

О. О. Ахмедова¹, Т. В. Копейкина¹, О. С. Атрашенко¹, О. И. Елфимова²

**ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЩИТ С АДАПТИВНОЙ УСТАВКОЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ БОЛЕЕ 110 КВ**

¹ Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

² Волгоградский государственный технический университет

Ahmedova-olga@mail.ru, kopeikina.tania@yandex.ru

olgapasmenko@yandex.ru, olgaikarpenko@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Ахмедова, Ahmedova-olga@mail.ru

Статья посвящена обоснованию необходимости учета параметров грунта (сопротивления, влажности) под воздушной линией электропередачи при проектировании защит нулевой последовательности на ВЛ (воздушных линиях электропередачи) с заземленной нейтралью. Производится анализ влияния глубины прохождения фиктивного провода ВЛ на изменение погонного реактивного сопротивления. Доказано, что использование табличных значений сопротивления приводит к завышению уставок срабатывания защиты и снижению коэффициента чувствительности. Параметры срабатывания защит нулевой последовательности особенно сильно подвержены влиянию изменения погонного реактивного сопротивления, так как они отстраи-

ваются от утроенного тока нулевой последовательности. Поэтому предлагается на этапе проектирования системы релейной защиты учитывать параметры грунта под воздушной линией электропередачи и устанавливать защиты с адаптивной уставкой, способные корректировать параметры срабатывания в зависимости от изменения сезонности, передавая информацию о влажности почвы от датчиков, установленных в грунте на систему релейной защиты. Это позволит уменьшить величину «мертвой зоны» первой ступени токовой защиты нулевой последовательности без выдержки времени и увеличить чувствительность защиты в целом ко всем видам повреждений на землю.

Ключевые слова: релейная защита нулевой последовательности, параметры воздушных линий электропередачи, конечная проводимости земли, адаптивная уставка

O. O. Akhmedova¹, T. V. Kopeykina¹, O. S. Atrashenko¹, O. I. Elfimova²

RATIONALE FOR USING ADAPTIVE SETTING PROTECTIONS IN DESIGNING OVERHEAD LINES WITH VOLTAGE MORE THAN 110 kV

¹**Kamyshin Institute of Technology (branch)**

Volgograd State Technical University

²**Volgograd State Technical University**

The article is devoted to the substantiation of the need to take into account the parameters of the soil (resistance, humidity) under an overhead power line when designing zero-sequence protections on overhead lines (overhead power lines) with a grounded neutral. The influence of the depth of passage of the fictitious overhead line wire on the change in linear reactance is analyzed. It is proved that the use of tabular resistance values leads to an overestimation of the protection response settings and a decrease in the sensitivity coefficient. The parameters of the zero sequence protection operation are particularly strongly influenced by changes in the linear reactance, since they are tuned from the tripled zero sequence current. Therefore, it is proposed at the design stage of the relay protection system to take into account the soil parameters under the overhead power line and install protections with an adaptive setpoint that can adjust the response parameters depending on changes in seasonality, transmitting information about soil moisture from sensors installed in the ground on the relay protection system. This will reduce the size of the «dead zone» of the first stage of zero-sequence current protection without time delay and increase the sensitivity of protection in general to all types of damage to the ground.

Keywords: zero-sequence relay protection, parameters of overhead power lines, final earth conductivity, adaptive setpoint

Введение

На основании «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю линий 110–500 кВ» [1] от коротких замыканий (КЗ) на землю в сетях с заземленной нейтралью, совместно с защитой от междуфазных коротких замыканий необходимо предусмотреть трехступенчатую защиту нулевой последовательности. В электросетях напряжением 110 кВ относительная вероятность однофазных КЗ составляет 83 %, напряжением 220 кВ – 88 %, напряжением 500 кВ – 95 %. При этом однофазные короткие замыкания сопровождаются протеканием значительных по величине токов, соизмеримых с токами срабатывания максимальной токовой защиты от междуфазных КЗ. Однако установка на линии электропередачи с односторонним питанием дополнительной защиты нулевой последовательности является целесообразным, вследствие возможности уменьшить выдержки времени срабатывания, уменьшить величину «мертвой зоны» и повысить чувствительность. Положительный эффект достигается за счет более значительного уменьшения тока нулевой последовательности при прохождении по линии электропередачи по сравнению с током

трехфазного короткого замыкания, из-за неравенства сопротивлений прямой и нулевой последовательности.

