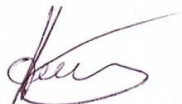


На правах рукописи

Пеленев Денис Николаевич



**ИНВАРИАНТНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА
ЗЕМЛЮ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВХОДНЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор
Абрамович Борис Николаевич

Официальные оппоненты:

Ершов Михаил Сергеевич - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, профессор

Костарев Илья Андреевич - кандидат технических наук, ООО «Уралмонтажавтоматика», заместитель главного инженера

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита состоится 31 мая 2017 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 31 марта 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

Общая характеристика работы

В структуре электротехнических комплексов (ЭТК) промышленных предприятий России основным звеном являются электроустановки среднего класса напряжения 6 - 35 кВ, от надежной и бесперебойной работы которых зависит эффективность технологических процессов на производстве.

Выполненный анализ эксплуатационных данных об аварийности электроустановок в ЭТК напряжением 6 - 35 кВ показал, что подавляющее большинство повреждений связано с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ), доля которых составляет от 75 до 80 % от общего числа аварийных случаев. Режим однофазного замыкания сопровождается значительными экономическими ущербами вследствие выхода из строя ответственного электрооборудования и характеризуется возникновением ситуаций, связанных с высокой опасностью поражения обслуживающего персонала электрическим током.

Для минимизации ущербов в ЭТК напряжением 6 - 35 кВ по причине однофазных замыканий на землю необходимо применять эффективные средства релейной защиты и автоматики, позволяющие селективно выявлять поврежденное присоединение и своевременно устранять возникшее ОЗЗ путем отключения поврежденного участка сети. Однако нестационарность конфигурации ЭТК, многофакторность процессов при однофазных замыканиях на землю, многообразие режимов ОЗЗ предопределяют сложность организации защиты, обладающей необходимой селективностью и независимостью действия в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Разработке и совершенствованию защит от однофазных замыканий на землю большое внимание уделено в работах Сироты И.М., Лихачева Ф.А., Обабкова В.К., Шабада М.А., Абрамовича Б.Н., Шалина А.И., Сапункова М.Л., J. Roberts, E. Schweitzer. Однако, несмотря на многочисленные исследования и разработки, проведенные в этой области, практически ни одно из наиболее распространенных устройств защиты от ОЗЗ не обладает требуемой селективностью и неизменностью действия в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Это обуславливает необходимость разработки структуры, алгоритмов действия и реализации защиты от однофазных замыканий на землю, позволяющей селективно выявлять поврежденное присоединение в условиях возникновения неполных ОЗЗ и обладающей инвариантностью, т.е. независимостью действия по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

Цель работы

Повышение селективности и инвариантности действия защиты от однофазных замыканий на землю электротехнических комплексов напряжением 6 - 35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Идея работы

Обеспечение селективного и инвариантного действия защиты от однофазных замыканий на землю в ЭТК среднего класса напряжения с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью при неполных замыканиях на землю достигается путем оценки величины переходного сопротивления в месте повреждения и последующей автоматической коррекции входных параметров защиты с учетом степени неполноты замыкания на землю.

Основные задачи исследований:

1. Выявить закономерности изменения напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в условиях вариации переходного сопротивления в месте ОЗЗ, позволяющие определить степень неполноты замыкания фазы электрической сети на землю.
2. Установить влияние вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости линий, переходные сопротивления в месте замыкания на землю и параметры системы заземления нейтрали, на эффективность действия защиты от ОЗЗ.
3. Разработать алгоритмы инвариантного действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров, включая сигналы тока нулевой последовательности защищаемых присоединений и уставки на срабатывание.

4. Разработать структуру и реализацию аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий на землю, обеспечивающего селективное выявление поврежденного присоединения в условиях возникновения неполных замыканий на землю и обладающего инвариантным действием по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

Научная новизна:

1. Установлены закономерности изменения напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в ЭТК напряжением 6 - 35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности, включая переходное сопротивление в месте замыкания на землю, поперечные проводимости фаз линий относительно земли и параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю и ее влияние на чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю.

2. На основе установленных зависимостей, характеризующих процессы в контуре нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление, разработан алгоритм действия защиты от однофазных замыканий на землю, предусматривающий оценку уровня неполноты замыкания фазы на землю и последующую автоматическую коррекцию сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений до величин, при которых обеспечивается инвариантность действия защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Практическая ценность:

1. Разработана методика определения чувствительности действия токовых защит от ОЗЗ в условиях неполных однофазных замыканий на землю, позволяющая выявить необходимый уровень коррекции входных сигналов защиты.

2. Разработаны структура и реализация аппаратно-программного комплекса инвариантной защиты от однофазных замыканий на землю, обладающего повышенной селективностью выявления поврежденного присоединения в условиях возникновения ОЗЗ через переходные сопротивления.

Методы исследования

В работе использованы методы имитационного моделирования в системе *MatLab Simulink*, численного анализа с использованием пакета *MathCAD*, экспериментального исследования путем физического моделирования в лабораторных условиях.

Достоверность результатов исследования

Адекватность моделей и методов, используемых в работе, подтверждается известными фундаментальными теориями и методами исследования электрических процессов при однофазных замыканиях на землю, результатами вычислительных и натурных экспериментов. Сходимость результатов моделирования и экспериментальных исследований не ниже 90 %.

Реализация результатов работы

Разработанная в диссертации методика коррекции входных параметров защиты рекомендована к использованию при эксплуатации и модернизации защиты от однофазных замыканий на землю в ЭТК напряжением 6 - 35 кВ ПАО «Уралкалий», о чем получен акт внедрения основных результатов работы.

