

П. В. Дикарев

**ВЛИЯНИЕ ГЕОСРЕДЫ НА ЕМКОСТЬ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ***

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

dikarev.pavel@mail.ru

Надежность воздушных линий электропередачи критически зависит от стабильности их электрических параметров, которые подвержены значительному влиянию изменчивых факторов геосреды. В статье исследуется влияние таких факторов, как провисание проводов, рельеф местности, наличие водных объектов, гололедообразование и трибоэлектрические эффекты, на емкостные характеристики воздушных линий электропередачи. Установлено, что совокупное воздействие этих факторов может приводить к изменению погонной емкости линии до 79 %, что не учитывается традиционными системами релейной защиты с фиксированными уставками и ведет к снижению их чувствительности и надежности.

Для решения данной проблемы предлагается инновационная адаптивная система релейной защиты, основанная на использовании цифровой тени участка сети и искусственной нейронной сети. Система в реальном времени актуализирует параметры модели по данным сетевых датчиков и динамически корректирует уставки срабатывания защиты. Разработанный подход позволяет существенно повысить точность и селективность защиты, в частности, от однофазных замыканий на землю, и является значительным шагом в развитии интеллектуальных энергетических систем, адаптирующихся к изменениям окружающей среды.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, емкость, геосреда, релейная защита, адаптивная уставка, цифровая тень, искусственная нейронная сеть, интеллектуальные сети

© Дикарев П. В., 2025

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 38/652-24.

P. V. Dikarev

INFLUENCE OF THE GEOENVIRONMENT ON THE CAPACITY OF AN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

The reliability of overhead power lines critically depends on the stability of their electrical parameters, which are significantly influenced by variable geo-environmental factors. This article investigates the impact of factors such as wire sag, terrain relief, proximity to water bodies, ice formation, and triboelectric effects on the capacitive characteristics of overhead power lines. Research establishes that the combined influence of these factors can alter the line's specific capacitance by up to 79 %, a dynamic change that traditional relay protection systems with fixed settings fail to account for, leading to reduced sensitivity and reliability.

To address this challenge, an innovative adaptive relay protection system is proposed. The system leverages a digital shadow of the network section and an artificial neural network. It dynamically updates the model parameters in real-time based on data from monitoring sensors and automatically adjusts the protection settings. This approach significantly enhances the accuracy and selectivity of protection, particularly against single-phase ground faults, representing a substantial step towards developing intelligent power systems capable of adapting to changing environmental conditions.

Keywords: overhead power lines, capacitance, geo-environment, relay protection, adaptive setting, digital shadow, artificial neural network, smart grids

Современная российская энергосистема продолжает сталкиваться с недостаточным уровнем надежности, причем воздушные линии электропередачи (ВЛ) остаются наиболее уязвимыми элементами. Эта уязвимость объясняется их географическим распределением по разнообразным зонам и постоянным воздействием сложных климатических условий — дождей и снеговых осадков, ветровых и гололедных нагрузок. Следует подчеркнуть, что климатические факторы также негативно влияют на работу систем релейной защиты, поскольку изменяют сопротивление цепи короткого замыкания и, соответственно, величину тока короткого замыкания. В последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция ухудшения технического состояния ВЛ, что приводит к росту аварийности. Ситуация осложняется интенсивным воздействием гололедно-ветровых нагрузок на конструктивные элементы линий, что создает очевидную необходимость корректировки уставок релейной защиты в зависимости от внешних условий.

Однако не все факторы, воздействующие на параметры ВЛ, поддаются формализации. К ним относятся особенности рельефа, характер растительности, разливы водных объектов, уровень снежного покрова, а также электростатические эффекты в воздушной среде вокруг проводов, вызванные трибоэлектрическими явлениями. Как отмечается в [1], степень износа воздушных линий напряжением 110–500 кВ достигала примерно 60 % в 2015 году, а за послед-

ние сорок лет частота отказов увеличилась примерно вдвое, что обусловлено сочетанием старения материалов и климатических воздействий (38 %).