Анализ факторов, приводящих к погрешности в определении уставок защит нулевой последовательности

Первая ступень защиты – токовая отсечка нулевой последовательности без выдержки времени – отстраивается от максимального значения периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности $3I_{0\text{вн max}}^{(m)}$ [2]:

$$I_{сз(n)}^I = k_{отс}^I 3I_{0\text{вн max}}^{(m)}, \quad (1)$$

где $I_{сз(n)}^I$ – ток срабатывания первой ступени токовой отсечки нулевой последовательности; $k_{отс}^I$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности и необходимый запас, для линий 110–220 кВ принимается 1,2; $3I_{0\text{вн max}}^{(m)}$ – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности.

Вторая ступень защиты – токовая отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени – отстраивается от первой ступени защи-

ты предыдущего участка линии электропередачи [2]:

$$I_{сз(n)}^{II} = k_{отс}^{II} I_{сз(n-1)}^I, \quad (2)$$

где $I_{сз(n)}^{II}$ – ток срабатывания второй ступени токовой отсечки нулевой последовательности с выдержкой времени; $k_{отс}^{II}$ – коэффициент отстройки, принимается 1,1; $I_{сз(n-1)}^I$ – ток срабатывания первой ступени токовой защиты нулевой последовательности предыдущего участка линии.

Третья ступень защиты – максимальная токовая защита нулевой последовательности, которая отстраивается от тока небаланса при внешних междуфазных коротких замыканиях [2]:

$$I_{сз(n)}^{III} = k_{отс}^{III} I_{нб.реч.тах}, \quad (3)$$

где $I_{сз(n)}^{III}$ – ток срабатывания третьей ступени максимальной токовой защиты нулевой последовательности; $k_{отс}^{III}$ – коэффициент отстройки, принимается 1,2; $I_{нб.реч.тах}$ – ток небаланса, вызванный различной погрешностью трансформаторов тока.

Особенностью расчета защит нулевой последовательности является учет токораспределения при коротких замыканиях на землю, которое зависит от количества, места включения и сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с заземленными нейтралями и прилегающих сетей электроснабжения [3]. Корректность функционирования данного вида защиты напрямую зависит от правильного определения параметров сети, так как именно сопротивления линий электропередач могут из-

меняться в зависимости от изменения внешних условий окружающей среды.

Рассмотрим параметры линии электропередачи (рис. 1).

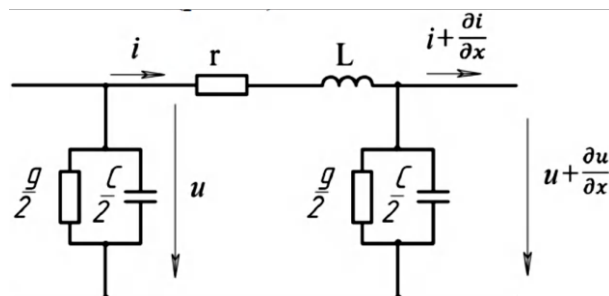


Рис. 1. П-образная схема замещения ВЛЭП

Линия электропередачи характеризуется продольными параметрами: погонным активным сопротивлением, погонным реактивным сопротивлением и поперечными параметрами: погонной активной проводимостью и погонной реактивной проводимостью [4]. Кроме того, необходимо учитывать проводимость грунта. Для упрощения расчетов токов короткого замыкания принимают проводимость земли бесконечной с возвратом токов по ее поверхности, в действительности земля обладает конечной проводимостью с расположением фиктивного провода в земле (в зависимости от удельного сопротивления грунта глубина возврата тока может меняться в широком диапазоне, для средней полосы России примерно 1000 м) и при расчете защит нулевой последовательности пренебрежение этим параметром может привести к неверному определению уставок срабатывания (рис. 2).