Личный вклад автора

Установлено влияние вариации параметров контура нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление на эффективность действия защиты от замыканий на землю. Разработана методика определения чувствительности действия токовой защиты от ОЗЗ в условиях неполных однофазных замыканий. Разработан алгоритм, обеспечивающий инвариантность действия защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности. Разработан аппаратно-программный комплекс защиты от однофазных замыканий на землю для ЭТК с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью, обладающий необходимой селективностью выявления поврежденного присоединения при замыканиях на землю через переходное сопротивление.

Апробация работы

Основные положения данной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва 2013, 2014, 2016 гг.); 54 - я

международная конференция студентов и молодых ученых «Mining division student research group conference» (г. Краков, Польша, 2013 г.); международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность энергетического оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); юбилейная 70-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ 2016» (г. Москва, 2016 г.); международная межвузовская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые - наукам о земле» (г. Москва, 2016 г.); конференция молодежного инновационного центра ПАО «ЛЕНЭНЕРГО» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); 2-ая международная научная школа академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 2016 г.); III-я международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано всего 10 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 56 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 97 наименований. Общий объем диссертации 143 страницы.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 1 рассмотрены научно-технические проблемы обеспечения селективности действия защит от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах напряжением 6 - 35 кВ с различными режимами нейтрали. Обоснована необходимость повышения селективности и инвариантности действия защит в условиях возникновения неполных замыканий на землю.

В главе 2 установлено влияние вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости

линий, переходное сопротивление в месте замыкания на землю и параметры системы заземления нейтрали на характеристики срабатывания токовых защит от ОЗЗ. Разработана методика определения чувствительности действия защиты в условиях неполных замыканий на землю.

В главе 3 разработаны алгоритмы инвариантного действия защиты при ОЗЗ через переходные сопротивления для ЭТК среднего класса напряжения с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью, предусматривающие автоматическую коррекцию входных параметров защиты с учетом степени неполноты замыкания.

В главе 4 разработана структура и реализация аппаратно-программного комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ в индивидуальном и групповом исполнении. Приведены результаты экспериментальных исследований инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты и выполнена оценка чувствительности его действия.

Заключение отображает обобщенные выводы по результатам исследований, исходя из поставленной цели и задач диссертационной работы.

По результатам выполненных исследований на защиту выносятся следующие положения:

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю должна определяться с учетом выявленных зависимостей напряжения и токов нулевой последовательности от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения и параметры системы заземления нейтрали, позволяющих оценить степень неполноты замыкания на землю.

Принцип действия ненаправленных токовых защит от однофазных замыканий на землю основан на контроле токов нулевой последовательности в отходящих присоединениях. В режиме однофазного замыкания на землю по поврежденному присоединению протекает наибольший ток нулевой последовательности среди всех

линий распределительной сети, значение которого, в результате сравнения с уставкой по току, приводит к срабатыванию индивидуального комплекта защиты от ОЗЗ, установленного на этой линии. Однако при возникновении в месте повреждения переходного сопротивления напряжение и токи нулевой последовательности в защищаемых присоединениях снизятся, что может привести к отказу в функционировании защиты от ОЗЗ.

В режиме ОЗЗ через переходное сопротивление напряжение и ток нулевой последовательности определяются по выражениям:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_\Phi j3\omega C_\Sigma (\operatorname{tg}\delta + \lambda d_N + j)}{R_\Pi 3\omega C_\Sigma (\operatorname{tg}\delta + \lambda d_N + j) + 1}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_\Phi}{R_\Pi 3\omega C_\Sigma (\operatorname{tg}\delta + \lambda d_N + j) + 1}, \quad (2)$$

где $\dot{U}_\Phi$ - комплекс фазного напряжения сети, В; ω - круговая частота, с⁻¹; C_Σ - суммарная емкость относительно земли электрической сети, мкФ; $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь; $\lambda = Y_{\Sigma \text{тр}}/g_N + Y_{\Sigma \text{тр}}$ - безразмерный показатель, учитывающий параметры трансформатора заземления нейтрали; $d_N = 1/R_N 3\omega C_\Sigma$ - коэффициент, учитывающий выбор величины сопротивления заземляющего резистора R_N по отношению к емкостному сопротивлению сети; R_Π - переходное сопротивление в месте ОЗЗ, Ом.

Согласно выражениям (1) и (2) снижение напряжения и токов нулевой последовательности в защищаемых линиях при замыканиях на землю через переходное сопротивление по сравнению с режимом металлического ОЗЗ происходит пропорционально коэффициенту неполноты замыкания на землю:

$$n = \frac{1}{\sqrt{(\operatorname{tg}\delta R_\Pi 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_\Pi 3\omega C_\Sigma + 1)^2 + (R_\Pi 3\omega C_\Sigma)^2}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что значение коэффициента неполноты замыкания на землю зависит от параметров контура нулевой последовательности, включая переходное сопротивление в месте повреждения, поперечные проводимости фаз линий относительно земли

и параметры системы заземления нейтрали. С использованием экспериментальных данных установлены диапазоны вариации суммарной емкости сети $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ, тангенса угла диэлектрических потерь – $0,02 \leq \operatorname{tg} \delta \leq 3,5$, коэффициента λ – $0,96 \leq \lambda \leq 0,99$, переходного сопротивления $1 \leq R_{\Pi} \leq 7000$ Ом и коэффициента d_N – $0 \leq d_N \leq 4$. Приняв за базисную величину предельное значение из выбранных диапазонов вариации суммарной емкости сети, тангенса угла диэлектрических потерь, переходного сопротивления получим $0,001 \leq C_{\Sigma}^* \leq 1$; $0,006 \leq \operatorname{tg} \delta^* \leq 1$; $0,0014 \leq R_{\Pi}^* \leq 1$ соответственно.

