

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.316.925:621.315.1
DOI 10.26583/gns-2022-04-04
EDN EJATOG

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С МАЛЫМИ
ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

© 2022 Шилин Александр Николаевич¹, Дикарев Павел Владимирович²,
Дементьев Сергей Сергеевич³

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия

¹eltech@vstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8726-3556>

²dikarev.pavel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5726-6729>

³c165tc34@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8510-6001>

Аннотация. Атомные электростанции (АЭС) являются одним из основных источников электроэнергии. Распределение электроэнергии, вырабатываемой АЭС, или резервное электроснабжение отдельных потребителей собственных нужд электростанции может осуществляться по сети 6-35 кВ. Данные сети работают с изолированной или компенсированной нейтралью. Это обуславливает факт того, что токи однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) при авариях на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) достаточно малы и ОЗЗ трудно идентифицируемы. В статье рассматриваются вопросы выявления ОЗЗ и соответствующего селективного реагирования системы защиты ВЛ. Доказывается ограниченность функционирования релейной защиты от ОЗЗ, построенной на классическом принципе срабатывания «если-то». Погрешность традиционной системы защиты объясняется отсутствием механизма актуализации уставок в соответствии с изменением условий окружающей среды, влияющих на ёмкостную составляющую проводимости воздушных линий. В качестве примера подобного влияния описывается воздействие оледенения проводов, а также трибоэлектрического эффекта в виде накопления объёмного заряда в воздушном промежутке вокруг линии. В связи с этим описывается способ коррекции уставок защиты за счёт периодических измерений ёмкости линий путём их локационного зондирования. Таким образом, предлагается усовершенствовать традиционную токовую защиту от ОЗЗ путём придания системе способности к адаптации, но в рамках её реагирования как агента с простым поведением. Рассматривается построение и более совершенной системы защиты от ОЗЗ в виде интеллектуального агента электрической сети. Сущность данной системы заключается в использовании искусственной нейронной сети в качестве обрабатывающего информацию субагента. Доказывается преимущество нейрокомпьютерной системы защиты от ОЗЗ, формирующей интегральную оценку состояния линий электропередачи и обучающейся выявлению ОЗЗ на цифровой тени, следующей за электрической сетью. Указывается возможность классификации предлагаемой системы защиты от ОЗЗ как интеллектуального агента в силу наличия способностей к адаптации, обучению и развитию.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, резервирование собственных нужд АЭС, однофазные замыкания на землю, компьютерная релейная защита, импульсная рефлектометрия, оледенение линий электропередачи, трибоэлектрический эффект, интеллектуальные агенты, искусственные нейронные сети, цифровые тени.

Для цитирования: Шилин А.Н., Дикарев П.В., Дементьев С.С. Интеллектуальная система релейной защиты воздушных линий в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 40-53. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-04>

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки 22.11.2022

Принята к печати 29.11.2022

На сегодняшний день электрические сети класса 6-35 кВ в России в подавляющем большинстве случаев работают в режиме с изолированной или компенсированной нейтралью. Подобное техническое решение относится и к электрическим сетям, подключаемым к атомным электростанциям (АЭС) для передачи вырабатываемой электроэнергии на среднем напряжении или резервирования электропитания отдельных потребителей собственных нужд АЭС. Особенностью указанных электрических сетей является низкий уровень токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), в связи с чем зачастую подобная неисправность не классифицируется как короткое замыкание, а регламент Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей в одних случаях требует немедленного отключения линии электропередачи, а в других – сигнализации и определения места ОЗЗ с последующей изоляцией повреждённого участка сети [1]. При этом следует отметить, что на долю однофазных замыканий на землю приходится около 70-80 % от общего числа аварий в сетях 6-35 кВ [2], что указывает на исключительную актуальность проблемы регистрации ОЗЗ и соответствующей защиты линий. Тем не менее ввиду указанного обстоятельства – малых токов ОЗЗ, не превышающих 20-30 А (даже при большом количестве отходящих линий) – создание аппарата селективной и высокочувствительной защиты практически невозможно, о чём прямо заявляется М.А. Шабодом [1]. На наш взгляд, последнее утверждение абсолютно справедливо в рамках применения классической парадигмы построения терминала защиты в виде, используя терминологию прикладной информатики, агента с простым поведением – которое заключается в измерении какой-либо заданной величины, сравнения текущего значения этой величины с жёстко заданной уставкой и реагирования через систему актуаторов.

В зависимости от реализуемой методики защиты от ОЗЗ подвергаться измерениям могут напряжения или токи нулевой последовательности, сумма высших гармонических составляющих тока при ОЗЗ, «наложенный» переменный ток пониженной частоты (25 Гц) и т.д. Тем не менее, повторяясь, можно сказать, что базовый принцип срабатывания (поведения) защит, построенных на перечисленных способах, одинаков. Ограниченность данного подхода объясняется следующим: агент (система релейной защиты) оперирует информацией, получаемой от единственного субагента, при этом исключительно в рамках модели «ЕСЛИ (условие) ТОГДА действие», что является априори недостаточно эффективным в условиях функционирования агента в реальной окружающей среде (отличающейся многообразием и изменчивостью) и действий в отношении реального объекта (характеризуемым множеством непрерывно изменяющихся параметров). Таким образом, приблизиться к идеалу селективной и высокочувствительной защиты от ОЗЗ можно, сформулировав в первую очередь постулаты об:

– адаптивности системы релейной защиты, её построения в виде интеллектуального (обучающегося) агента, способного обучаться и развиваться в процессе взаимодействия с окружающей средой, обладать базой примеров необходимых реакций с возможностью её пополнения. Выражаясь более конкретно, это означает наличие механизма адаптации параметров срабатывания защиты в соответствии с внешней средой – например, коррекции с заданной периодичностью тока уставки в соответствии с изменением ёмкости защищаемой линии, учётом неполноты замыкания на землю (при ОЗЗ через переходные сопротивления), а также принимая во внимание иные факторы влияния, известные из общей «картины мира», которой оперирует агент;

– интегральном критерии оценки состояния линии, на основании которого и принимается решение о немедленном отключении линии, несрабатывании или срабатывании «на сигнал» (сигнализации). Выяснение состояния линии будет тем точнее, чем большее количество факторов (в том числе и неформальных) учитывается при данном рассмотрении, что и позволит интеллектуальному агенту (аппарату релейной защиты) дать взвешенную многостороннюю оценку и предпринять действие, наиболее корректное на текущий момент времени.

