестве тока, от которого отстраивается система защиты, будем рассматривать ток двухфазного короткого замыкания с замыканием фаз на землю. Т.е. учтём переходное сопротивление металлического смыкания проводов (0,1 Ом), а также переходное сопротивление земли (не более 5 Ом), что, согласно статистическим данным приводимым в [2], имеет место в 80 % случаев аварий, связанных с падением проводов на землю.

Не менее очевидным является и факт того, что точность вычисления тока КЗ напрямую влияет на чувствительность и точность срабатывания защиты. В классическом варианте исполнения защиты, описываемом в

¹ Appendix 1

[3, 4], ток КЗ рассчитывается единожды на основании табличных данных, касающихся погонных параметров проводов. Между тем, как это было показано ранее в [5, 6], продольные и поперечные параметры линии прямой и нулевой последовательностей достаточно изменчивы, изменчива и нагрузка электрической сети – всё это в конечном счёте обуславливает и изменчивость тока КЗ, используемого для отстройки защиты, т.е. довольно сильно влияет на точность её функционирования. Исходя из этого можно прийти к выводу о том, что улучшить качество работы релейной защиты возможно за счёт динамичной уставки, обновляемой с заданным промежутком времени с учётом актуализированной модели линии.

Всё сказанное наталкивает на необходимость использования цифровой тени электрической сети. Корпорация Microsoft определяет цифровую тень объекта как «систему связей и зависимостей, описывающей поведение физического объекта, получаемой с реального объекта при помощи IoT» (сети физических устройств, которые подключены к другим устройствам и службам через Интернет или другую сеть и обмениваются с ними данными) [7]. На практике цифровая тень электрической сети (подобно тому, как данная технология реализуется в промышленности [8-13] и городском хозяйстве [14]) может быть создана посредством опроса устанавливаемых на трассе линии датчиков (температуры проводов, гололёдообразования и т.д.), инкорпорированных в SCADA-систему. Следовательно, можно с полной уверенностью сказать, что применение цифровой тени «интеллектуализует» систему релейной защиты, а именно наделяет её способностью к адаптивному «поведению». Данный подход принципиальным образом отличается от изложенных в [15, 16, 17] и ряда других публикаций концепций защит нового поколения, не подразумевающих сбор оперативной информации об изменении электрических параметров защищаемой линии.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма функционирования предлагаемой системы релейной защиты. Как видно, левая часть блок-схемы описывает стандартный порядок действий при срабатывании токового реле: если ток, фиксируемый с помощью

трансформаторов тока TA превышает уставку реле, то происходит отключение линии [3, 4].

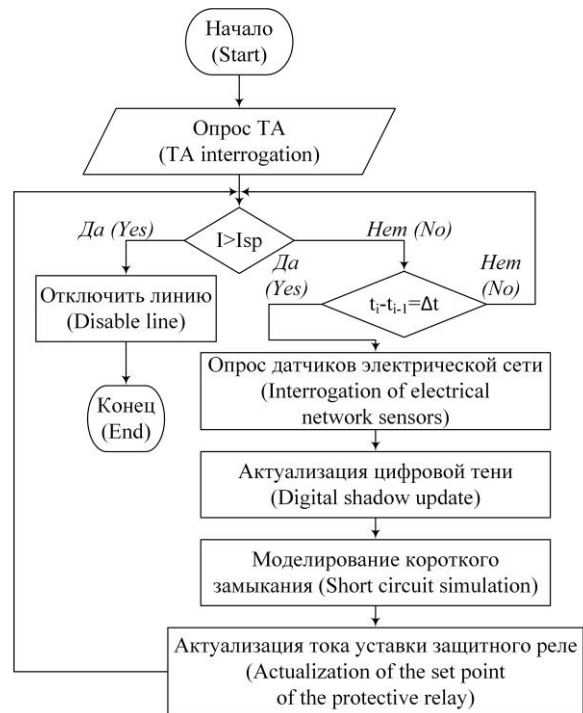


Рис. 2. Алгоритм функционирования системы защиты с коррекцией тока уставки срабатывания.²

Механизм коррекции уставки показан справа: с заданным промежутком времени Δt выполняется опрос датчиков электрической сети, выполняется актуализация цифровой тени (тем самым обеспечивается «движение» цифровой тени за реальным объектом), моделируется интересующий режим короткого замыкания – двухфазного с замыканием на землю – результатом чего становится получение более точного значения тока КЗ для коррекции уставки; скорректированное значение уставки (set point – SP) принимается в качестве опорного значения I_{sp} .