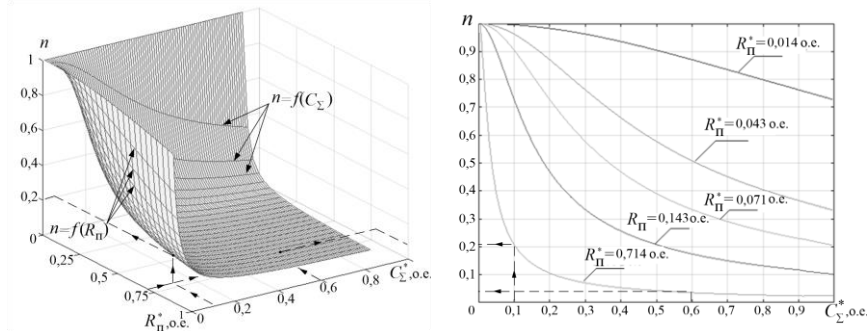


Рисунок 1 - Зависимости коэффициента неполноты замыкания на землю от переходного сопротивления в месте ОЗЗ и суммарной емкости сети с изолированной нейтралью ($d_N=0$)

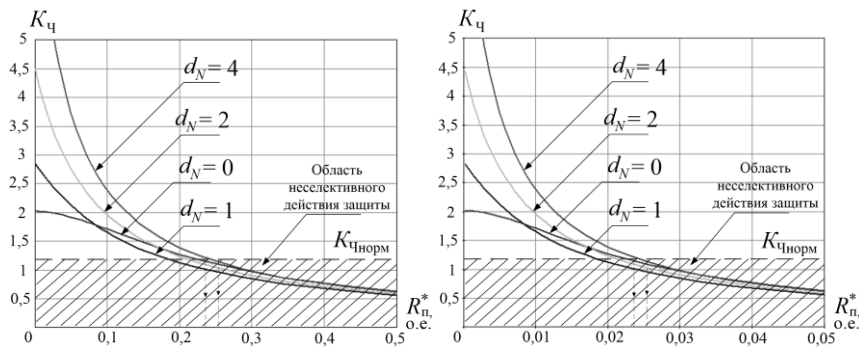
С использованием выражения (3) и рисунка 1 установлено, что значение коэффициента неполноты замыкания находится в пределах $0 \leq n \leq 1$ и при увеличении переходного сопротивления в месте ОЗЗ снижается. Кроме того, с увеличением параметров контура нулевой последовательности градиент снижения коэффициента неполноты замыкания имеет наибольшее значение. Например, при $R_{\Pi}^*=0,714$ и $C_{\Sigma}^*=0,1$ и $C_{\Sigma}^*=0,6$ коэффициент неполноты составит 0,2 и 0,05 соответственно.

Чувствительность действия токовой защиты от ОЗЗ характеризуется коэффициентом чувствительности, который при

возникновении замыкания на землю через переходное сопротивление с учетом выражений (1) и (3) определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{3\omega U_{\text{ф}}(C_{\Sigma} - C_{\text{л.с.}})\sqrt{\text{tg}^2\delta + \lambda^2 d_N^2 + 1}}{K_{\text{отс}} U_{\text{ф}} 3\omega C_{\text{л.с.}} \sqrt{\text{tg}^2\delta + 1}} \cdot n, \quad (4)$$

где $K_{\text{отс}} = K_{\text{н}} \cdot K_{\text{бр}}$, $K_{\text{н}} = 1,2 - 1,3$ – коэффициент надежности; $K_{\text{бр}} = 1,2 - 1,5$ – коэффициент «броска», учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения замыкания на землю; $C_{\text{л.с.}}$ – емкость относительно земли защищаемой линии, мкФ.



а)

б)

Рисунок 2 - Зависимости коэффициентов чувствительности защиты при ОЗЗ через переходное сопротивление при различной суммарной емкости сети и коэффициенте d_N :

а) – $C_{\Sigma}^* = 0,1$; б) – $C_{\Sigma}^* = 1$.

Из рисунка 2, на котором представлены зависимости коэффициентов чувствительности защиты при ОЗЗ через переходное сопротивление при различном d_N , следует, что при коэффициенте чувствительности защиты в режиме металлического ОЗЗ $K_{\text{ч}} = 2$ в кабельной сети с изолированной нейтралью и суммарной емкостью $C_{\Sigma}^* = 0,1$ и вариации переходного сопротивления в месте повреждения токовые защиты от однофазных замыканий на землю позволяют селективно выявлять поврежденное присоединение при переходном сопротивлении в месте замыкания не более $R_{\text{н}}^* = 0,24$ ($K_{\text{чнорм}} = 1,25$).

Повышение чувствительности действия защиты достигается путем увеличения тока нулевой последовательности, протекающего по поврежденному присоединению, за счет увеличения доли активной составляющей тока заземляющего резистора и при максимальном значении коэффициента $d_N=4$ возможно увеличение зоны селективного действия защиты до $R_n^*=0,27$. При значении суммарной емкости электрической сети $C_\Sigma=1$ защита окажется неработоспособной при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление в $R_n^*=0,024$.