Всё вышесказанное свидетельствует о том, что защита линий электропередачи от ОЗЗ относится к классу задач, решаемых искусственным интеллектом. Непосредственным образом его функции могут исполняться с помощью искусственной нейронной сети – технологии моделирования нервной системы живого организма для реализации процессов обработки информации. Следуя этому подходу, построение системы защиты от ОЗЗ в виде интеллектуального агента следует рассмотреть в два этапа, а именно: анализа «картины мира», т.е. основных факторов воздействия (проявления) внешней среды, которые должны быть известны агенту для их учёта и коррекции возникающих искажений, а также механизма функционирования нейросети в качестве процессора для обрабатывающего субагента.

Очевидно, что наибольшее практическое значение концептуальное конфигурирование адаптивной защиты от ОЗЗ с алгоритмом срабатывания по интегральному критерию имеет применительно к воздушным линиям электропередачи (ВЛ). Передача и распределение большей части электрической энергии в сети по-прежнему выполняется посредством воздушных линий – в нашей стране эксплуатируемых зачастую в сложных климатических условиях и имеющих значительное удлинение для охвата обширных территорий – и в связи с этим подверженных многочисленным авариям.

Погрешности токовой защиты

В случае реализации токовой защиты от ОЗЗ посредством специального трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) уставка срабатывания I_C реле определяется по суммарному ёмкостному току сети за вычетом тока, характеризующего ёмкостью повреждённой линии, т.е. при помощи выражения (1) [1]:

$$I_C = 3U_\phi \omega (C_\Sigma - C_n), \quad (1)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети;

ω – циклическая частота (для сети 50 Гц 314 рад/с);

C_Σ – суммарная ёмкость всех неповреждённых линий сети;

C_n – ёмкость повреждённой (защищаемой) линии.

Анализируя данную формулу, можно прийти к выводу о том, что точность срабатывания токовой защиты от ОЗЗ непосредственным образом коррелируется с корректностью задания ёмкостей линий, составляющих электрическую сеть. В реальных условиях эксплуатации ВЛ её ёмкость не является константой и в целом зависит от множества факторов внешней среды. Перечислим основные из них.

1. Оледенение проводов. Формирование на линии гололёдных муфт сравнимо с возникновением ёмкостного делителя напряжения $C_{ГМ} // C'$, что наглядно показано на рисунке 1 ($C_{ГМ}$ – ёмкость «ледяного конденсатора», C' – ёмкость между оледенелой поверхностью фазы и землёй). Считая гололёдную муфту цилиндрической, полная погонная ёмкость C провода относительно земли определяется следующим выражением (2):

$$C = \frac{C_{ГМ}C'}{C_{ГМ}+C'}. \quad (2)$$

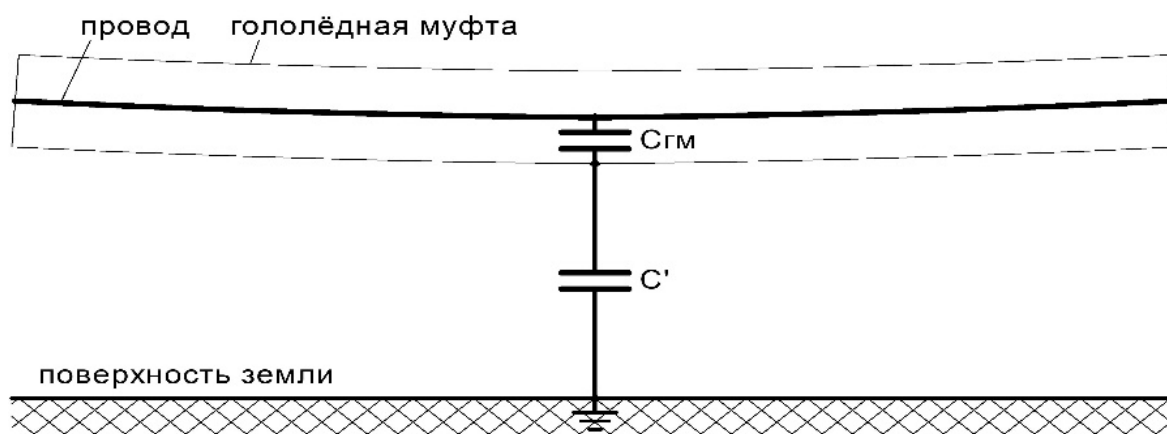


Рисунок 1 – Гололёдная муфта на проводе ВЛ и образование ёмкостного делителя
[Ice clutch on the overhead line wire and the formation of a capacitive divider]

Следовательно, без учёта гололёдообразования возникнет погрешность в задании ёмкости линии при расчёте уставок по выражению (1), которая может быть найдена (полагая пренебрежимо малым уменьшение расстояние от оледенелой поверхности фазы до земли по сравнению с отсутствием ледяной оболочки) по формуле (3):

$$ERR_C = \frac{c'}{C_{ГМ}+c'}. \quad (3)$$

2. Накопление объёмного заряда в воздушном промежутке, окружающем провода ВЛ при снежных метелях и песчаных бурях. Это явление объясняется трибоэлектрическим эффектом, который в окружающей среде может проявляться в процессе интенсивного трения частичек снега и кристаллов льда при сильных низовых потоках ветра, что приводит к возникновению у земной поверхности сильных электрических полей, а вблизи зарядившихся таким образом объектов – коронных и даже искровых электрических разрядов [3]. Воздушные линии электропередачи класса 6-10-20 кВ выполняются на относительно низких опорах, вследствие чего высота подвеса проводов не превышает 9-10 м и линию окружает среда, представляющая собой дисперсную систему «воздух-снежная пыль» [4]. Иными словами, три фазы линии могут полностью охватываться мощными взвихриваниями снежной пыли, при этом снежинки, сталкиваясь с проводами, передают им свой заряд, вследствие чего возникают разряды и соответствующие токи утечек. В одном из источников [3] отмечается, что накопившийся в воздухе объёмный заряд особенно при наличии свежеснежавшего снега может достигать 10^{-8} Кл/м³.

Проанализируем в количественном отношении влияние двух указанных факторов – оледенения и проявления трибоэлектрического эффекта при снежных метелях – на погрешность задания уставок токовой защиты от ОЗЗ при фиксированных значениях ёмкостей линий в сети. А в качестве способа снижения этой погрешности предложим непосредственное измерение ёмкости каждой линии, например, посредством её локационного зондирования импульсным рефлектометром.