Таким образом, промежуток времени Δt есть ничто иное, как тот отрезок времени, в течение которого оператор сети считает состояние линии и её нагрузку неизменными (условно говоря, это «срок годности» сформированной модели сети, промежуток времени, в течение которого данная модель актуальна или же – шаг, на который реальный объект удаляется от своей цифровой тени).

Аппаратное воплощение системы, реализующей данный алгоритм, показано на рис. 3.

Представленная схема ещё раз указывает на тот факт, что цифровая тень электрической

² Appendix 1

сети «живёт» в виде подпрограммы, исполняемой центральным компьютером; в целом программное обеспечение компьютера подразумевает выполнение действий, связанных с актуализацией цифровой тени, моделирование на ней переходного режима, определение тока уставки и передачи данного значения на электронное реле. Также возможна и реализация на аппаратном уровне исполнительской части данной системы в виде полноценной компьютерной релейной защиты, подобно тому, как это описывается в

фундаментальной монографии Фадке и Торпа [18].

Что на практике представляет из себя цифровая тень, каким образом она может быть реализована? Например, цифровая тень может быть задана в виде модели электрической сети, созданной в среде Matlab Simulink (рис. 4). Проанализируем её основные элементы.

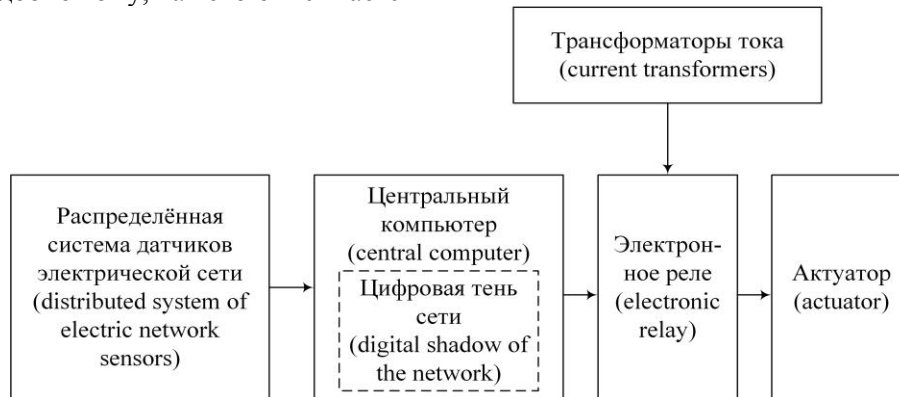


Рис. 3. Структурная схема системы защиты с коррекцией тока уставки с механизмом адаптивной коррекции тока уставки.³