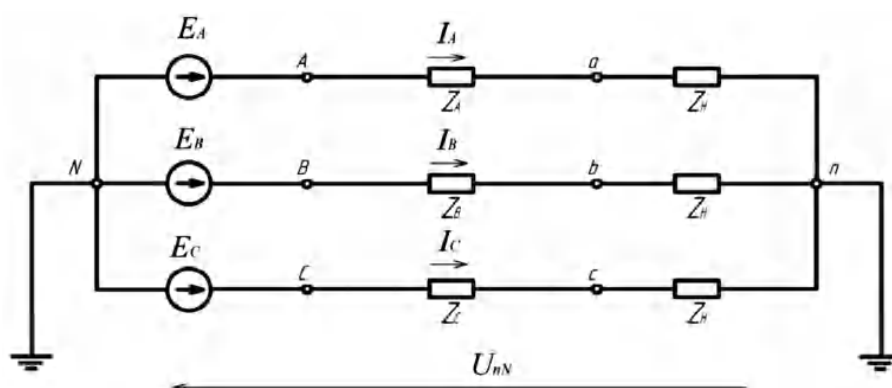


Рис. 2. Схема замещения ВЛЭП с учетом конечной проводимости земли

По законам Кирхгофа запишем уравнения распределения токов и напряжений для схемы

замещения трехфазной линии с соединением нагрузки в звезду:

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{Z}_A + Z_n + Z_3 & Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & \underline{Z}_B + Z_n + Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & Z_3 & \underline{Z}_C + Z_n + Z_3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где Z_n – сопротивление нагрузки; Z_3 – сопротивление земли.

Из выражения (4) определяются токи в линии:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AA} + \dot{E}_B \Delta_{BA} + \dot{E}_C \Delta_{CA}) \\ \dot{I}_B &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AB} + \dot{E}_B \Delta_{BB} + \dot{E}_C \Delta_{CB}) \\ \dot{I}_C &= \frac{1}{\Delta_Z} (\dot{E}_A \Delta_{AC} + \dot{E}_B \Delta_{BC} + \dot{E}_C \Delta_{CC}), \end{aligned} \quad (5)$$

где Δ_Z – определитель матрицы $|Z|$; Δ_{ij} – алгебраическое дополнение определителя Δ_Z .

Значения Δ_Z и Δ_{ij} находим следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_Z &= [\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C + 3(Z_n + Z_3)] \cdot (1 - Z_3^2) + 2Z_3^3 \\ \Delta_{AA} &= \underline{Z}_B \cdot \underline{Z}_C + (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{BB} &= \underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_C + (\underline{Z}_A + \underline{Z}_C) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{CC} &= \underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B + (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B) \cdot (Z_n + Z_3)^3 \\ \Delta_{AB} &= \Delta_{BA} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_C + Z_n) \\ \Delta_{BC} &= \Delta_{CB} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_A + Z_n) \\ \Delta_{AC} &= \Delta_{CA} = -R_3 \cdot (\underline{Z}_B + Z_n) \end{aligned} \quad (6)$$

Определим влияние конечной проводимости земли по методу Рюденберга [5]:

$$Z_3 = \frac{E_3}{I} = \left(\pi^2 f + j4\pi f \ln \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-9} \text{ Ом} / \text{см} = \left(\pi^2 f + 29f \lg \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} / \text{км}, \quad (7)$$

где E_3 – электродвижущая сила; I – ток в проводе; f – частота; h – расстояние от провода до поверхности земли [5]; γ – удельная проводимость грунта.