С точки зрения организации эффективной защиты от ОЗЗ, способной селективно выявлять поврежденное присоединение в условиях замыкания на землю через переходное сопротивление определенной величины необходимо на стадии проектирования определить минимальный коэффициент чувствительности, который должна иметь защита от замыканий на землю в режиме металлического ОЗЗ:

$$K_{\text{ч.мин.}} = \sqrt{(\text{tg}\delta R_n 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_n 3\omega C_\Sigma + 1)^2 + (R_n 3\omega C_\Sigma)^2} . \quad (5)$$

Из рисунка 3, на котором приведены зависимости минимальных коэффициентов чувствительности защиты от переходного сопротивления в месте ОЗЗ, полученные с использованием выражения (5), следует, что, например, в электрической сети с изолированной нейтралью ($d_N=0$) и суммарной емкостью $C_\Sigma=0,5$ защита от ОЗЗ должна иметь в режиме металлического замыкания минимальный коэффициент чувствительности 13 для того, чтобы селективно выявить присоединение с ОЗЗ через переходное сопротивление $R_n^*=0,4$, а в сети с резистивно-заземленной нейтралью ($d_N=1$) при тех же условиях – 18. С увеличением емкости сети значения минимальных коэффициентов чувствительности возрастают.

Таким образом, существующая методика по выбору уставок и проверке чувствительности защит от замыканий на землю, согласно которой ток в поврежденном присоединении определяется в режиме металлического ОЗЗ, не позволяет учесть снижение рабочих сигналов защиты при замыканиях на землю через переходные сопротивления, что приводит к неселективному действию токовых защит от ОЗЗ. Поэтому возникает необходимость в разработке методики определения

чувствительности действия токовых защит от ОЗЗ при неполных однофазных замыканиях на землю.

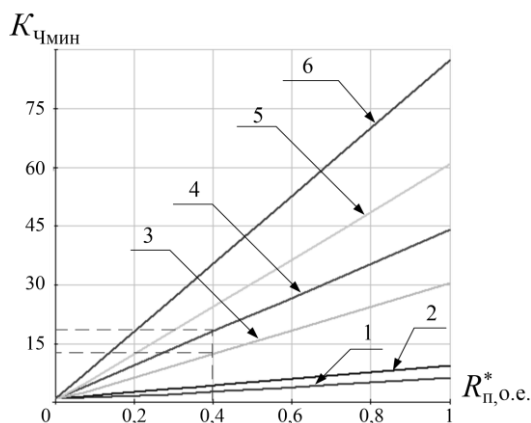


Рисунок 3 - Зависимости минимальных коэффициентов чувствительности защиты от переходного сопротивления в месте ОЗЗ:

1, 3, 5 – построены при $d_N=0$; 2, 4, 6 - построены при $d_N=1$;
1,2 – при $C_Σ=0,1$; 3,4 – при $C_Σ=0,5$; 5,6 – при $C_Σ=1$

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма выбора уставок и определения чувствительности действия защиты от ОЗЗ при замыканиях через переходные сопротивления, позволяющая выполнить оценку необходимого уровня коррекции входных параметров защиты в зависимости от степени неполноты замыкания на землю.

2. Аппаратно-программный комплекс защиты от однофазных замыканий на землю для электрических сетей с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью должен содержать взаимосвязанные модули, позволяющие определять степень неполноты замыкания на землю и выполнять последующую автоматическую коррекцию сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений до уровня, соответствующего расчетному режиму металлического замыкания на землю, при котором обеспечивается селективная идентификация поврежденного присоединения и инвариантность

действия защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

На основе полученных зависимостей, характеризующих процессы в контуре нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление, установлено, что повысить селективность и обеспечить инвариантность действия токовой защиты от ОЗЗ в условиях замыкания через переходное сопротивление возможно путем коррекции рабочих сигналов защиты в соответствии с уровнем неполноты замыкания на землю.

Структурно-функциональная схема защиты от однофазных замыканий на землю, алгоритм действия которой предусматривает коррекцию сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии в режиме ОЗЗ, представлена на рисунке 5.

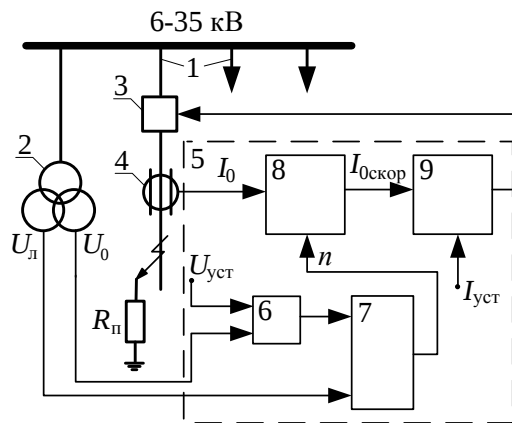


Рисунок 5 - Структурно-функциональная схема защиты с коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии

На рисунке 5 обозначены: 1 – защищаемые линии электрической сети; 2 – измерительный трансформатор напряжения с двумя вторичными обмотками; 3 – автоматический выключатель; 4 – датчик тока нулевой последовательности, в виде фильтра тока нулевой

последовательности или трансформатора тока нулевой последовательности; 5 – блок защиты линии; 6 – пороговый (пусковой) орган защиты по напряжению нулевой последовательности; 7 – модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю; 8 – модуль коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии; 9 – логический элемент защиты; U_L – линейное напряжение сети; $U_{уст}$ – уставка порогового (пускового) органа защиты по напряжению; $I_{0\text{кор}}$ – сигнал скорректированного тока нулевой последовательности защищаемой линии; $I_{уст}$ – уставка по току срабатывания.

