

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет «Механико-технологический»
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой БЖД

_____ / А.И. Сидоров /

« ____ » _____ 2019 г.

Анализ поражения током в сетях с резистивным заземлением нейтрали

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР

Руководитель работы, доцент

_____ / А.И. Сидоров /

« ____ » _____ 2019 г.

Автор работы
студент группы П–459

_____ /К.А. Табашников /

« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____ /А.В. Кудряшов /

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Табашников К.А. Анализ поражения током в сетях с резистивным заземлением нейтрали. – Челябинск: ЮУрГУ, П–459, 45 с., 19 ил., 2 табл., библиогр. список – 12 наим., альбом иллюстраций – 23 листа.

В работе рассматриваются существующие на сегодняшний день режимы нейтрали в электрических сетях напряжением 6–35 кВ, определяются достоинства и недостатки каждой из них.

Для исследования были выбраны сети с резистивным заземлением нейтрали, в частности с высокоомным заземлением. Проводится анализ поражения человека электрическим током, при прикосновении к корпусу высоковольтной электрической машины как в установившемся, так и в переходном режимах. Приведены результаты исследования зависимости тока, протекающего через тело человека от сопротивления изолирующего основания в установившемся режиме и от времени отключения защитной аппаратуры в переходном.

Была разработана компьютерная модель электрической сети с резистивным заземлением нейтрали, симулирующая прикосновение человека к одной из фаз, в программе MATLAB с пакетом расширений Simulink.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР						
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>							
<i>Разраб.</i>		Табашников К.А.			Анализ опасности поражения током в сетях с резистивным заземлением нейтрали			<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>	
<i>Пров.</i>		Сидоров А.И.									
<i>Т. контр.</i>											
<i>Н. контр.</i>		Кудряшов А.В.									
<i>Утв.</i>		Сидоров А.И.								ЮУрГУ Кафедра БЖД	

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6– 35 кВ.....	6
1.1 Сети с глухозаземленной нейтралью.....	6
1.2 Сети с изолированной нейтралью.....	10
1.3 Сети с компенсированной нейтралью.....	14
1.4 Резистивное заземление нейтрали.....	19
2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ.....	30
3 АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ.....	35
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРИКОСНОВЕНИИ ЧЕЛОВЕКА К ФАЗНОМУ ПРОВОДУ.....	39
5 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	44

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех видов травм, получаемых человеком, электротравмы по количеству смертельных исходов занимают одну из лидирующих позиций. По данным Министерства Энергетики РФ, ежегодно в мире от электротравм погибают десятки тысяч человек, а еще сотни тысяч теряют трудоспособность. Преобладающая часть электротравм возникает из-за допущения персоналом грубых ошибок и нарушений правил техники безопасности и эксплуатации электроустановок. Это можно объяснить тем, что работники не в полной степени понимают всю опасность поражения током и вытекающие отсюда последствия. Однако заставить работника относиться к собственной безопасности более серьезно и побудить его выполнять предусмотренные требования безопасности не такая простая задача. Поэтому можно пойти от обратного – можно попытаться обеспечить такие условия производства работ, при которых вероятность получения травмы работником максимально минимизируется. И именно для этого проводится анализ опасности поражения человека током в различных электрических сетях.

Проведение такого анализа позволяет нам оценить эффективность существующих на данный момент средств обеспечения электробезопасности, различных режимов заземления нейтрали, позволяет аналитически рассматривать ряд возможных ситуаций поражения электрическим током и, на основании этого анализа, делать определенные выводы и разрабатывать меры по обеспечению безопасности.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

1 РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 35 кВ

1.1 Общие положения

Выбор режима заземления нейтрали в сети 6–35 кВ – исключительно важный вопрос при проектировании и эксплуатации. Режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ определяет:

- ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании;
- схему построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровень изоляции электрооборудования;
- выбор ограничителя перенапряжения (ОПН) для защиты от перенапряжений;
- бесперебойность электроснабжения;
- допустимое сопротивление контура заземления подстанции;
- безопасность персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

Таким образом, режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети. В сетях среднего напряжения применяются 4 режима заземления нейтрали. То есть всего в мире в сетях среднего напряжения (до 69 кВ), в отличие от сетей высокого напряжения (110 кВ и выше), используются четыре возможных варианта заземления нейтральной точки сети:

- а) изолированная (незаземленная);
- б) заземленная через дугогасящий реактор;
- в) заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный);
- г) глухозаземленная.