Последнее требует учёта диэлектрической проницаемости льда ϵ_l как функции частоты электрического поля, т.к. на частотах выше 1 МГц (на которых и производится зондирование) величина проницаемости в десятки раз меньше, чем в пределе, близком

к статическому, в частности на относительно низкой промышленной частоте 50 Гц (3,20 против ≈ 91 соответственно).

Моделирование изменения ёмкости ВЛ в условиях гололёдообразования и наэлектризованности воздушного промежутка вблизи линии можно произвести посредством компьютерного эксперимента, задавая геометрическую модель линии, её параметры и параметры внешней среды и вычисляя соответствующие ёмкости. Расчётную модель логично построить с допущением об отсутствии влияния на картину электрического поля траверсы и стойки опоры (выполняемой чаще всего из железобетона, а ранее дерева), а также исходя из глубины моделирования 1 км, цилиндрической формы гололёдных отложений, непровисания проводов и фиксированного значения температуры воздуха и льда около 0 °С (273 К).

Результаты проведённого данным образом анализа функционирования линии 10 кВ, выполненной на ж/б опорах П10-1, характеризуют представленные на рисунке 2 графики изменения погрешности ERR_C при нарастании толщины гололёдной муфты от 0 до 30 мм в различных условиях наэлектризованности среды, т.е. при накоплении объёмного заряда воздуха ρ вплоть до $5 \cdot 10^{-13}$ Кл/м³ (что в 20000 раз меньше зарядов, регистрируемых на гористой местности или в полярных областях [3]).

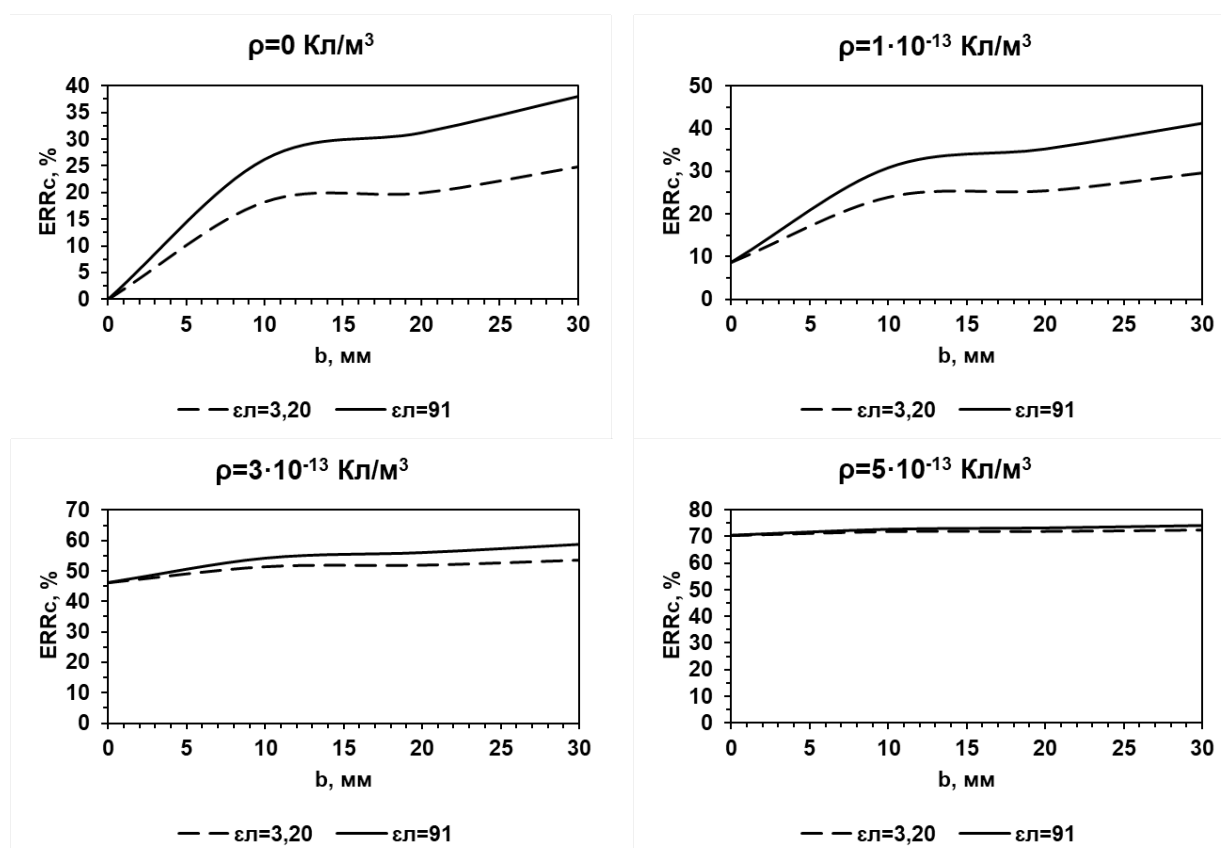


Рисунок 2 – Изменение погрешности задания ёмкости линии при гололёдообразовании и увеличении наэлектризованности воздушной среды вокруг проводов [Change in line capacity error during ice formation and an increase in the electrification of the air around the conductors]

Как видно из этой серии графиков, неучёт оледенения приводит к значительным отклонениям ёмкости линии относительно исходного значения вплоть до 38 % при отсутствии проявления трибоэлектрического эффекта в воздушном промежутке вокруг линии; накопление же объёмного заряда увеличивает эту погрешность практически в 2 раза (до 74 %). При этом, как следует из графика на рисунке 3, девиация погрешности ERR_C , вызванная несовпадением частоты импульсов (1 МГц), генерируемых

рефлектометром, и промышленной частотой передачи электроэнергии (50 Гц), практически нивелируется в ходе нарастания наэлектризованности среды вокруг линии.