Это говорит о том, что воздействие климатических параметров на воздушные линии электропередач является одной из ключевых причин отказов линии и требует сосредоточения на компенсации таких воздействий. Для решения данной задачи предлагается интегрировать в информационно-измерительную систему многослойную искусственную нейронную сеть, обученную определять скорректированные значения уставок срабатывания на основе динамически изменяющихся внешних параметров. Этот подход представляет собой значительный шаг к интеллектуальным энергетическим системам, способным адаптироваться к изменениям окружающей среды в реальном времени.

В электрических сетях с изолированной нейтралью, которые распространены для линий класса 6–35 кВ в России, однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) составляют приблизительно 70–80 % от всех аварий в сети [2]. Как известно, ток однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью имеет емкостный характер. Его величина определяется емкостью фаз линии относительно земли. На рис. 1 представлено распределение тока однофазного замыкания на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью, предложенное Рюденбергом:

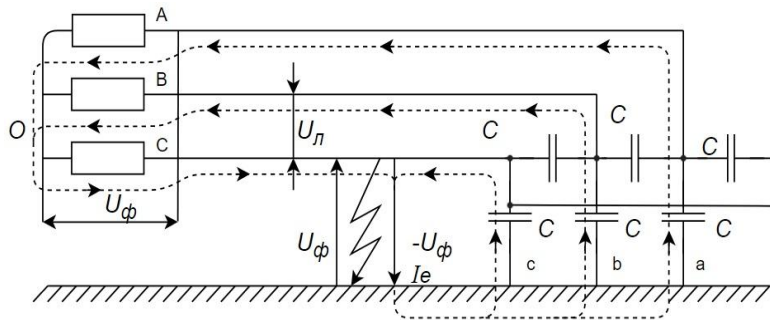


Рис. 1. Распределение тока однофазного замыкания на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью

В стандартном режиме работы линии в точке повреждения между проводником и землей присутствует фазное напряжение U_ϕ . Путем приложения дополнительного напряжения величиной $-U_\phi$ достигается нулевое результирующее напряжение в данной точке, что эквивалентно созданию металлической связи между проводом и землей. Под воздействием приложенного напряжения $-U_\phi$ возникает ток замыкания на землю, который протекает через землю и распределяется по трем параллельным ветвям, проходя через емкости всех проводов относительно земли. Этот ток возвращается к точке заземления – как напрямую по аварийному проводу, так и через обмотки трансформатора по двум другим проводам.

Емкостные характеристики всех фаз могут быть представлены в виде эквивалентной емкости $C_{\text{экв}}$ [3]. Однако емкость между фазой и землей зависит от множества факторов, и ее точное определение представляет собой сложную задачу [4]. В связи с этим возникает необходимость установления зависимостей емкостных параметров воздушных линий электропередачи от климатических условий окружающей среды и особенностей местного рельефа.

Уставка срабатывания защиты от ОЗЗ напрямую связана с величиной емкостного тока линии. Последний рассчитывается по формуле:

$$I_c = 3U_\phi \omega C_0 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

где U_ϕ – номинальное напряжение на фазном проводе, В; ω – угловая частота сети, рад/с; C_0 – удельная суммарная емкость линии относительно земли, Ф/м.

Известна классическая формула для погонной емкости уединенного провода над идеально плоской землей:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4h}{d_{np} \cdot 10^{-3}}\right)} \quad (2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха ($\epsilon = 1$); ϵ_0 – диэлектрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Согласно расчету по выражению (2) удельная емкость составит 6,746 пФ/м. Тем не менее данное значение в определенной мере можно считать ориентировочным ввиду объективного наличия большого количества факторов, не учитываемых при вычислениях по стандартной формуле. Проанализируем влияние некоторых из них на снижение погрешности расчета емкости провода относительно земли. Традиционные устройства защиты с фиксированными уставками не могут учитывать эти динамические изменения параметров, что приводит к либо ложным срабатываниям, либо отказам в работе при необходимости. Современные микропроцессорные терминалы предлагают более точные возможности настройки, но все еще требуют передовых алгоритмов для адаптации к изменениям окружающей среды в реальном времени.