На рисунке 1 показаны четыре режима заземления нейтрали в сетях среднего напряжения.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

Кроме указанных четырех режимов заземления нейтрали в мире применяется также комбинация (параллельное включение) дугогасящего реактора и резистора. Например, такая комбинация встречается в воздушных сетях 20 кВ Германии, где дугогасящий реактор обеспечивает гашение кратковременных однофазных перекрытий изоляции на землю, а низкоомный резистор подключается к нейтрали сети параллельно реактору только кратковременно специальным однофазным силовым выключателем. Резистор в такой схеме служит для селективного определения питающей линии, отходящей от подстанции (фидера) с устойчивым однофазным замыканием на землю.

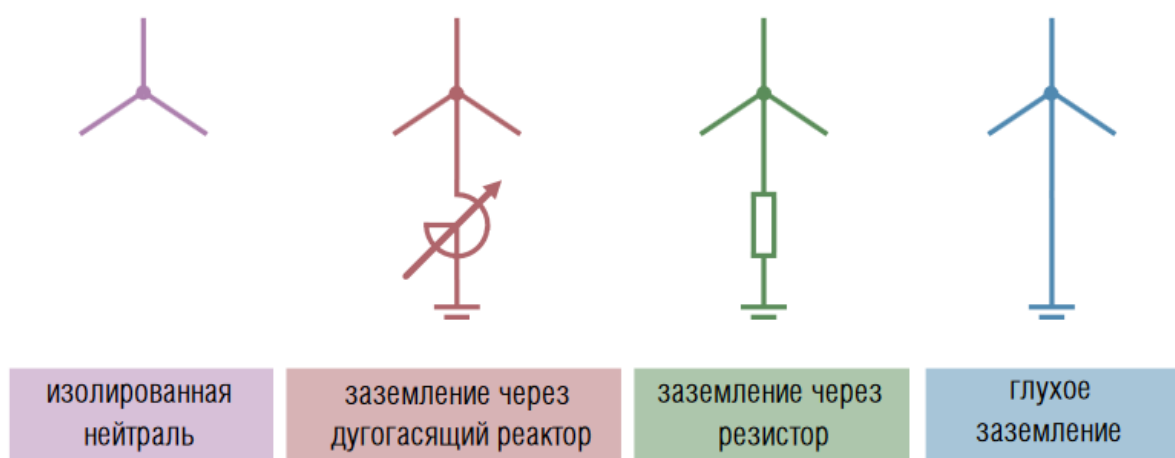


Рисунок 1 – Режимы заземления нейтрали сетей среднего напряжения

Если посмотреть на мировую практику эксплуатации сетей среднего напряжения, то хорошо видно, что в отличие от России, где используется режим изолированной нейтрали (примерно 80 % сетей 6–35 кВ) и режим заземления через дугогасящий реактор (примерно 20 % сетей 6–35 кВ), в других странах чаще всего применяется заземление нейтрали через резистор или дугогасящий реактор.

В таблице 1 приведены режимы эксплуатации сетей среднего напряжения в разных странах.

смаиваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор».

Таким образом, в сетях 6–35 кВ в России разрешены все режимы заземления нейтрали, кроме глухого заземления. Четкого определения и рекомендаций, в каких случаях в сетях 6–35 кВ должен использоваться тот или иной режим заземления нейтрали, в ПУЭ нет. В том же пункте 1.2.16 только указаны граничные емкостные токи, начиная с которых должна применяться компенсация емкостного тока: «Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах:

в сетях напряжением 3–20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ – более 10 А;

в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях электропередачи:

более 30 А при напряжении 3–6 кВ;

более 20 А при напряжении 10 кВ;

более 15 А при напряжении 15–20 кВ;

в схемах генераторного напряжения 6–20 кВ блоков генератор-трансформатор – более 5 А».