Разложим полное сопротивление на активную R_3 и реактивную X_3 составляющие, тогда:

$$R_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (8)$$

Запишем полное сопротивление провода [5]:

$$\begin{aligned} Z_{np} &= R_{0t} + R_3 + jX_3 + jX_6 = \\ &= \left[R_{020} (1 + \alpha(t - 20^\circ)) + \left(\pi^2 f + j29f \lg \frac{0,178}{r_{np}\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \right) \cdot 10^{-4} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где Z_{np} – полное сопротивление провода; R_{0t} – погонное активное сопротивление провода с учетом температуры окружающего воздуха; X_6 – реактивное сопротивление, создаваемое частью замыкающегося потока в воздухе; R_{020} – погонное активное сопротивление провода при температуре окружающей среды 20°C ; α – температурный коэффициент электрического сопротивления; t – температура провода.

Согласно выражению (10) разделим полное сопротивление провода на активную и реактивную составляющие [5]:

$$X_3 = 29f \lg \frac{0,178}{h\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

Для точного определения полного сопротивления провода с учетом проводимости земли необходимо также учитывать активное сопротивление самого провода и сцепление провода с частью потока, который замыкается в воздухе.

$$Z_{np} = R_{np} + jX_{np} \quad (11)$$

$$R_{np} = \left(R_{020} (1 + \alpha(t - 20^\circ)) + \pi^2 f \cdot 10^{-4} \right) \quad (12)$$

$$X_{np} = 29f \lg \frac{0,178}{r_{np}\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-4}. \quad (13)$$

$$\text{Заменим} \quad D_3 = \frac{0,178}{\sqrt{f\gamma} \cdot 10^{-9}}. \quad (14)$$

Получим

$$X_{np} = 29f \lg \frac{D_3}{r_{np}} \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

Из выражения (13) следует, что реактивное сопротивление не зависит от высоты подвеса провода, так как (9) увеличение высоты подвеса уменьшает X_3 от потока, замыкающегося в грунте, но при этом увеличивается $X_в$ из-за увеличения потока, замыкающегося в воздухе [5].

Анализ влияния сопротивления грунта под ВЛ на параметры срабатывания первой ступени защиты нулевой последовательности

На основании вышеизложенного, проведем анализ изменения уставок срабатывания защит нулевой последовательности на примере участка трехфазной линии электропередачи без грозозащитного троса (рис. 3).

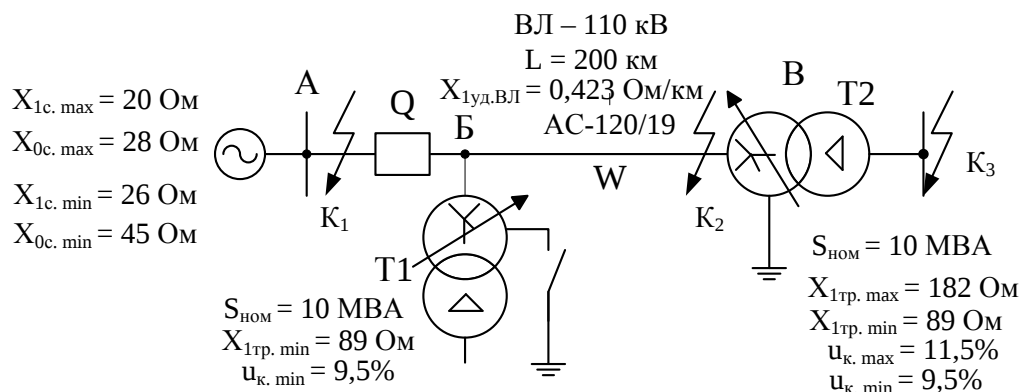


Рис. 3. Расчетная схема участка электроэнергетической сети

Сопротивления воздушной линии электропередачи на напряжение 110 кВ допустимо рассчитывать без учета активной составляющей. Сопротивление прямой последовательности $X_{1ВЛ} = 0,423$ Ом/км. Сопротивление нулевой последовательности $X_{0ВЛ}$ одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземненных грозозащитных тросов найдем с учетом конечной проводимости земли [3]:

$$X_{0ВЛ} = 0,435 \lg \frac{D_3}{r_{cp}}, \quad (16)$$

где $r_{cp} = \sqrt[3]{r_{эк} D_{cp}^2}$ – среднегеометрический радиус системы из трех проводов линии.