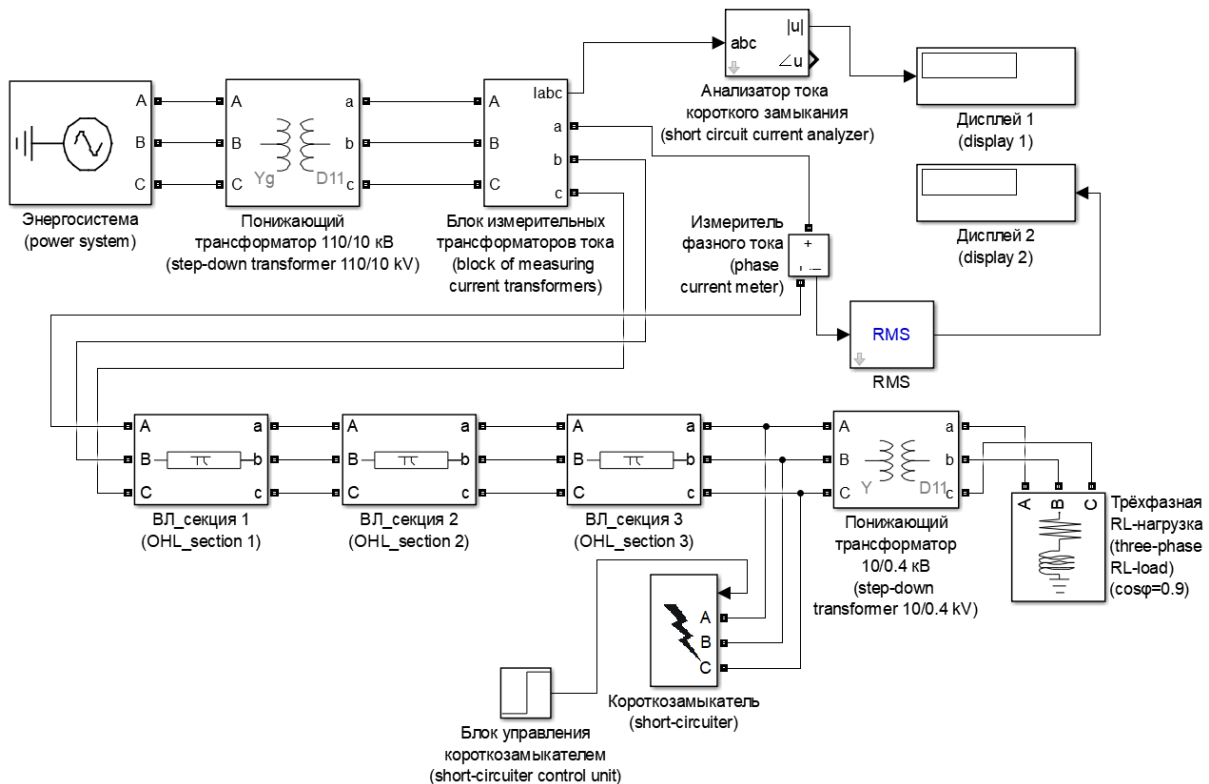


Рис. 4. Модель электрической сети в среде Simulink для эмуляции переходных режимов.⁴

Реальная линия электропередачи представляет собой неоднородную линию, продольные и поперечные параметры которой с расстоянием могут изменяться (например, вследствие разного нагрева проводов и степени гололёдообразования из-за различающихся условий внешней среды, рельефа и т.д.), что тем не менее при инженерном анализе практически не учитывается.

Повышение точности срабатывания релейной защиты требует максимально возможного учёта перечисленных факторов, обуславливающих неоднородность линии.

Для более полного приближения к реальному объекту линию можно представить в виде совокупности нескольких условно однородных участков – в данном случае трёх секций (ВЛ_секция 1, ВЛ_секция 2, ВЛ_секция 3), каждая из которых имеет П-образную схему замещения с сосредоточенными параметрами. Короткозамыкатель управляется внешним сигналом генератора (блок управления короткозамыкателя) и настроен на замыкание фаз А, В и земли с переходным сопротивлением 0,1 Ом между проводами и 5 Ом при замыкании проводов на землю.

Следовательно, обновляя с промежутком времени Δt параметры модели – цифровой тени (задавая отклонения относительно средних (начальных или номинальных) параметров активных сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей трёх секций прямой и нулевой последовательностей, а также тока нагрузки) и эмулируя затем короткое замыкание в конце защищаемой линии, можно получать более точные значения тока КЗ, используемого для задания уставки срабатывания, т.е. корректировать уставку электронного реле (см. рис. 2, 3) исходя из изменения условий окружающей среды, а также электропотребления в сети.

Повторимся, что, как известно из [5, 6], изменения условий окружающей среды приводят к отклонению параметров линии, вследствие чего, выполняя опрос соответствующих датчиков, возможна коррекция параметров каждой из трёх секций, составляющих линию. Таким образом, применение технологии цифровой тени способствует адаптивности системы релейной защиты, повышению её чувствительности и селективности.

Между тем необходимо отметить, что оперирование моделью, представленной на рис. 4, требует достаточно весомых вычислительных ресурсов. При этом фактически цифровая тень призвана реализовывать многомерную функцию тока КЗ (short circuit – SC) $I_{SC}(\delta R_1, \delta R_2, \delta R_3, \delta L_{11}, \delta L_{10}, \delta L_{21}, \delta L_{20}, \delta L_{31}, \delta L_{30}, \delta C_{11}, \delta C_{10}, \delta C_{21}, \delta C_{20}, \delta C_{31}, \delta C_{30}, \delta I_{load})$, где $\delta R_1, \delta R_2, \delta R_3$ – отклонения (в %) активных сопротивлений 1-3 секций соответственно (считая равными отклонения активного сопротивления прямой и нулевой последовательностей), $\delta L_{ij}, \delta C_{ij}$ – отклонения (в %) индуктивностей и ёмкостей соответственно i -й секции прямой ($j=1$) или нулевой ($j=0$) последовательностей, δI_{load} – отклонение (в %) тока нагрузки (load) от номинального.