Отсутствие рекомендаций по использованию режима нейтрали в сетях 6–35 кВ в ПУЭ скорее всего связано со сложностью формирования таких рекомендаций для большого разнообразия сетей 6–35 кВ (сельских, городских, сетей промышленных предприятий и др.) и необходимости учета при этом многих условий [5].

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.2 Сети с глухозаземленной нейтралью

Электрической сетью с заземленной нейтралью считается такая сеть, в которой хотя бы одна из нейтралей генераторов или силовых трансформаторов заземлена непосредственно или через устройство с малым сопротивлением по сравнению с сопротивлением нулевой последовательности сети. Сети с подобным заземлением нейтрали работают, как правило, до 1000 В и в сетях выше 35 (110) кВ. Условная схема сети с глухозаземленной нейтралью приведена на рисунке 2.

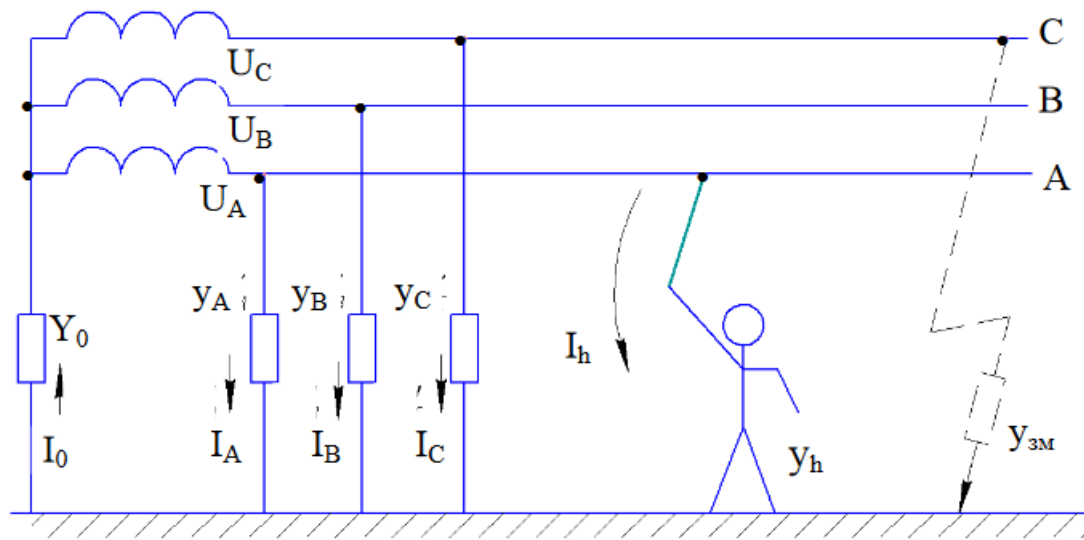


Рисунок 2 – Сеть с заземленной нейтралью

Напряжение прикосновения для сетей с заземленной нейтралью в соответствии с законом Кирхгофа можно записать следующим образом:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c + \underline{I}_h. \quad (1)$$

Считая напряжение фаз симметричным, можно записать:

$$\underline{U}_0 y_0 = (\underline{U}_\phi - \underline{U}_0)(y_a + y_h) + (\underline{U}_\phi a^2 - \underline{U}_0) y_b + (\underline{U}_\phi a - \underline{U}_0) y_c, \quad (2)$$

где a – поворотный множитель.

Тогда,

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_\phi \frac{y_a + a^2 y_b + a y_c + y_h}{y_a + y_b + y_c + y_0 + y_h}. \quad (3)$$

Так как

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} - \underline{U}_0, \quad (4)$$

то подставив в уравнение (4) выражение (3), получим:

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} \frac{y_b(1-a^2) + y_c(1-a) + y_0}{y_a + y_b + y_c + y_0 + y_h}. \quad (5)$$

Проводимость нейтрали $y_0 \gg y_a, y_b, y_c$, поэтому уравнение (5) в результате преобразования можно представить в следующем виде:

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} \frac{y_0}{y_0 + y_h}, \quad (6)$$

или, в действительной форме:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \frac{R_h}{R_h + r_0}. \quad (7)$$

В сетях напряжением до 1 кВ $r_0 \leq 8$ Ом, а поскольку сопротивление тела человека $R_h \leq 1000$ Ом, то можно считать, что максимальное значение напряжения прикосновения – фазное напряжение.