Функционирование защиты с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии осуществляется в соответствии с алгоритмом действия, представленном на рисунке 6.

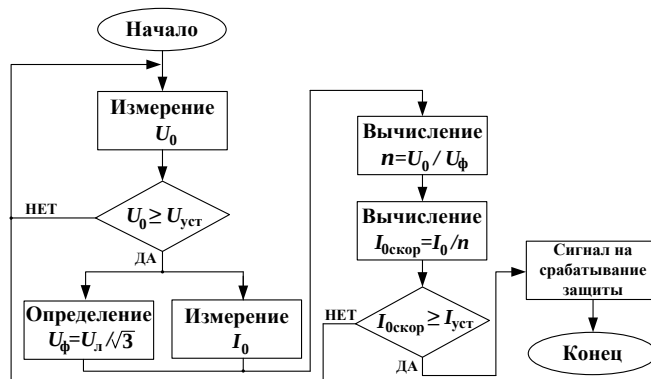


Рисунок 6 - Алгоритм действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии

С использованием программного пакета *Matlab Simulink* было выполнено имитационное моделирование работы инвариантной защиты от ОЗЗ, результаты которого представлены на рисунках 7 и 8. Согласно рисунку 7, где в качестве примера рассмотрен случай замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью с суммарной емкостью сети

$C_{\Sigma}^*=0,1$ и $\operatorname{tg}\delta^*=0,006$ через переходное сопротивление $R_{\Pi}^*=0,25$, сигнал тока нулевой последовательности защищаемой линии I_0 оказывается меньше уставки на срабатывание $I_{уст}$, выбранной исходя из условия металлического ОЗЗ, что обуславливает возникновение опасности в отказе функционирования защиты. Однако за счет автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности с учетом коэффициента неполноты замыкания на землю, который в рассматриваемом случае составил 0,59, сигнал скорректированного тока нулевой последовательности $I_{0\text{скор}}$ достигнет значения, которое соответствует режиму металлического ОЗЗ, что позволит обеспечить срабатывание логического элемента (ЛЭ) защиты.

Из рисунка 8, на котором представлены зависимости коэффициентов чувствительности инвариантной защиты и ненаправленной токовой защиты от переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости сети, следует, что в сравнении ненаправленными защитами, разработанный алгоритм коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии позволяет обеспечить неизменность коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ, т.е. инвариантность действия защиты при вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли и переходное сопротивление в месте повреждения.

На основе структурно-функциональной схемы защиты от ОЗЗ (рисунок 5) был разработан аппаратно-программный комплекс инвариантной защиты с автоматической коррекцией входных параметров (рисунок 9), содержащий: 1 – промежуточный трансформатор тока; 2, 3 – промежуточные трансформаторы напряжения по каналам линейного напряжения и напряжения нулевой последовательности; 4 – промежуточный трансформатор, необходимый для согласования уровня напряжения питания комплекса защиты; 5 – клавиатура для ввода уставок защиты; 6 – графический мини-дисплей; 7 – индикатор состояния контактов выходного реле защиты; 8 – выходное реле защиты. Выполнением вычислительно-логических операций, которые предусмотрены в разработанном алгоритме действия защиты (рисунок 6), управляет модуль микроконтроллера.

На рисунке 10 представлены результаты экспериментального исследования инвариантности действия комплекса защиты, в результате которых было установлено, что алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания обеспечивает неизменность рабочего сигнала защиты $I_{0\text{сбор}}^*$ и независимость характеристик срабатывания при вариации переходного сопротивления в контуре нулевой последовательности R_{Π}^* . Сравнение экспериментальной характеристики I_0^* с аналитической, построенной с использованием выражения (1) позволяет оценить достоверность выполненного экспериментального исследования, согласно которому сходимость результатов моделирования и эксперимента не ниже 90 %.

Проверить чувствительность пускового органа защиты по напряжению нулевой последовательности необходимо по выражению:

$$R_{\Pi} = \frac{\sqrt{\lambda^2 d_N^2 9\omega^2 C_{\Sigma}^2 - 9\omega^2 C_{\Sigma}^2 \cdot (\lambda^2 d_N^2 + 1) \cdot (1 - K_{\text{чмет}}^2)} - \lambda d_N 3\omega C_{\Sigma}}{9\omega^2 C_{\Sigma}^2 \cdot (\lambda d_N + 1)}, \quad (6)$$

где $K_{\text{чмет}} = U_{\phi}/U_{\text{уст}}$ - коэффициент чувствительности защиты по каналу напряжения в режиме металлического ОЗЗ.

Разработанный аппаратно-программный комплекс защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров обеспечивает селективное выявление поврежденного присоединения и инвариантность действия защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлены зависимости напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в ЭТК с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения, параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю и ее влияние на чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю.

2. Установлено, что при вариации переходного сопротивления в месте повреждения в диапазоне $0,00014 \leq R_{\pi}^* \leq 1$ и коэффициенте чувствительности защиты в режиме металлического замыкания $K_{\text{ч}}=2$ в сети с изолированной нейтралью и суммарной емкостью $C_{\Sigma}^*=0,1$ (0,92 мкФ) токовые защиты от однофазных замыканий на землю позволяют селективно выявлять поврежденное присоединение при переходном сопротивлении в месте замыкания не более $R_{\pi}^*=0,24$ (1680 Ом). Показано, что за счет увеличения доли активной составляющей тока заземляющего резистора в токе нулевой последовательности поврежденной линии возможно увеличить зону селективного действия защиты до $R_{\pi}^*=0,27$.