Данная функция может быть с лёгкостью аппроксимирована с использованием искусственной нейронной сети – благодаря этому, представляя цифровую тень в качестве обученной нейросети (на множестве из порядка 1000 примеров – комбинаций значения выходного параметра I_{SC} и соответствующих ему значений входных параметров $\delta R_1, \delta R_2$ и т.д.), достигается значительная экономия вычислительных ресурсов центрального компьютера (рис. 3) и упрощение исполняемой программы без существенной потери точности.

Следует отметить, что в целом аппроксимация функции I_{SC} возможна на основании следствия из теоремы Колмогорова – Арнольда – Хехт-Нильсена, согласно которому возможна представимость любой многомерной функции нескольких переменных с помощью нейронной сети фиксированной размерности [19, 20]. Теория использования нейронной сети с прямой связью в качестве аппроксиматора сколь угодно сложных функций изложена в работе Джорджа Цыбенко [21].

Рассмотрим реализацию искусственной нейронной сети, а именно многослойного перцептрона, в программном пакете Statistica Neural Networks (SNN). Ключевым моментом при проектировании перцептрона является выбор количества внутренних слоёв и числа нейронов в них.

Несмотря на то, что строгой методики подбора количества слоёв в сети не

существует (предполагается эмпирическая оценка – задание сетей нескольких конфигураций, после чего исходя из погрешности на тестовых выборках выполняется выбор оптимальной), оценить количество нейронов в скрытых слоях возможно.

Например, анализ количества необходимого числа синаптических весов L_w в многослойной сети с сигмоидальными периодическими функциями реализуется по следующей формуле [20, 22]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \cdot \left(\frac{N}{m} + 1 \right) \cdot (n + m + 1) + m, \quad (1)$$

где n – размерность входного вектора значений, m – размерность выходного вектора, N – число элементов обучающей выборки.

Оценив необходимое число весов, можно рассчитать число нейронов в скрытых слоях. Скажем, для сети с одним скрытым слоем это число L составит [20]:

$$L = \frac{L_w}{n + m}, \quad (2)$$

В [20] приводятся и другие аналогичные соотношения:

$$2(n + L + m) \leq N \leq 10(n + L + m), \quad (3)$$

$$\frac{N}{10} - n - m \leq L \leq \frac{N}{2} - n - m. \quad (4)$$

В любом случае, повторимся, что выбор внутренней архитектуры многослойного персептрона является задачей, решаемой эмпирически, путём анализа и подбора, т.к. строгой теории относительно построения подобных сетей на сегодняшний день нет [19-23].

При этом пакет SNN предлагает опцию «совета» (advise), согласно которому, по мнению программы, оптимальной для нашей задачи (16 входных параметров и 1 выходной) при использовании персептрона с одним внутренним слоем является конфигурация с 8-ью нейронами в скрытом слое (рис. 5). Стоит отметить, что данная конфигурация нейросети соответствует эмпирическому «правилу пирамиды», упоминаемому в [22].

Процесс обучения нейронной сети по «учебнику» (табл. 1), составленному

посредством эмуляции интересующего нас вида КЗ на модели Simulink при различных значениях отклонений параметров линии и нагрузки, происходит достаточно быстро: уже с 20-й «эпохи» обучения по методу обратного распространения ошибки погрешность стабильно опускается ниже 0,1.