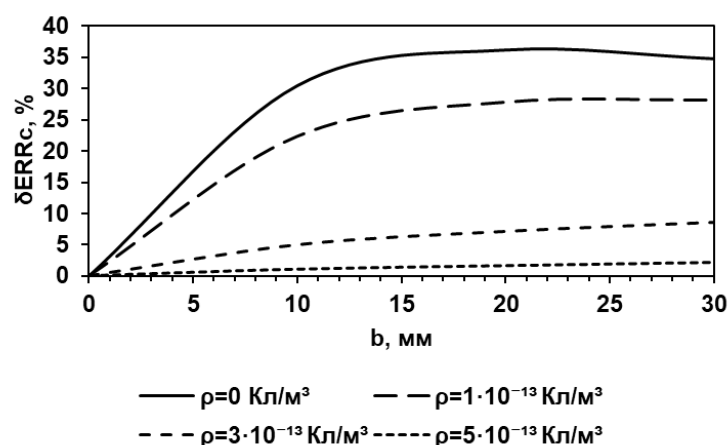


Рисунок 3 – Изменение разности между погрешностями задания ёмкости на частотах 50 Гц и 1 МГц при разном уровне наэлектризованности воздушной среды [Variation in the difference between the capacitance reference errors at 50 Hz and 1 MHz at different levels of air electrification]

В целом же величина δERR_C уменьшается при охлаждении льда в силу того, что относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_l в околостатической области (в том числе на частотах не более 100 Гц) довольно сильно зависит от температуры T согласно эмпирической формуле (4) [3]:

$$\epsilon_l(T) = 1982,084329 - 22,098339T + 0,087238T^2 - 1,1596 \cdot 10^{-4}T^3 \quad (4)$$

и понижается с 91 до 58 в диапазоне температур льда 273-233 К (однако на частоте 1 МГц остаётся практически неизменной – 3,20 и 3,17 соответственно).

Из всего вышесказанного следует, что точность срабатывания токовой защиты линий от ОЗЗ можно уже существенно улучшить, вводя в алгоритм функционирования соответствующей системы механизм адаптивного изменения уставки тока за счёт измерения с заданной периодичностью ёмкости линий.

Суть данного измерения посредством локационного зондирования заключается в следующем. На частотах от 1 МГц и выше коэффициент укорочения электромагнитной волны (показатель уменьшения фазовой скорости импульса v_ϕ относительно скорости света в вакууме c) с высокой долей точности определяется исключительно ёмкостью C_0 и индуктивностью L_0 линии на 1 км, т.е. $K_{\text{укор}} = c\sqrt{L_0 C_0}$, т.к. удельные активные сопротивление R_0 и проводимость G_0 линии электропередачи пренебрежимо малы в сравнении с соответствующими реактивными параметрами ($R_0 \ll \omega L_0, G_0 \ll \omega C_0$), при этом подробный анализ влияния R_0 и G_0 на величину фазовой скорости приведён в статье «Расчёт погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередач» [5]. Следовательно, $v_\phi = c/K_{\text{укор}} = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ и в силу того, что рефлектометром измеряется время t двойного пробега зондирующего импульса по линии длиной l , т.е. $l = t \cdot v_\phi / 2$, можно выразить C_0 при известной погонной индуктивности L_0 , формула (5):

$$C_0 = \frac{t^2}{4l^2 L_0}. \quad (5)$$

Индуктивность воздушной линии не зависит от характеристик оледенения проводов или их провисания и коррелируется только с величиной удельной проводимости земли. Количественно эта зависимость описывается хорошо известными из трудов Д.Р. Карсона выражениями для индуктивного сопротивления линии провод-земля, формула (6) [6]:

$$X_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{э.п.}}}, \quad (6)$$

где $r_{\text{э.п.}}$ – эквивалентный радиус провода, учитывающий наличие внутреннего магнитного поля провода (для стандартных проводов марки АС около 0,9 от действительного радиуса провода);

D_3 – эквивалентная глубина расположения обратного провода в земле, определяемая частотой тока (сигнала) f и удельной проводимостью земли λ , выражение (7) [6]:

$$D_3 = \frac{66,4}{\sqrt{f \cdot \lambda}}. \quad (7)$$

Таким образом, при расшифровке рефлектограммы для оценки текущего значения ёмкости линии по формуле (1) задать корректную величину индуктивности не составит труда, предварительно измерив удельную проводимость земли.

Естественно, подобный подход имеет множество ограничений, упрощений реальной «картины мира». Во-первых, следует упомянуть о том, что само оперирование понятием об удельных параметрах линии, т.е. предположением о прямой пропорциональности между длиной линии и её какой-либо характеристикой (сопротивлением, проводимостью), является допущением, т.к. реальная воздушная линия не может быть однородной, хотя бы в силу рельефа местности (о чём применительно к ёмкости линии говорится в работе «Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи» [7]), неравномерности формирования гололёдных отложений вдоль трассы линии, разности грунтов и степени их увлажнённости, возникновения на отдельных участках линии метелей с разными условиями проявления трибоэффекта, разности температур окружающей среды и т.д. В связи с этим отчасти неоднородность линии можно учесть, размещая на проводах ВЛ с заданной периодичностью искусственные неоднородности волнового сопротивления, что позволит анализировать прохождение соответствующих отражённых импульсов и формирования массива данных о $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n}$ на n условно однородных участках линии.

Этот анализ возможно осуществлять с ещё большей точностью, имея аналогичные массивы температур $T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0n}$ и проводимости грунтов $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0n}$ на заданных участках трассы линии, размещая на них датчики температуры T и проводимости λ и осуществляя их опрос по беспроводным каналам связи. Тем не менее это усложняет конструкцию системы релейной защиты и на практике в ряде случаев может являться избыточным, в силу чего достаточно ограничиться хотя бы одним комплектом датчиков T и λ на передающем конце линии (особенно при её небольшом удлинении и относительно малым разбросом геовоздействия).

Исходя из всего вышесказанного следует, что классической токовой защите от ОЗЗ, не изменяя принцип её простого поведения, можно привить определённую адаптивность посредством поочерёдных, выполняемых в том числе в автоматическом режиме измерений ёмкостей отходящих воздушных линий. Данное измерение можно осуществлять путём импульсного зондирования линий с одновременной регистрацией температуры окружающей среды и электрической проводимости грунта (опрашивая соответствующие датчики). Импульсное зондирование линий, находящихся под

напряжением, выполняется рефлектометром, подключаемым через конденсатор связи при наличии ВЧ-заградителей. Также возможно использование генераторов импульсов в совокупности с цифровым осциллографом, имеющим полосу пропускания не менее 200 МГц. О применении генератора импульсов и осциллографа для рефлектомерического анализа линий и измерения их ёмкостей и индуктивностей говорится в статье «Рефлектометрия и импульсные рефлектометры» [8].