На рис. 4 представлено изменение величины сопротивления нулевой последовательности провода AC-120/19 в зависимости от изменения сопротивления грунта.

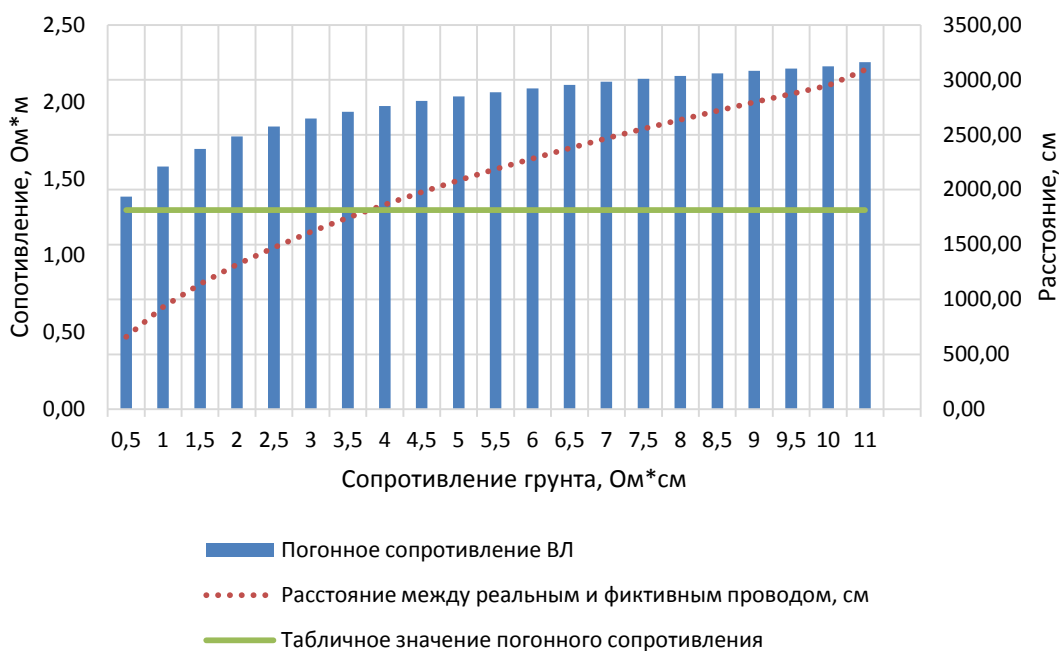


Рис. 4. Зависимость величины сопротивления нулевой последовательности от изменения сопротивления грунта

Из анализа рис. 4 следует, что табличное значение погонного сопротивления ВЛ, принимаемого при расчетах уставок защит нулевой последовательности значительно отличается от расчетных данных с учетом конечной проводимости грунта [5].

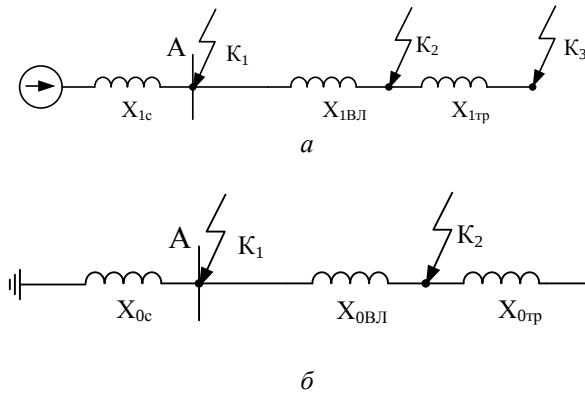


Рис. 5. Схемы замещения прямой (а) и нулевой (б) последовательностей участка электроэнергетической сети

Для определения токов короткого замыкания составим схему прямой (рис. 5, а) и нулевой последовательностей (рис. 5, б) участка электрической сети, представленного на рис. 3.