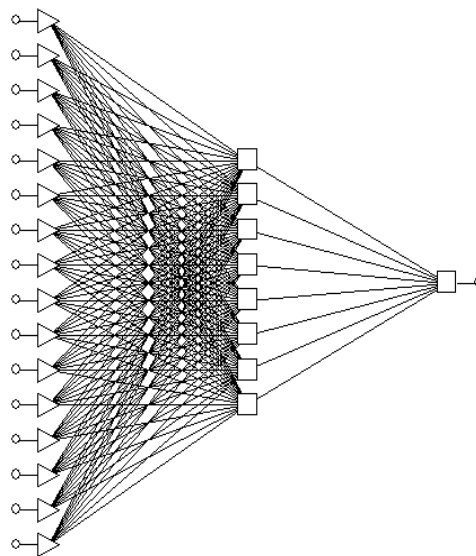


Рис. 5. Многослойный персептрон (MLP) для аппроксимации функции двухфазного КЗ с замыканием на землю в конце линии.⁵

Таблица 1.⁶

Три примера из обучающей выборки нейронной сети.⁷

Параметр (parameter)	Значение (value)		
Вход (input)			
$\delta R_1, \%$	4,93	13,49	8,41
$\delta R_2, \%$	2,07	7,76	18,80
$\delta R_3, \%$	12,84	13,33	14,94
$\delta L_{11}, \%$	2,75	8,64	21,39
$\delta L_{10}, \%$	1,65	14,07	12,45
$\delta L_{21}, \%$	9,79	13,77	12,64
$\delta L_{20}, \%$	8,40	12,42	15,32
$\delta L_{31}, \%$	6,43	16,11	14,09
$\delta L_{30}, \%$	7,25	14,31	5,09
$\delta C_{11}, \%$	2,71	17,07	6,51
$\delta C_{10}, \%$	11,20	13,64	17,95
$\delta C_{21}, \%$	12,49	18,67	16,21
$\delta C_{20}, \%$	13,16	15,92	10,70
$\delta C_{31}, \%$	4,85	15,02	13,29
$\delta C_{30}, \%$	2,35	9,73	19,34
$\delta I_{load}, \%$	11,88	9,59	7,65
Выход (output)			
I_{sc}, A	1482	1414	1407

^{5,6,7} Appendix 1

Обученная нейронная сеть демонстрирует минимальную погрешность (не более 0.17 %) на тренировочной выборке (предъявляемой нейросети выборке, не входившей в состав учебной).

Используя программный пакет NeuroPro, можем задать ту же конфигурацию нейронной сети и после обучения сети на том же учебнике оценить значимость каждого из её входов.

Кроме того, программа NeuroPro позволяет вербализовать созданную нейронную сеть. Опция вербального описания нейронной сети является чрезвычайно ценной, т.к. позволяет с лёгкостью перенести математическое описание нейронной сети, сгенерированной и обученной на персональном компьютере, в программный код, исполняемый любым другим маломощным устройством, будь то одноплатным компьютером или микроконтроллером, наделяя это устройство функционалом нейросетевой обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простейшая токовая релейная защита, выполненная на основе электронного реле, может быть усовершенствована посредством внедрения адаптивного механизма коррекции уставки срабатывания для улучшения чувствительности реагирования при КЗ на самых дальних рубежах защищаемой линии. Это достигается путём моделирования КЗ на цифровой тени электрической сети, «следующей» за реальной сетью путём актуализации информации о её состоянии за счёт опроса датчиков сети (т.к. влияние окружающей среды, фиксируемое датчиками температуры провода, гололёдообразования и т.д. оказывает непосредственное воздействие на колебания продольных и поперечных параметров линии, не говоря о естественном износе проводов и линии в целом) и отстройки защиты от непрерывно обновляемого с заданными промежутком времени значения аварийного тока. При этом цифровая тень может быть выполнена в виде искусственной нейронной сети, реализующей в соответствии с теоремой Колмогорова – Арнольда – Хехт-Нильсена с достаточно высокой точностью многомерную функцию - в данном случае функцию зависимости тока двухфазного КЗ с замыканием на землю в

конце линии от отклонений значений параметров сети от номинальных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 38/468-22.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Relay protection system diagram.

²Fig. 2. Functioning algorithm of the protection system with correction of the tripping current.

³Fig. 3. Structural diagram of a protection system with setpoint current correction with a mechanism for adaptive setpoint current correction.

⁴Fig. 4. Electrical network model in the Simulink environment for transient emulation.

⁵Fig. 5. Multilayer perceptron (MLP) for approximating the function of a two-phase short circuit with an earth fault at the end of the line.

^{6,7}Table 1. Three examples from the training set of the neural network.