3. Разработана методика определения чувствительности действия защиты от ОЗЗ при замыканиях на землю через переходные сопротивления, позволяющая выполнить оценку необходимого уровня коррекции входных параметров защиты в зависимости от степени неполноты замыкания на землю.

4. Разработаны алгоритмы инвариантного действия защиты от ОЗЗ, предусматривающие автоматическую коррекцию входных параметров, включая сигналы тока нулевой последовательности защищаемых линий и уставки по току срабатывания, обеспечивающие селективное выявление поврежденного присоединения в условиях неполных замыканий на землю, как в индивидуальном исполнении защиты, так и в групповом.

5. В результате исследований с использованием имитационных моделей инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров в среде программирования *Matlab Simulink* доказано, что при вариации параметров контура нулевой последовательности в пределах, указанных в п. 2 выводов, обеспечивается неизменное действие защиты.

6. Разработан аппаратно-программный комплекс защиты от ОЗЗ, экспериментальные исследования инвариантности действия которого показали, что алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания обеспечивает неизменность рабочего сигнала защиты и независимость характеристик срабатывания при вариации переходного сопротивления в контуре нулевой последовательности.

7. Разработаны рекомендации по выбору уставок на срабатывание аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий, согласно которым при условии выбора уставки по напряжению нулевой последовательности 10 % от фазного напряжения в сети с суммарной емкостью $C_{\Sigma}^*=0,5$ селективное выявление поврежденного присоединения возможно при предельном переходном сопротивлении в месте ОЗЗ $R_{\Pi}^*=0,39$, а при суммарной емкости сети $C_{\Sigma}^*=1 - R_{\Pi}^*=0,18$.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Пеленев Д.Н. Инвариантная токовая защита от однофазных замыканий на землю для электрических сетей 6 - 35 кВ // Горное оборудование и электромеханика, №9, Москва. – 2014. – С. 16-20.

2. Пеленев Д.Н. Адаптивное управление режимом нейтрали распределительных сетей 6 – 35 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса / Д.Н. Пеленев, Ю.Л. Жуковский // Международный научно-исследовательский журнал, №5 (47), Екатеринбург. – 2016. – С. 103-106.

3. Пеленев Д.Н. Система автоматической коррекции селективности действия защиты от однофазных замыканий на землю предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.Н. Пеленев // Горное оборудование и электромеханика, №1, Москва. – 2017. – С. 12-16.

4. Пат. 2578123 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Устройство защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / Б.Н. Абрамович, Ю.Л. Жуковский, Д.Н. Пеленев // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. - № 2015104212/07; заявл. 09.02.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8 – 7 с.

5. Пат. 168498 Российская Федерация, МПК H02H 3/16 G01R 31/08. Устройство защиты электрических сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.Н. Пеленев // заявитель и патентообладатель Санкт-

**Петербургский горный университет. - № 2016144542;
заявл. 14.11.2016; опубл. 07.02.2017, Бюл. № 4 – 7 с.**

В изданиях, цитируемых в БД Scopus:

6. Pelenev, D. The automatic correction of selective action of relay protection system against single phase earth faults in electrical networks of mining enterprises / Yuriy Gukovskiy, Yuriy Sychev, Denis Pelenev // International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, Research India Publications. – 2017. – pp. 833-838.

В других изданиях:

7. Пеленев Д.Н. Обоснование актуальности применения селективной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ промышленных предприятий / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев // Материалы 13 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»: Сб. науч. тр. – Москва, 2016. – С. 185-188.

8. Пеленев Д.Н. Анализ влияния переходного сопротивления на работоспособность ненаправленной токовой защиты от однофазных замыканий на землю// Материалы 2-ой международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр»: Сб. науч. тр. – Москва, 2016. – С. 142-145.

9. Пеленев Д.Н. Анализ влияния переходного сопротивления на работоспособность ненаправленной токовой защиты от однофазных замыканий на землю// Материалы 2-ой международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр»: Сб. науч. тр. – Москва, 2016. – С. 142-145.

10. Пеленев Д.Н. Токовая защита электрических сетей от однофазных замыканий на землю инвариантного действия // Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность энергетического оборудования»: Сб. науч. тр. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 124-127.