Нейрокомпьютерная релейная защита

Как упоминалось ранее, более существенное улучшение характеристик функционирования защиты (чувствительность и селективность) можно добиться, вводя в структуру системы в качестве обрабатывающего субагента искусственную нейронную сеть. На сегодняшний день существует довольно много публикаций, касающихся в целом применения отдельных инструментов искусственного интеллекта в том числе нейросетей в составе различных систем и устройств для обработки информации о функционировании электрической сети (особенно в привязке к вопросу модернизации существующих сетей согласно технологии Smart Grid). Об этом упоминается и в фундаментальной монографии А.Г. Фадке и Д.С. Торпа [9].

Попытаемся конкретно охарактеризовать параметры искусственной нейронной сети для фиксации ОЗЗ и соответствующего управляющего воздействия. Повторяясь, отметим, что будем исходить из логического постулата о том, что взвешенная интегральная оценка состояния объекта по нескольким критериям позволяет сформировать более корректное воздействие на этот объект, нежели в результате анализа его какой-либо одной характеристики. Саму же нейронную сеть будем рассматривать в виде чёрного ящика неизвестной структуры, но удобного инструмента для того, чтобы реализовать срабатывание защиты по упомянутому интегральному критерию, а также наделить систему защиты свойствами интеллектуального агента – способностями к обучению и анализу себя в терминах поведения (ошибки и успеха) для дальнейшего развития. Эти возможности, предоставляемые нейросетью, характеризуют её как аппарат обработки информации вне зависимости от многочисленных вариантов построения и свойственны как простейшей персептронной сети, так и сетям более сложных конфигураций, описываемых в [10].

Итак, для интегрального оценивания состояния воздушной линии, отходящей от конкретной фидерной ячейки на понижающей подстанции или распределительном устройстве электростанции, на вход нейронной сети можно предоставить следующую информацию:

- 1) осциллографируемые токи нулевой последовательности на каждом фидере в виде их отношений к эталонным токовым уставкам, вычисленным до аварии в сети;
- 2) результаты гармонического (посредством быстрого преобразования Фурье) или вейвлет-анализа регистрируемых токов нулевой последовательности (как косвенный показатель ОЗЗ на той или иной линии);
- 3) разность рефлектограмм каждой отходящей линии как результат вычитания из рефлектограммы исходного состояния линии (до аварии) рефлектограммы, снятой в текущем режиме работы линии (подробнее о разностном методе выявления ОЗЗ см. в источнике [11]).

При этом пуск опроса нейронной сети на предмет интегральной оценки каждой отходящей линии и выдачи в отношении неё управляющего кода (отключить, оставить в работе, сигнализировать о неустойчивом ОЗЗ) осуществляется при регистрации измерительным трансформатором напряжения нулевой последовательности. В связи с этим возникает вопрос о предварительном обучении нейросети, т.к. корректное управляющее воздействие нейросеть может обеспечить лишь при условии её натренированности в распознавании ОЗЗ на основе обучающих примеров – каждый из которых представляет собой пару из указанного массива данных по пп. 1-3 и требуемой

реакции на предъявление этих данных [12, 13]. Процесс подобной тренировки сети является её «обучением с учителем» (заглянув в чёрный ящик, отметим, что это есть ничто иное как подбор весов синаптических связей нейронов), а для его выполнения необходим соответствующий «учебник».

Обеспечить наполнение «учебника» нейросети обучающими примерами возможно посредством использования упрощённого цифрового двойника электрической сети – её цифровой тени. В целом создание цифровых двойников, как отмечается в источнике [14], относится к числу наиболее важных трендов в развитии современных цифровых технологий, а в энергетике рассматривается как перспективный инструмент управления функционированием и развитием тех или иных энергообъектов. В контексте нашей задачи – формирования «учебника» для обучения нейросети распознаванию ОЗЗ на каждом конкретном фидере – достаточно цифровой тени электрической сети, т.е. компьютерной модели, параметры которой обновляются вслед за реальной сетью, и необходимой для предсказания поведения сети исключительно при ОЗЗ в виде выходной реакции по пп. 1-3. Иными словами, на модели сети, следующей с заданной дискретностью по времени за реальной сетью, отрабатываются ОЗЗ на каждой линии на различном удалении от фидерных ячеек, т.е. снимаются реакции (регистрируются виртуальным осциллографом), фиксируемые на фидерах повреждённых и неповреждённых линий в характеристиках по пп. 1-3, и собираются для каждой линии в соответствующие пары «реакция сети-необходимая реакция защиты».

Вместе с тем закономерным выглядят следующий ряд вопросов.

1. Каким образом регулируется количество обучающих примеров для тренировки нейросети распознаванию ОЗЗ на линиях – для каждой линии электрической сети в равном количестве или пропорционально каким-либо критериям? Очевидно, что частота тренировок нейросети выявлению ОЗЗ должна коррелироваться с надёжностью электропередачи по той или иной линии. Также очевидно, что для линии, отличающейся повышенной склонностью к авариям, количество обучающих примеров, предъявляемых нейросети, должно быть больше. При этом повреждаемость линии можно оценить по двум критериям:

а) текущие гололёдно-ветровые нагрузки, зафиксированные на трассе линии, в процентном соотношении от максимально допустимых исходя из проектной документации значений (гололёдные нагрузки могут быть измерены при импульсном зондировании по затуханию сигнала или за счёт применения специальных датчиков, ветровые нагрузки регистрируются анеморумбометрами);

б) скорость возрастания информационной энтропии dH/dt (как мера устаревания линии и снижения её эксплуатационной надёжности). Так, вероятность отказа линии по каждой i -й причине (например, оледенения или грозových перенапряжений) находится как $q_i = n_i/N$, где n_i – зафиксированное количество отказов по i -й причине, N – суммарное число неисправностей по всем m причинам ($N = \sum_{i=1}^m n_i$). Тогда по формуле, предложенной К. Шенноном [15], информационная энтропия для каждого i -го события $H_i = -q_i \log_2 q_i$, а итоговая энтропия за k -й рассматриваемый год как сумма энтропий i -х событий составит $H_k = \sum_{i=1}^m H_i$. Следовательно, рассматривая информационную энтропию как функцию времени $H(t)$, скорость её возрастания с учётом многолетней статистики эксплуатации линий (ансамбля статистических данных) может являться признаком как ухудшения состояния линии (стремительного износа) при относительно высоком dH/dt , так и улучшения (например, после реконструкции) при относительно низком dH/dt .