Именно параметр C_0 традиционно считающийся постоянным, на самом деле подвержен значительным колебаниям. Как показали наши исследования, его величина зависит от целого ряда факторов геосреды. Во-первых, это провисание проводов, обусловленное температурными деформациями и механическими нагрузками. Провисание изменяет среднюю высоту подвеса провода над землей. Для учета этого эффекта нами использовалась концепция эквивалентной высоты подвеса. Этот параметр представляет собой высоту, на которой должен находиться непровисающий провод, чтобы его емкость относительно земли была равна емкости реального провисающего провода.

$$h_{\text{экв}} = h \cdot e^{-0.67 \frac{f}{h}} \quad (3)$$

где f – стрела провеса, м (рис. 2).

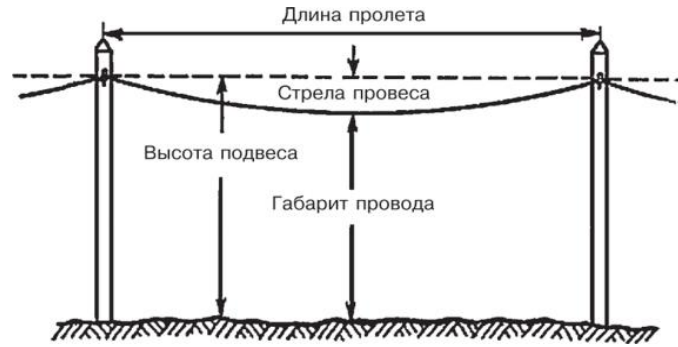


Рис. 2. Кривая провисания провода и характеристики пролета ВЛ

Расчет по этой формуле для провода АС-50/8 в труднодоступной местности показал, что неучет провисания приводит к погрешности в определении емкости в 3,685 %.

Во-вторых, существенное влияние оказывает рельеф местности. Даже на равнинной территории перепады высот вдоль трассы ВЛ могут достигать 2–3 метров. Для анализа этого фактора была применена методика интегрирования погонной емкости с учетом функций описания рельефа $g(x)$ и кривой провисания провода $\gamma(x, \Gamma)$:

$$C_{0\text{рельеф}}(\Gamma) = \frac{L \int_0^L \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4(\gamma(x, \Gamma) - g(x))}{d_{np}}\right)} dx}{L} \quad (4)$$

где $\gamma(x, \Gamma)$ – функция, описывающая кривую провисания провода и зависящая в том числе от габарита провода до земли, изменяющегося вследствие нагрева/охлаждения провода, гололедообразования и т. д.; $g(x)$ – функция, описывающая продольный профиль рельефа местности.

Считая, что местность, по которой проходит трасса линии, равнинная с очень небольшими перепадами высот относительно горизонтали (до 2,5 м/100 м), можем задать функцию $g(x)$ следующего вида:

$$g(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < 0.1L) \\ -0.7 & \text{if } (x \geq 0.1L) \cdot (x < 0.2L) \\ -1.2 & \text{if } (x \geq 0.2L) \cdot (x < 0.3L) \\ -1.8 & \text{if } (x \geq 0.3L) \cdot (x < 0.4L) \\ -2.5 & \text{if } (x \geq 0.4L) \cdot (x < 0.8L) \\ -2.1 & \text{if } (x \geq 0.8L) \cdot (x < 0.95L) \\ -1.5 & \text{if } (x \geq 0.95L) \cdot (x \leq L) \end{cases} \quad (5)$$