Произведем расчет первой ступени защиты токовой отсечки и определим возможность выполнения без реле направления мощности нулевой последовательности [6] (рис. 6).

$$3I_{0K1}^{(1)} = \frac{3U_{\phi}}{2X_{1K1} + X_{0K1}} \quad (17)$$

$$X_{1K1} = X_{2K1} = X_{1c, max}$$

$$X_{0K1} = \frac{X_{0c}(X_{0ВЛ} + X_{0mp})}{X_{0c} + X_{0ВЛ} + X_{0mp}}$$

Составляющая тока короткого замыкания со стороны системы:

$$3I_{0c} = \frac{3I_{0K1} \cdot X_{0K1}}{X_{0c}}$$

со стороны воздушной линии электропередачи:

$$3I_{0c} = \frac{3I_{0K1} \cdot X_{0K1}}{X_{0ВЛ} + X_{0mp}}$$

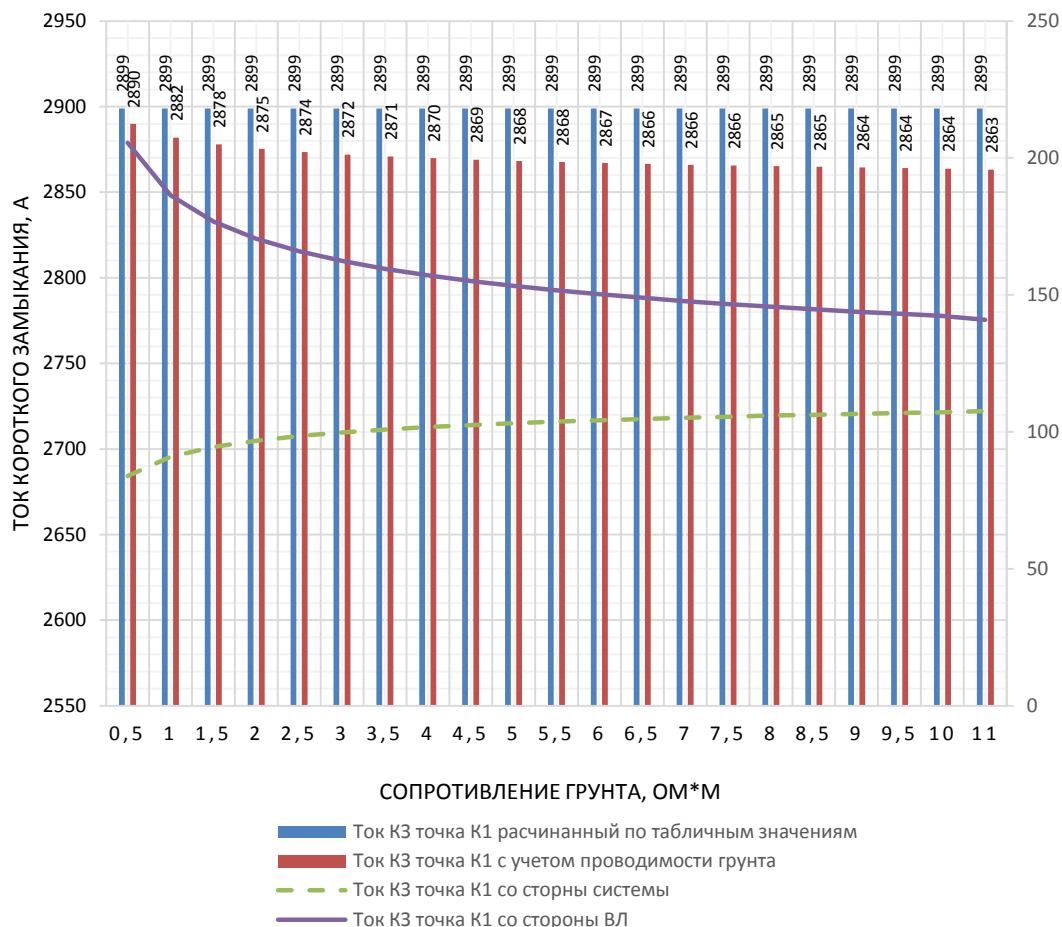


Рис. 6. Зависимость изменения токов короткого замыкания в точке K1 от сопротивления грунта