Тогда, опираясь на эти два пункта, возможно на начальном этапе построения системы защиты сформировать экспертную оценку варьирования количества обучающих примеров для той или иной линии, а затем заложить данный механизм в компьютерную программу. В целом же не поддаётся сомнению тот факт, что для

изношенной линии, на которой в данный момент времени зафиксировано повышенное гололёдообразование, вероятность ОЗЗ больше, в силу чего доля примеров, обучающих нейросеть распознаванию ОЗЗ именно на этой линии, также должна быть увеличена и наоборот. Количественная же характеристика этого факта, повторимся, есть предмет предварительного экспертного обсуждения для выработки соответствующей формальной зависимости.

2. По каким параметрам цифровая тень должна подражать реальной сети? В силу того, что ток ОЗЗ имеет ёмкостной характер, необходимо обеспечить следование компьютерной модели изменениям ёмкостной составляющей проводимости воздушных линий в сети. В случае упрощённой модели, представляющей каждую линию как однородную, в соответствии с её текущим состоянием корректируется величина погонной ёмкости. При использовании более сложной и точной модели, рассматривающей реальную неоднородную линию в виде отдельных условно однородных секций, обновляются значения ёмкостей на этих выделенных участках. При работе в составе цифровой тени виртуального рефлектометра требуется следование и за величиной индуктивности линий для снятия показаний по п. 3. Не требует пояснений и тот факт, что цифровая тень электрической сети должна подражать изменению её топологии, например, при погашении подключений отдельных линий или их участков, коммутируемых реклоузерами.

3. Каким образом за реальной сетью следует её цифровая тень? Одним из методов переноса характеристик воздушной линии в компьютерную модель может являться проводимое с заданной периодичностью локационное зондирование с последующим косвенным измерением ёмкости. Суть и порядок выполнения данной процедуры подробно описаны выше.

Резюмируя, можно сформулировать алгоритм адаптации параметров искусственной нейронной сети к текущим условиям функционирования линий за счёт тренировки обнаружению однофазных замыканий на цифровой тени, следующей за реальной электрической сетью (рис. 4).

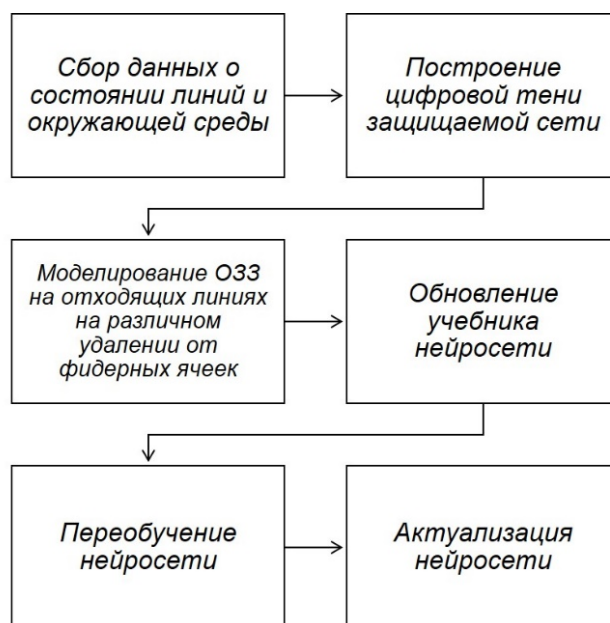


Рисунок 4 – Механизм коррекции искусственной нейронной сети в соответствии с текущими условиями
[Mechanism to correct the artificial neural network according to current conditions]

Также может возникнуть вопрос, непосредственно касающийся того, в каком виде реализуются искусственная нейронная сеть и система защиты, построенная на её основе. Нейронная сеть любой конфигурации, может быть, без труда эмулирована

программным способом, при этом все процедуры по воплощению нейросети, сбору данных для приближения цифровой тени к электрической сети, подготовке обучающих примеров и переобучению нейросети реализуются в виде единого программного комплекса, исполняемого на компьютере [16]. Компьютер же, с одной стороны, осуществляет управление актуаторами для коммутации электрических приводов силовых выключателей, а с другой стороны, имеет доступ для съёма информации с физических устройств контроля состояния линий – трансформаторов тока нулевой последовательности и измерительных трансформаторов напряжения (через осциллографические приставки с АЦП и резистивным преобразованием сигналов тока в напряжение), цифрового рефлектометра, датчиков проводимости грунта, температуры окружающей среды и т.д. Таким образом, на аппаратном уровне описываемая структура системы защиты от ОЗЗ (рис. 5) принципиально соответствует классическому представлению об устройстве компьютерной релейной защиты, изложенному в монографии А.Г. Фадке и Д.С. Торпа [9]. Коренное отличие заключается в самом спектре обрабатываемых потоков информации и способе её обработки, базирующемся на обучении и опросе искусственной нейронной сети – обучении на откликах цифровой тени и опросе на основании параметров реального отклика на ОЗЗ.