Кривая провисания провода описывается, как это известно из [5], уравнением цепной линии, которое с достаточным для наших целей приближением может быть заменено параболическим выражением вида $\gamma(x, \Gamma) = ax^2 + bx + c$, причем, считая, что точка экстремума провисания несколько смещена от середины и удалена от начала пролета на дистанцию $0,55L$, коэффициенты параболы a, b, c , проходящей таким образом через 3 точки $x_1[0; h+g(0)]$, $x_2[0,55L; \Gamma+g(0,55L)]$, $x_3[L; h+g(L)]$, могут быть найдены решением следующей системы линейных (решаемых относительно параметров a, b, c) уравнений:

$$\begin{cases} \gamma_1 = ax_1^2 + bx_1 + c \\ \gamma_2 = ax_2^2 + bx_2 + c \\ \gamma_3 = ax_3^2 + bx_3 + c \end{cases} \quad (6)$$

Для решения данной системы уравнений матричным методом составим матрицу и вектор свободных членов:

$$A = \begin{bmatrix} 0^2 & 0 & 1 \\ (0.55L)^2 & 0.55L & 1 \\ L^2 & L & 1 \end{bmatrix}; Y(\Gamma) = \begin{pmatrix} h + g(0) \\ \Gamma + g(0.55L) \\ h + g(L) \end{pmatrix}; \quad (7)$$

После чего вычислим искомый вектор коэффициентов $K(\Gamma) = A^{-1} \cdot Y(\Gamma)$, причем, $a(\Gamma) = K_1(\Gamma)$, $b(\Gamma) = K_2(\Gamma)$, $c(\Gamma) = K_3(\Gamma)$.

Выполнив перечисленные операции, и определим тем самым функцию кривой провисания $\gamma(x, \Gamma)$ (рис. 3).

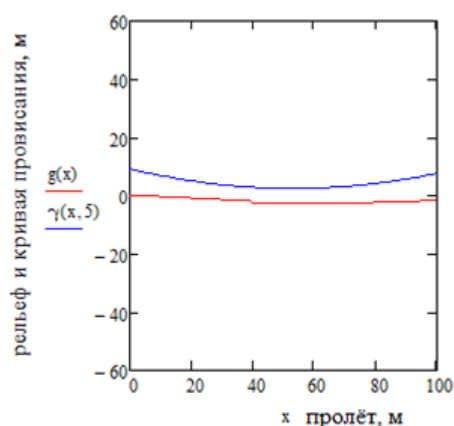


Рис. 3. Рельеф (красная линия) и кривая провисания провода при $\Gamma = 5$ м (синяя линия)

Результаты моделирования показали, что совместный учет провисания и рельефа может увеличить погрешность расчета емкости до 5–7 % по сравнению с учетом только провисания (рис. 4).

Особого внимания заслуживает влияние гидрометеоров. Наличие вблизи трассы ВЛ водных объектов, оврагов, заполненных снегом или водой (рис. 5), кардинально меняет диэлектрические свойства окружающей среды.

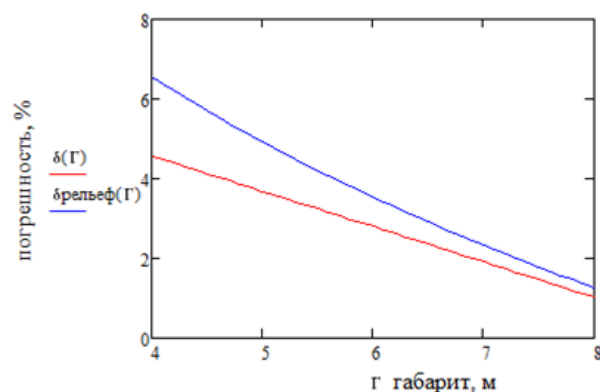


Рис. 4. Изменение погрешности при учете провисания (красная линия) и учете провисания и рельефа местности (синяя линия)

Как отмечено в работе [6], диэлектрическая проницаемость воды ϵ на промышленной частоте 50 Гц достигает 81–100, что на порядки превышает ϵ воздуха. Наше моделирование в программном комплексе *Elcut* (рис. 6) для случая пересечения линии оврага, заполненного снегом, показало увеличение погонной емкости с 6,746 пФ/м до 7,431 пФ/м, что соответствует погрешности 9,212 % при игнорировании данного фактора.