Ток срабатывания ненаправленной отсечки (1) от коротких замыканий на землю по условию несрабатывания при кз в точке К1 принимаем (рис. 7):

$$I_{сз}^I = k_n 3I_{0ВЛ}.$$

Исходя из расчетных данных (рис. 4–5) следует, что погрешность определения тока нулевой последовательности при коротком замыка-

нии в точке К1 при использовании табличных значений сопротивлений нулевой последовательности составит от 8 % до 5,8 %, а средняя погрешность тока срабатывания токовой защиты нулевой последовательности будет около 47 %, за счет значительных колебаний реальных значений сопротивления нулевой последовательности (рис. 4).

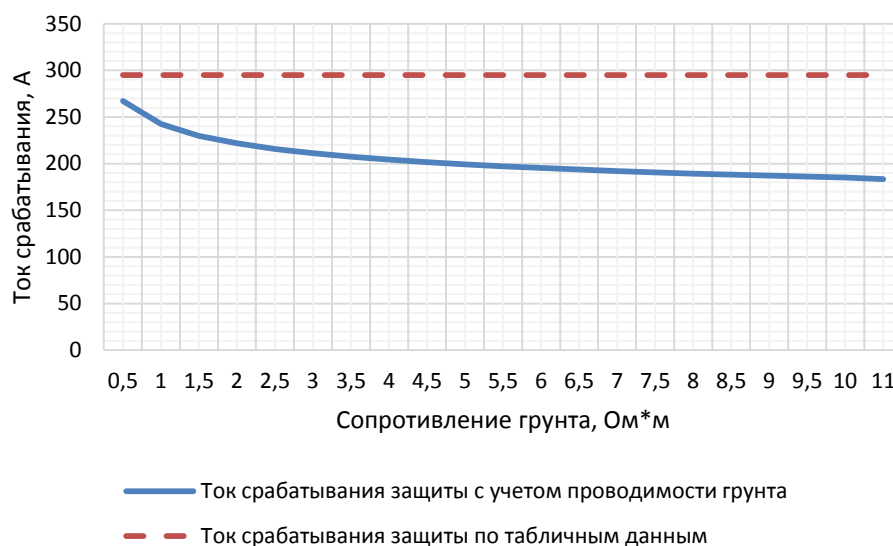


Рис. 7. Зависимость изменения тока срабатывания первой ступени защиты от изменения сопротивления грунта