Литература (References)

- [1] Bass E.I., Doroguncev V.G., Relejnaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection of electric power systems]. Moscow, 2002. 296 p. (In Russian)
- [2] Kozlov V.K., Kirzhackih E.R., Giniatullin R.A., Issledovanie vliyaniya perekhodnogo soprotivleniya na opredelenie mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nyh setyah s izolirovannoj nejtral'yu [Investigation of the influence of transient resistance on determining the location of a single-phase earth fault in distribution networks with an isolated neutral]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Elektrotehnika i energetika*, 2019, no. 1, pp. 39-46. (In Russian)
- [3] Kop'ev V.N. Relejnaya zashchita [Relay protection]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2011, 160 p. (In Russian)
- [4] Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Relejnaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection of electric power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1992, 528 p. (In Russian)
- [5] Morgan V.T. Thermal behaviour of electrical conductors: steady, dynamic and fault-current ratings. New York, Research Studies Press, 1991. 741 p.
- [6] Shilin A.N., Shilin A.A., Dikarev P.V., Ahmedova O.O. Intellektual'naya relejnaya zashchita [Intelligent Relay Protection]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 30-37. (In Russian)
- [7] Grabchak E., Medvedeva E. Cifrovye dvojniki i cifrovye teni v elektroenergetike [Digital twins and digital shadows in the power industry]. *Cifrovaya podstanciya*. (In Russian). Available: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovye-dvojniki-i-tsifrovye-teni-v-elektroenergetike/>. (accessed 22.06.2023).

- [8] El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87-92.
- [9] Qia Q., Taa F., Zuo Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing. Procedia CIRP, 2018, no. 72, pp. 237-242.
- [10] Palensky P., Cvetkovic M., Gusain D., Joseph A. Digital twins and their use in future power systems. Available at: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17435.2>. (accessed 29.06.2023)
- [11] Wu J., Yang Y., Cheng X. The development of digital twin technology review. 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020, pp. 4901-4906.
- [12] Jain P., Poon J., Singh J.P. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. IEEE Trans Power Electron, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 940-956.
- [13] Melesse T.Y., Di Pasquale V., Riemma S. Digital twin models in industrial operations: a systematic literature review. Procedia Manufacturing, 2020, vol. 42, pp. 267-272.
- [14] Deren L., Wenbo Y., Zhenfeng S. Smart city based on digital twins. Computational Urban Science, 2021, vol. 1, no. 4. Available at: <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y>. (accessed 29.06.2023)
- [15] Baohui Z., Zhiguo H., Zhiqian B. New development in relay protection for smart grid. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, vol. 1. Available at: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-016-0025-x>. (accessed 29.06.2023)
- [16] Umeda S., Matsuno A., Abe K., Hirao M., Takahashi M., Fukushima K., Kawano F., Ooku-bo M., Miyoshi T. New relay system supported to high confidence operating on real-time, The Papers of Technical Meeting on Power Protective Relay (PPR-09), 2009, pp. 45-50.
- [17] Kabalci E. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids. Measurement science review, 2013, vol. 13, no 5, pp. 248-252.
- [18] Phadke A.G., Thorp J.S. Computer relaying for power systems. Chichester, Wiley, 2009. 370 p.
- [19] Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximator, Neural Networks, 1989, vol. 2, pp. 359-366.
- [20] Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2002, 382 p. (In Russian)
- [21] Cybenko G.V. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, Mathematics of Control Signals and Systems, 1989, vol. 2, no. 4, pp. 303-314.
- [22] Masters T. Practical neural network recipes in C++. Boston, Academic Press Inc, 1993. 494 p.
- [23] Uhrig R.E. Introduction to artificial neural networks, Proc. of IECON-95 – 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 33-37. doi: 10.1109/IECON.1995.483329.

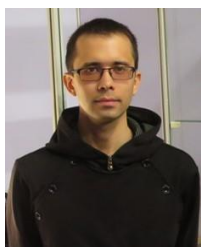
Сведения об авторах.



Шилин Алексей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: активно-адаптивные электрические сети, искусственные нейронные сети
E-mail: shilin.jr@gmail.com



Дикарев Павел Владимирович – преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: релейная защита и автоматика, энергоинформационные системы
E-mail: dikarev.pavel@mail.ru



Дементьев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: информационно-измерительные и управляющие системы в электроэнергетике
E-mail: c165tc34@yandex.ru