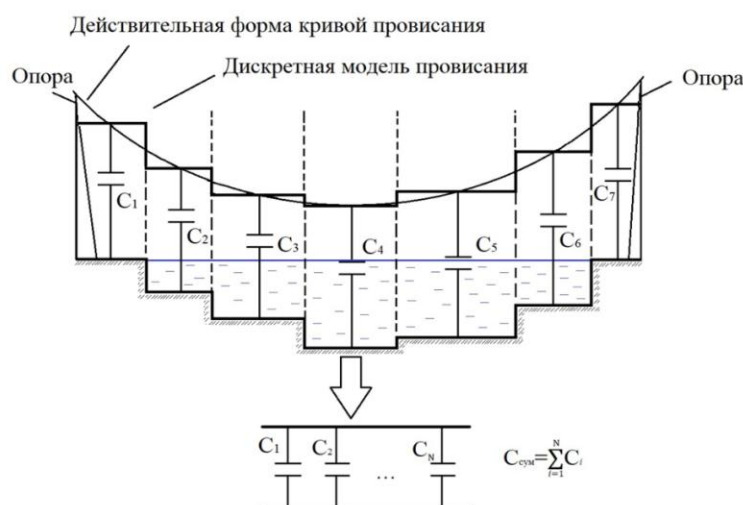


Рис. 5. К расчету емкости провода, проходящего через овраг, наполненный до краев снегом/водой/льдом/прочими смесями с водой

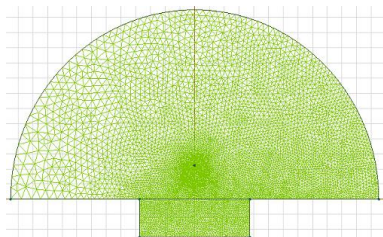


Рис. 6. Геометрическая модель задачи по расчету в *Elcut* емкости провода на каждом i -м участке оврага с нанесенной сеткой конечных элементов

Еще одним значимым фактором является гололедообразование. Формирование гололедной муфты на проводе эквивалентно созданию дополнительного диэлектрического слоя. Согласно нашему анализу, появление отложений толщиной всего 5 мм приводит к погрешности расчета емкости, превышающей 20 % (рис. 7).

Этот эффект необходимо учитывать совместно с увеличивающимся из-за веса льда провисанием провода.

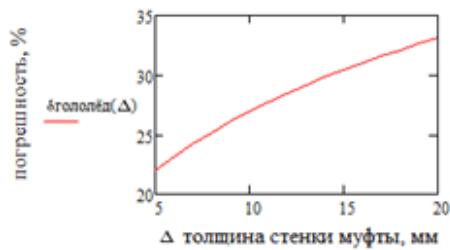


Рис. 7. Увеличение погрешности расчета емкости при нарастании гололедной муфты вокруг провода

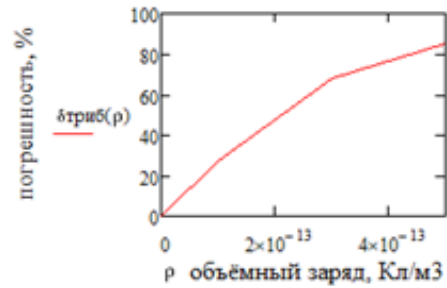


Рис. 8. Увеличение погрешности расчета емкости при увеличении объемного заряда в воздушном промежутке вокруг провода

Наконец, был исследован трибоэлектрический эффект, возникающий при снежных метелях и песчаных бурях (рис. 8 и 9).