Можно сделать вывод, что в сети с глухозаземленной нейтралью в нормальном режиме параметры изоляции практически не влияют на напряжение прикосновения ($U_{\text{пр}}$) и ток через тело человека, т.е. при прикосновении к одной из фаз напряжение прикосновения близко к фазному ($R_h \gg r_0$), а ток через тело человека определяется его собственным сопротивлением.

Ток через тело человека будет определяться по формуле:

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_h + r_0} \quad (8)$$

В аварийном режиме напряжение прикосновения определяется по формуле:

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} \frac{(1-a) y_{\text{зам}} + y_0}{y_{\text{зам}} + y_0 + y_h}. \quad (9)$$

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

На рисунке 3 показано напряжение прикосновения на векторной диаграмме в случае замыкания фазы С на землю.

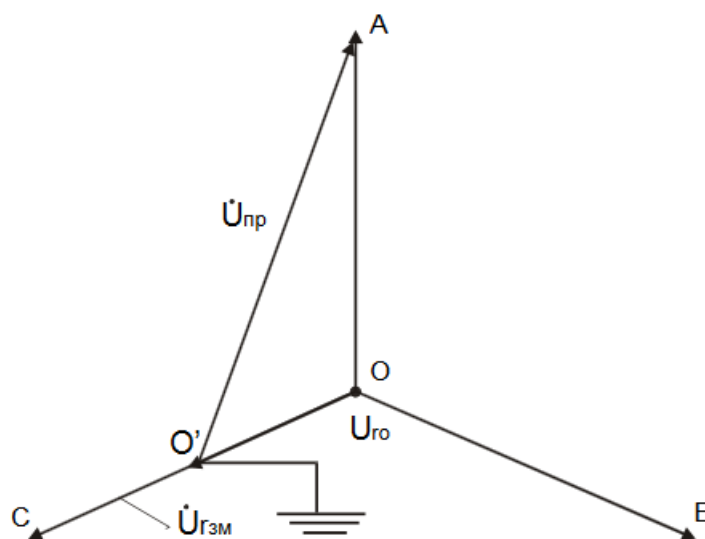


Рисунок 3 – Векторная диаграмма напряжений для аварийного режима работы сети с заземленной нейтралью

Из рисунка 3 видно, что величина напряжения прикосновения $U_{пр}$ в случае замыкания одной из фаз на землю зависит от соотношения $r_{зМ}$ и r_0 и лежит в диапазоне:

$$U_{\phi} < U_{пр} < U_{л.}$$

Таким образом, в аварийном режиме $r_0 < r_{зМ}$ и, следовательно, напряжение прикосновения возрастает, однако это увеличение зависит от соотношения сопротивлений r_0 и $r_{зМ}$ [6].

Ток через тело человека в общем случае будет определяться как:

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_h + r_0 + r_{об} + r_{п}} \quad (8)$$

где $r_{об}$ – сопротивление обуви,

$r_{п}$ – сопротивление пола.

Достоинствами сети с глухозаземленной нейтралью являются:

- Минимальные напряжения при возникновении однофазных замыканий;
- Возможность использования оборудования с таким уровнем изоляции, который изначально предполагает фазное напряжение;
- Не требуется специальная схема защиты, достаточно обычных функций защиты от тока перегрузки в фазах для удаления глухих замыканий фазы на землю;
- Параметры изоляции практически не влияют на напряжение прикосновения и ток через тело человека;

Недостатки:

- Достаточно высокий риск повреждений и помех вследствие большого замыкания тока на землю;
- Сбои в работе фидера после повреждения;
- Сохраняется опасность для человека во время действия повреждения в результате создания значительных напряжений прикосновения и шага.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