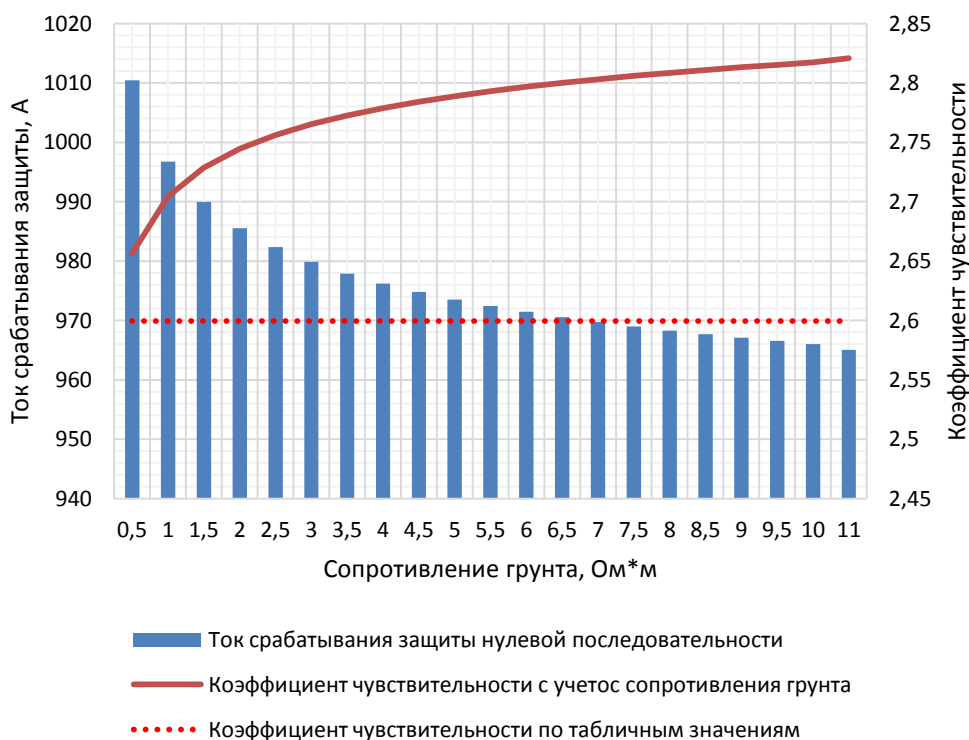


Рис. 8. Изменение тока срабатывания защиты нулевой последовательности и коэффициента чувствительности

Произведем оценку эффективности ненавленной токовой защиты нулевой последовательности при постоянной уставке срабатывания, рассчитанной при фиксированном табличном значении погонного сопротивления и уставки срабатывания с учетом изменения сопротивления грунта под воздушной линией электропередачи в точке К2 (рис. 8).

Вывод

Величина тока срабатывания первой ступени токовой защиты нулевой последовательности сильно зависит от сопротивления грунта. При разработке системы релейной защиты электроэнергетических систем на этапе проектирования пользуются погонными значениями сопротивлений, усредненными, и не учитывают в расчетах сопротивление грунта, в результате средняя погрешность составляет 5 %. При этом значение $I_{сз}$, определяемого по табличным данным, выше реального на 61 А, завышенный ток срабатывания загроубляет систему релейной защиты и уменьшает чувствительность ее. Поэтому для корректного функционирования защиты необходимо использовать адаптивную защиту, способную корректировать автоматически уставку срабатывания в зависимости от сезонных изменений сопротивления грунта. Необходимо под линией электропередачи устанавливать датчики влажности, которые будут передавать параметры грунта в систему релейной защиты, которая посредством алгоритма

обрабатывается изменяет уставку. Кроме того, рекомендуется при проектировании защиты воздушных линий электропередачи учитывать сопротивление грунта (посредством использования карты грунтов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю Линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 75 с.
2. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электро-снабжение». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 496 с.
3. Крючков, И. П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учебное пособие / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев ; под редакцией И. П. Крюкова, В. А. Старшинова. – Москва : МЭИ, 2012. – 568 с.
4. Ахмедова, О. О. Исследование корректного функционирования модели системы релейной защиты с адаптивной уставкой срабатывания / О. О. Ахмедова, А. Г. Сошинов // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования». – 2018. – С. 259–266.
5. Ахмедова, О. О. Анализ влияния изменения погонных параметров воздушной линии электропередачи под воздействием внешних факторов на уставку срабатывания дистанционной защиты / О. О. Ахмедова, А. Г. Сошинов // Промышленная энергетика. – 2021. – № 7. – С. 14–21.
6. Лоскутов, А. А. Функциональные испытания микропроцессорного терминала релейной защиты TOP 200 в системе электроснабжения с объектом распределенной генерации / А. А. Лоскутов, А. Л. Куликов, И. А. Петров, Н. М. Шмелева, А. А. Крикин // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2023. – С. 247–263.