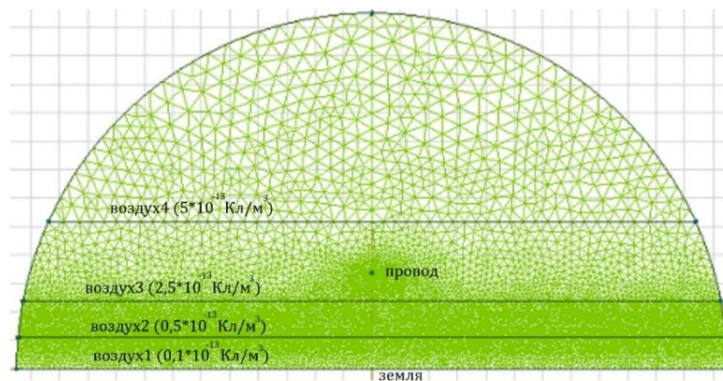


Рис. 9. Геометрическая модель задачи в Elcut: зонирование воздушного промежутка вокруг провода по степени наэлектризованности

Трение частиц снега или песка приводит к накоплению объемного заряда в воздушном промежутке вокруг проводов. Моделирование в Elcut с заданием объемной плотности заряда ρ показало, что данное явление может вносить наибольшую погрешность – до 79 % при неравномерном распределении заряда в пространстве.

В работе [7] также подтверждается значительный вклад трибоэлектрических явлений в искажение электрического поля вокруг высоковольтных объектов.

Таким образом, традиционный расчет уставки защиты от ОЗЗ, основанный на предположении о постоянстве емкости C_0 не отражает реальной картины и может привести к некорректной работе релейной защиты (РЗ).

Для верификации выявленных зависимостей и разработки компенсирующих механизмов был применен комплекс методов. Количественная оценка влияния факторов геосреды проводилась с помощью аналитических расчетов и численного моделирования в среде Elcut. Для факторов, поддающихся параметризации (провисание, рельеф), использовались аналитические зависимости. Для сложных случаев (ов-

раг, лес, гололед) применялся метод конечных элементов, позволяющий с высокой точностью рассчитать результирующую емкость сложной электростатической системы.

Ключевым элементом работы стало создание адаптивной системы РЗ. В ее основе лежит цифровая тень защищаемого участка сети. Цифровая тень – это виртуальная модель, параметры которой актуализируются в реальном времени на основе данных от датчиков, установленных на ВЛ (температура провода, вес гололедных отложений, уровень снега/воды, объемный заряд воздуха и др.). Как отмечается в обзоре [8], использование цифровых двойников и теней является одним из наиболее перспективных направлений развития интеллектуальной электроэнергетики.

Для оперативного пересчета уставок на основе актуальных параметров сети была разработана информационно-измерительная система управления уставкой релейной защиты с искусственной нейронной сетью (ИНС). Выбор ИНС обусловлен ее способностью аппроксимировать сложные нелинейные многопараметрические функции, коей является зависимость тока КЗ от

отклонений параметров линии. Использовался многослойный персептрон с архитектурой 16-8-1 (16 входных параметров, 8 нейронов в скрытом слое, 1 выход – ток КЗ). Обучение сети проводилось на выборке данных, сгенерированной при помощи цифровой тени в Matlab Simulink, путем многократной эмуляции режима КЗ при различных состояниях внешней среды. Процесс обучения и структура ИНС представлены на рис. 10 и в таблице.

Проведенное исследование демонстрирует, что параметры геосреды оказывают существенное и зачастую недооцененное влияние на емкостные характеристики воздушных ЛЭП. Установлено, что погрешность задания емкости линии при игнорировании этих факторов может достигать 70–80 % в экстремальных условиях, что делает невозможной корректную настройку традиционной релейной защиты.