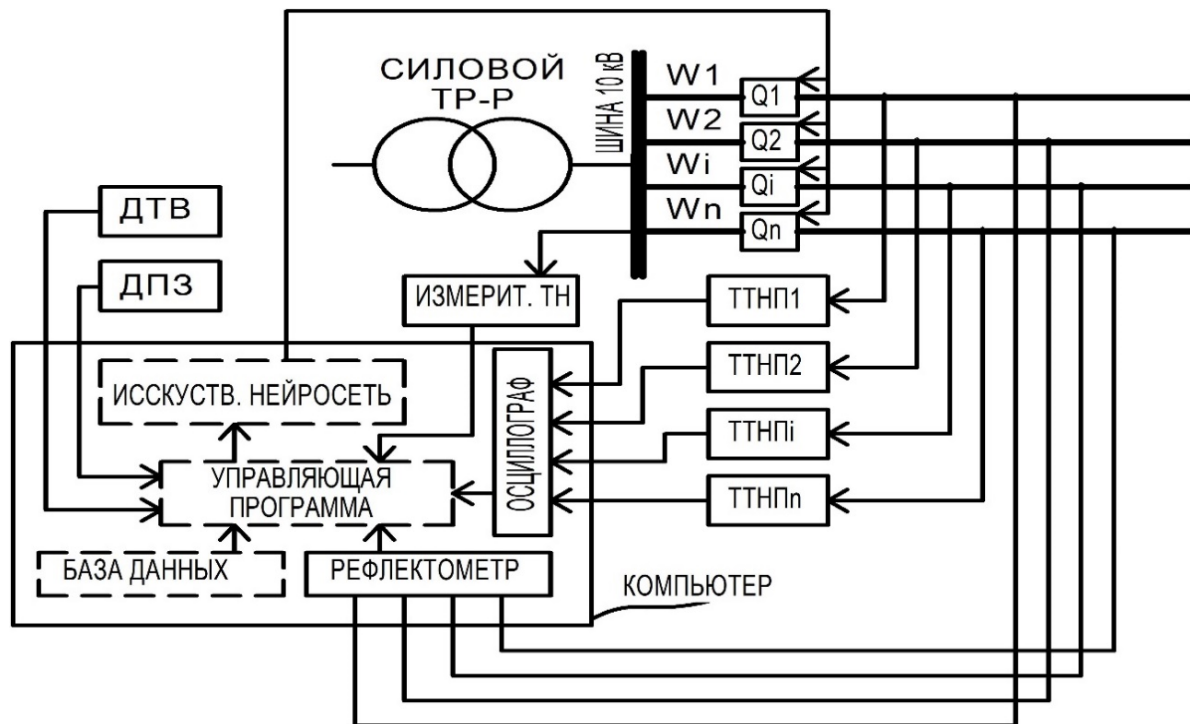


Рисунок 5 – Структурная схема нейрокомпьютерной системы защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ: $W1, W2, \dots, Wi, \dots, Wn$ – воздушные линии электропередачи; $Q1, Q2, \dots, Qi, \dots, Qn$ – силовые выключатели; ТТНП – трансформаторы тока нулевой последовательности соответствующих фидеров; ДТВ – датчик температуры воздуха; ДПЗ – датчик проводимости земли [Block diagram of a neurocomputer-based short-circuit protection system in 6-35 kV networks: $W1, W2, \dots, Wi, \dots, Wn$ - overhead lines; $Q1, Q2, \dots, Qi, \dots, Qn$ - circuit breakers; CTNP - zero sequence current transformers of corresponding feeders; DTV - air temperature sensor; DPZ - ground conductivity sensor]

Заключение

Рассматривая предлагаемую систему защиты от ОЗЗ в категориях информатики, её можно охарактеризовать как интеллектуального агента в силу соответствия таким параметрам как адаптивность, обучаемость, способность к саморазвитию. Посредством следующей за реальной электрической сетью её цифровой тени достигается обновление обучаемых примеров для нейронного процессора как обрабатывающего субагента.

Происходит планомерное переобучение нейросети с заданной периодичностью, что позволяет говорить об адаптивности системы защиты в процессе взаимодействия с окружающей средой. При этом реализуемая на программном уровне нейросеть может с лёгкостью изменять свою структуру (в простейшем случае персептронной сети варьируя количество внутренних слоёв нейронов) или параметры обучения в результате анализа собственного поведения (например, исходя из точности и корректности выдаваемой управляющей реакции) – это позволяет говорить о наличии у системы обратной связи, т.е. возможности саморазвития. В конечном счёте переход от токовой защиты с простым поведением к интеллектуальной защите даёт возможность приблизиться к идеалу высокочувствительной и селективной защиты от ОЗЗ для существенного повышения качества и безопасности электроснабжения.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шабад, М.А.* Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / М.А. Шабад. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 64 с.
2. *Борковский, С.О.* Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С.О. Борковский, Т.С. Горева, Т.И. Горева // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9, ч. 5. – С. 954-959.
3. Диэлектрические свойства воды и льда [электронный ресурс] // Способы очистки и свойства воды. – URL : https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice (дата обращения: 11.11.2022).
4. Ridley C. Improving supply security on 11-kV overhead network. The development of interconnected operation, IEE Colloquium on Improving Supply Security on 11kV Overhead Networks, 1988, pp. 10/1-10/4.
5. *Шилин, А.Н.* Расчёт погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередачи / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, Н.С. Артюшенко // *Контроль. Диагностика*. – 2015. – № 9. – С. 52-59.
6. *Ахмедова, О.О.* Адаптивная информационно-управляющая система релейной защиты, реагирующая на изменение климатических факторов / О.О. Ахмедова, А.Г. Сошинов, П.В. Дикарев // *Вопросы электротехнологии*. – 2022. – № 2. – С. 78-88.
7. *Шилин, А.Н.* Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи / А.Н. Шилин, С.С. Дементьев // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2018. – № 3, т. 14. – С. 5-11.
8. *Дьяконов, В.* Рефлектометрия и импульсные рефлектометры / В. Дьяконов // *Компоненты и технологии*. – 2012. – № 1. – С. 164-172.
9. *Фадке, А.Г.* Компьютерная релейная защита в энергосистемах : пер. с англ. / А.Г. Фадке, Д.С. Торп. – Москва : Техносфера, 2019. – 370 с.
10. *Аггарвал, Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение : пер. с англ. / Ч. Аггарвал. – Москва : Вильямс, 2020. – 752 с.
11. *Минуллин, Р.Г.* Обнаружение локационным методом однофазных замыканий проводов линий электропередачи на землю / Р.Г. Минуллин, Ю.Я. Петрушенко, И.Ш. Фардиев, Э.И. Лукин, Г.В. Лукина // *Электричество*. – 2008. – № 12. – С. 20-28.
12. Z. Liang, Z. Jian and L. Hua, Research on Intelligent Transient Information Monitoring Technology for Overhead Line, 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4102-4105, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881668.
13. A. Nag and A. Yadav, Fault classification using Artificial Neural Network in combined underground cable and overhead line, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853664.
14. *Гребчак, Е.* Цифровые двойники и цифровые тени в электроэнергетике [электронный ресурс] / Е. Гребчак, Е. Медведева // *Цифровая подстанция*. – URL : <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovye-dvojniki-i-tsifrovye-teni-v-elektroenergetike/> (дата обращения: 11.11.2022).
15. *Дулесов, А.С.* Мера неопределённости информации и её свойства применительно к оценке случайного поведения технического объекта / А.С. Дулесов, Н.Н. Кондрат // *Научное обозрение*. – 2014. – № 7. – С. 258-264

16. M. O'Donovan, E. Cowhey and N. Barry, Application oriented testing of power transmission lines and fault clearing, 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114000.