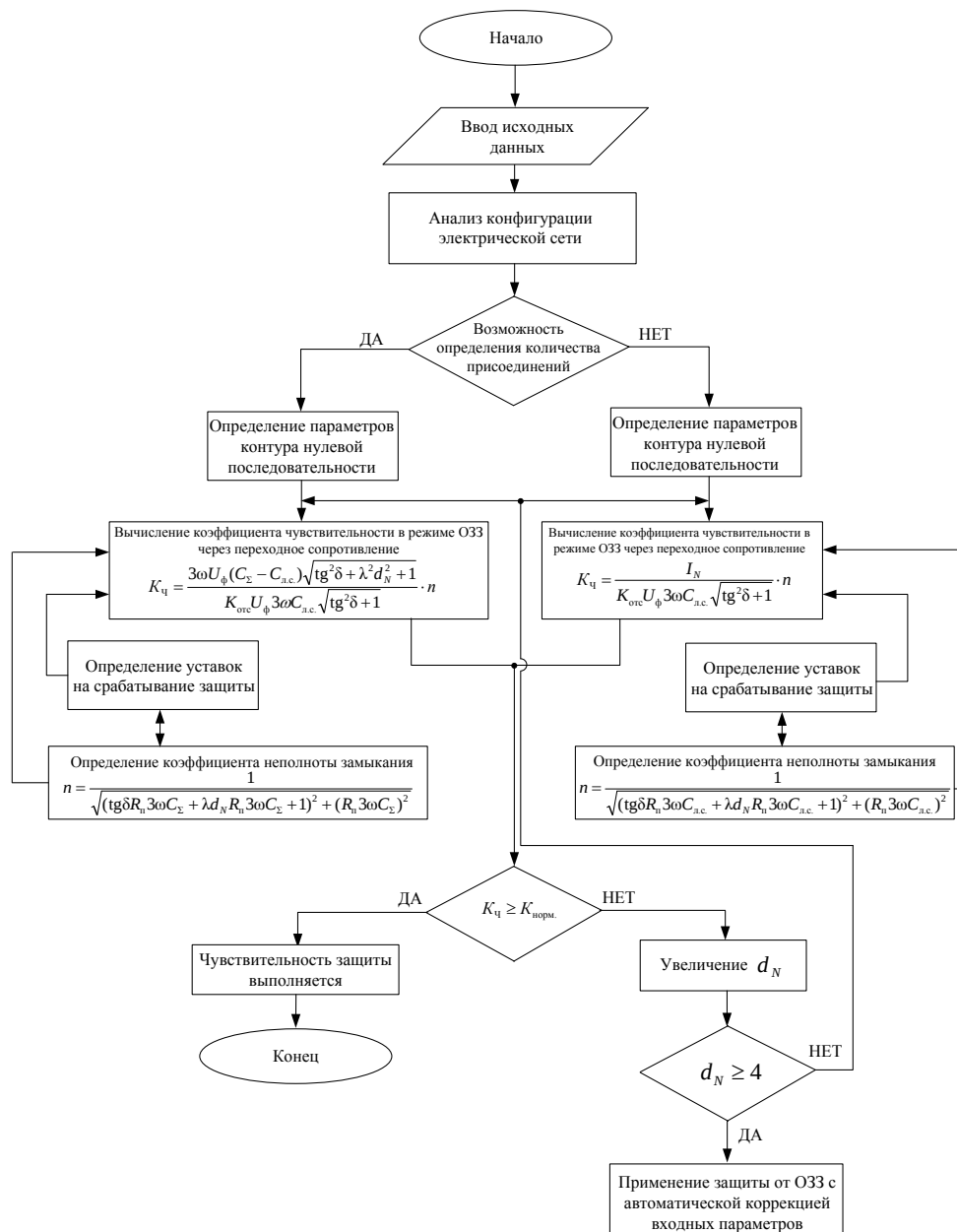


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма выбора уставок и проверки чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях неполных замыканий на землю

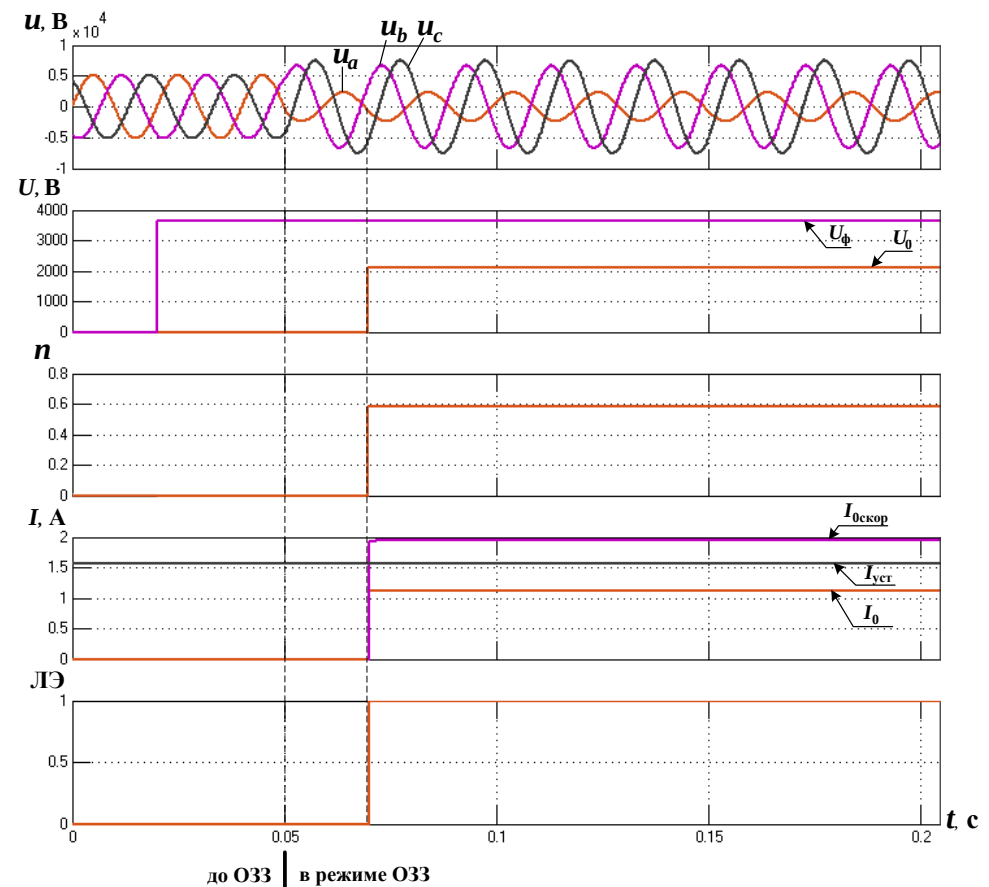


Рисунок 7 - Зависимости u_a , u_b , u_c , U_0 , U_{ϕ} , n , I_0 , $I_{0\text{сгор}}$ от времени, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ на поврежденной линии при замыкании на землю через переходное сопротивление $R_{\text{н}}^* = 0,25$