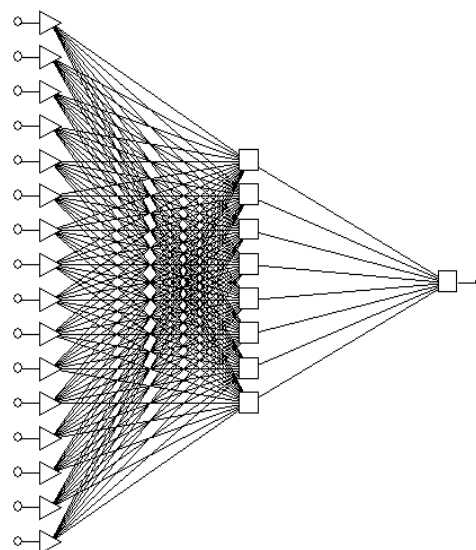


Рис. 10. Многослойный персептрон (MLP) для аппроксимации функции двухфазного КЗ с замыканием на землю в конце линии

Три примера из обучающей выборки нейронной сети

Параметр	Значение		
Вход			
δR1, %	4,93	13,49	8,41
δR2, %	2,07	7,76	18,80
δR3, %	12,84	13,33	14,94
δL11, %	2,75	8,64	21,39
δL10, %	1,65	14,07	12,45
δL21, %	9,79	13,77	12,64
δL20, %	8,40	12,42	15,32
δL31, %	6,43	16,11	14,09
δL30, %	7,25	14,31	5,09
δC11, %	2,71	17,07	6,51
δC10, %	11,20	13,64	17,95
δC21, %	12,49	18,67	16,21
δC20, %	13,16	15,92	10,70
δC31, %	4,85	15,02	13,29
δC30, %	2,35	9,73	19,34
δInар, %	11,88	9,59	7,65
Выход			
Ikз, А	1482	1414	1407

Предложенное решение в виде информационно-измерительной системы управления уставкой релейной защиты, основанной на цифровой тени сети и нейросетевых алгоритмах, позволяет динамически корректировать уставки срабатывания. Это обеспечивает повышение чувствительности, селективности и, как след-

ствие, общей надежности и бесперебойности электроснабжения.

Дальнейшие исследования планируется направить на оптимизацию архитектуры нейронной сети и разработку более эффективных алгоритмов обучения с использованием данных натурных экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дорофеев, А. О.* Повышение пропускной способности воздушных линий электропередач / А. О. Дорофеев, Т. Р. Вагапов // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://web.snauka.ru/issues/2018/01/85351> (дата обращения: 12.09.2025 г.).
2. *Шилин, А. А.* Интеллектуальная система релейной защиты электрической сети 6–10 кВ с реализацией автоматической коррекции уставки срабатывания / А. А. Шилин, С. С. Дементьев, П. В. Дикарев // Проблемы энергетики региональной. – 2023. – Т. 3(59). – С. 17–24.
3. *Шабад, М. А.* Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М. А. Шабад. – М.: НТФ «Энерго-прогресс», 2007. – 64 с.
4. *Шилин, А. Н.* Переходные процессы в электро-энергетических системах : учеб. пособие / А. Н. Шилин, С. С. Дементьев, П. В. Дикарев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 96 с.
5. *Кесельман, Л. М.* Основы механики воздушных линий электропередачи [Текст] / Л. М. Кесельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
6. Диэлектрические свойства воды и льда [Электронный ресурс] // Способы очистки и свойства воды. – Режим доступа: https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice. – (Дата обращения: 12.09.2025 г.).
7. Zhang, H. and Zhou, Y.-H.: Effects of 3D electric field on saltation during dust storms: an observational and numerical study, Atmos. Chem. Phys., 20, 14801–14820, <https://doi.org/10.5194/acp-20-14801-2020>, 2020.
8. *Mehirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A.* (2024). The Applications and Challenges of Digital Twin Technology in Smart Grids: A Comprehensive Review. Applied Sciences, 14(23), 10933. <https://doi.org/10.3390/app142310933>.