REFERENCES

- [1] Shabad M.A. Zashchita ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh 6-35 kV [Protection against Single-Phase Earth Faults in 6-35 kV Networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», 2007, 64 p. (in Russian).
- [2] Borkovsky S.O., Goreva T.S., Goreva T.I. Problema diagnostiki odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [The Problem of Diagnosing Single-Phase Earth Faults in Networks with Low Earth-Fault Currents], Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental Research], 2014, No. 9, part 5, pp. 954-959 (in Russian).
- [3] Dielektricheskiye svoystva vody i l'da [Dielectric Properties of Water and Ice]. Sposoby ochistki i svoystva vody [Water Treatment Methods and Properties], https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice (accessed 11.11.2022) (in Russian).
- [4] Ridley C. Improving Supply Security on 11-kV Overhead Network. The Development of Interconnected Operation, IEE Colloquium on Improving Supply Security on 11kV Overhead Networks, 1988, pp. 10/1-10/4 (in English).
- [5] Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S. Raschot pogreshnostey reflektometrov dlya monitoringa liniy elektroperedachi [Calculation of Errors of Reflectometers for Monitoring Power Lines], Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics], 2015, No. 9, pp. 52-59 (in Russian).
- [6] Akhmedova O.O., Soshinov A.G., Dikarev P.V. Adaptivnaya informatsionno-upravlyayushchaya sistema releynoy zashchity, reagiruyushchaya na izmeneniye klimaticheskikh faktorov [Adaptive Information and Control System for Relay Protection Responding to Changing Climatic Factors], Voprosy elektrotekhnologii [Issues of Electrical Technology], 2022, No. 2, pp. 78-88 (in Russian).
- [7] Shilin A.N., Dement'ev S.S. Modelirovaniye soprotivleniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Overhead Transmission Line Resistance Modelling], Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy [Electrotechnical Complexes and Systems], 2018, no. 3, v. 14, pp. 5-11 (in Russian).
- [8] Dyakonov V. Reflektometriya i impul'snyye reflektometry [Reflectometry and Pulse Reflectometers], Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies], 2012, no. 1, pp. 164-172 (in Russian).
- [9] Fadke A.G., Thorp D.S. Komp'yuternaya releynaya zashchita v energosistemakh [Computer Relay Protection in Power Systems]. Moscow: Tekhnosfera, 2019, 370 p. (in Russian)
- [10] Aggarwal Ch. Neyronnyye seti i glubokoye obucheniye [Neural Networks and Deep Learning]. Moscow: Williams, 2020, 752 p. (in Russian)
- [11] Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I., Lukin G.V. Obnaruzheniye lokatsionnym metodom odnofaznykh zamykaniy provodov liniy elektroperedachi na zemlyu [Detection by the Location Method of Single-Phase Short Circuits of Wires of Power Lines to Earth]. Elektrichestvo [Electricity], 2008, no. 12, pp. 20-28 (in Russian).
- [12] Z. Liang, Z. Jian and L. Hua, Research on Intelligent Transient Information Monitoring Technology for Overhead Line, 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4102-4105, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881668 (in English).
- [13] A. Nag and A. Yadav, Fault Classification Using Artificial Neural Network in Combined Underground Cable and Overhead Line, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853664 (in English).
- [14] Grabchak E. Tsifrovyye dvoyniki i tsifrovyye teni v elektroenergetike [Digital Twins and Digital Shadows in the Electric Power Industry], Tsifrovaya podstantsiya [Digital Substation], <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovye-dvoyniki-i-tsifrovye-teni-v-elektroenergetike> (accessed 11.11.2022) (in Russian).
- [15] Dulesov A.S., Kondrat N.N. Mera neopredelonnosti informatsii i yeyo svoystva primenitel'no k otsenke sluchaynogo povedeniya tekhnicheskogo ob'yekta [Measure of Information Uncertainty and its Properties in Relation to the Assessment of the Random Behavior of a Technical Object], Nauchnoye obozreniye [Scientific Review], 2014, no. 7, pp. 258-264 (in Russian).
- [16] M. O'Donovan, E. Cowhey and N. Barry, Application Oriented Testing of Power Transmission Lines and Fault Clearing, 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114000 (in English).

Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents

Aleksandr N. Shilin¹, Pavel V. Dikarev², Sergey S. Dementyev³

³FSBEI HE «Volgograd State Technical University», Lenin avenue, 28, Volgograd, Russia, 400005

¹eltech@vstu.ru, ORCID iD: 0000-0001-8726-3556, WoS ResearcherID: O-4627-2016

²dikarev.pavel@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-5726-6729, WoS ResearcherID: Q-9946-2016

³c165tc34@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-8510-6001, WoS ResearcherID: O-6566-2017/

Received by the editorial office on 08/31/2022

After revision on 11/22/2022

Accepted for publication 11/29/2022

Abstract. Nuclear power plants (NPP) are one of the main sources of electricity. The distribution of electricity generated by nuclear power plants, or backup power supply to individual consumers of the power plant's own needs, can be carried out via a 6-35 kV network. These networks operate with an isolated or compensated neutral. This causes the fact that the currents of single-phase ground faults (SPGF) in case of accidents on overhead power lines (OL) are quite small and SPGF are difficult to identify. The article deals with the issues of identifying the SPGF and the corresponding selective response of the overhead line protection system. The limitation of the functioning of relay protection against SPGF, built on the classical principle of operation "if-then", is proved. The error of the traditional protection system is explained by the lack of a mechanism for updating the setpoints in accordance with changes in environmental conditions that affect the capacitive component of the conductivity of overhead lines. As an example of similar an influence, the effect of icing of wires, as well as the triboelectric effect in the form of accumulation of a space charge in the air gap around the line, is described. In this regard, a method is described for correcting the protection setpoints due to periodic measurements of the capacitance of the lines by means of their location probing. Thus, it is proposed to improve the traditional current protection against SPGF by giving the system the ability to adapt, but within the framework of its response as an agent with a simple behavior. The construction of a more advanced system of protection against SPGF in the form of an intelligent agent of the electrical network is also considered. The essence of this system is to use an artificial neural network as a subagent processing information. The advantage of a neurocomputer system for protection against SPGF is proved, which forms an integral assessment of the state of power transmission lines and learns to detect SPGF on a digital shadow following the electrical network. It indicates the possibility of classifying the proposed system of protection against SPGF as an intelligent agent due to the ability to adapt, learn and develop.

Keywords: power supply reliability, redundancy of nuclear power plant auxiliary needs, single-phase ground faults, computer relay protection, impulse reflectometry, power line icing, triboelectric effect, intelligent agents, artificial neural networks, digital shadows.

For citation: Shilin A.N., Dikarev P.V., Dementyev S.S. Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 40-53. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-04>.