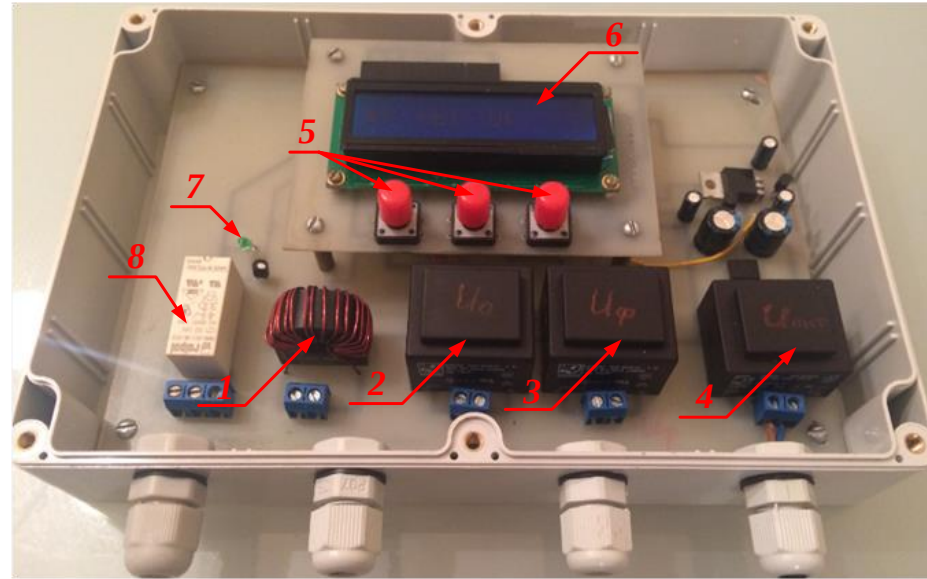


Рисунок 9 - Аппаратно-программный комплекс инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии

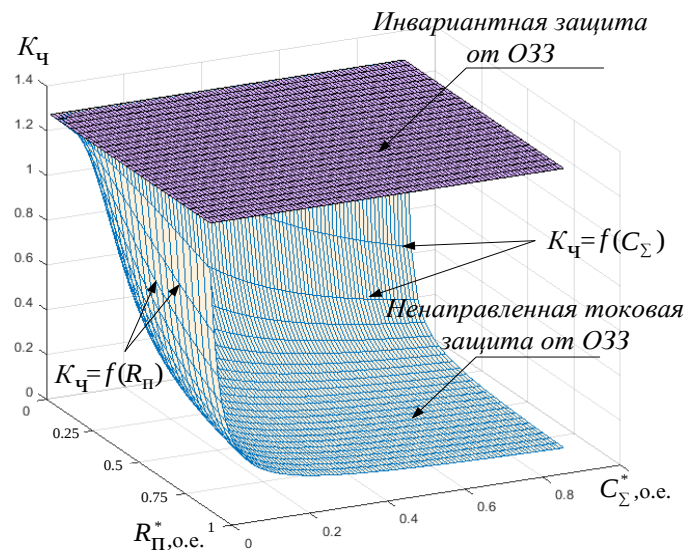


Рисунок 8 - Зависимости коэффициентов чувствительности инвариантной защиты от ОЗЗ и ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ от переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости сети

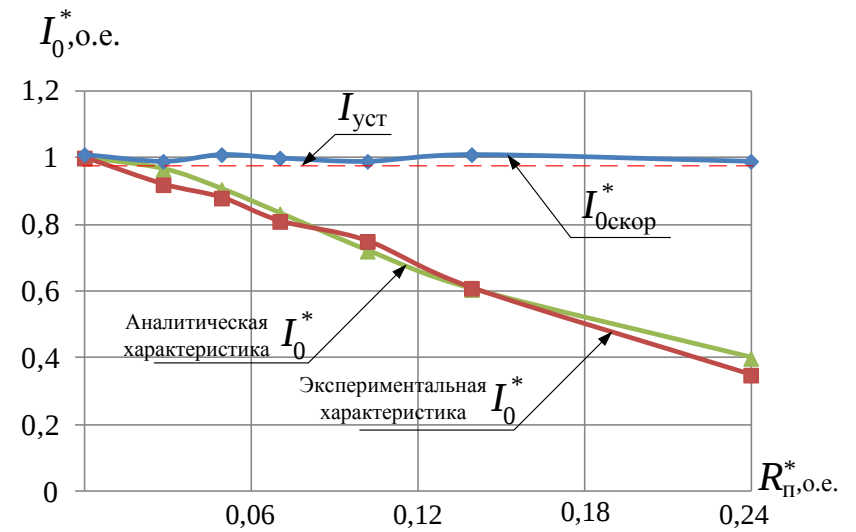


Рисунок 10 - Зависимости сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии и скорректированного тока нулевой последовательности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