- дуговые перенапряжения, связанные с появлением перемежающейся дуги при ОЗЗ и приводящие к переходу однофазного замыкания к двух- и трехфазное;
- возможность возникновения многоместных повреждений изоляции (одновременное повреждение изоляции нескольких фидеров) при однофазных замыканиях на землю;
- феррорезонансные явления, вызываемые кратковременными ОЗЗ;
- пробой изоляции на первоначально неповрежденных фидерах при однофазных замыканиях на землю в сети;
- повреждения трансформаторов напряжения (НТМИ, ЗНОЛ, ЗНОМ) при замыканиях на землю;
- сложность обнаружения места повреждения (места замыкания);
- неправильная работа релейных защит от однофазных замыканий на землю;
- опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети;
- сложность построения селективной защиты от однофазного замыкания на землю при изолированной нейтрали и их недостаточная работоспособность в сетях с различными режимами и конфигурацией.

В связи с наличием такого количества недостатков режим изолированной нейтрали в сетях 6–35 кВ был исключен в подавляющем большинстве стран Европы, Северной и Южной Америки, Австралии и других странах еще в 40–50-х годах прошлого века.

В сетях среднего напряжения 3–69 кВ стран Европы, Северной и Южной Америки, Австралии режим изолированной нейтрали применяется крайне редко (в исключительных случаях). В основном, сети среднего напряжения 3–69 кВ этих стран работают с нейтралью заземленной через резистор или дугогасящий реактор.

Одна из стран, в которых имеется значительное число сетей с изолированной нейтралью – это Финляндия. Там указанный режим используется исключительно в воздушных сетях 20 кВ и его применение существенно отличается от отечественной практики эксплуатации. В частности, при наличии режима изолированной нейтрали в сети 20 кВ защиты от замыканий на землю действуют на мгновенное отключение

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

поврежденной воздушной линии. При отказе в отключении выключателя отходящей линии с выдержкой времени 0,5 секунды отключается выключатель ввода на секцию. Режим изолированной нейтрали в воздушных сетях 20 кВ Финляндии применяется исключительно для повышения чувствительности защит от замыканий на землю, так как сопротивление грунта на большей части территории этой страны в 20–50 раз выше, чем средне-европейское. При таком высоком удельном сопротивлении грунта заземление нейтрали (глухое или через резистор) не увеличивает ток в поврежденном фидере, так как он, в основном, определяется сопротивлением грунта. Применение изолированной нейтрали в данном случае является вынужденной мерой и причина такого технического решения не обеспечение надежности электропитания, а повышение чувствительности защит от замыканий на землю и безопасности людей [5].

В случае изолированной нейтрали напряжение прикосновения определится следующим образом:

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} \frac{y_b(1-a^2) + y_c(1-a)}{y_a + y_b + y_c + y_h} \quad (9)$$

Однако в этой сети возможен ряд частных случаев:

а) Комплексное сопротивление:

$$r_A = r_B = r_C = r;$$

$$c_A = c_B = c_C = c;$$

т.е. в сети полная симметрия, подставив эти условия в уравнение (9), получим:

$$\underline{U}_{\text{пр}} = \underline{U}_{\text{ф}} \frac{R_h}{R_h + \frac{z}{3}} \quad (10)$$

б) Короткие воздушные линии:

$$r_A = r_B = r_C = r;$$

$$c_A = c_B = c_C = 0.$$

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

В аварийном режиме в сети с изолированной нейтралью напряжение прикосновения резко возрастает (вплоть до линейного) и его величина определяется сопротивлением замыкания $r_{3м}$.

Таким образом, очевидным и главным преимуществом полностью изолированной нейтрали сети является простота реализации такого режима, поскольку при этом отпадает необходимость в специальных устройствах для заземления нейтрали. Однако, как видно из изложенного выше, полностью изолированной нейтралью свойственны весьма серьезные недостатки, основным из которых является возможность возникновения в сети дуговых перемежающихся замыканий на землю, сопровождающиеся значительными перенапряжениями на неподвижных фазах, большой вероятностью развития однофазных замыканий в более тяжелые повреждения и т.д.

В некомпенсированных сетях с изолированной нейтралью существует также большая вероятность возникновения феррорезонансных процессов, сопровождающихся повреждением трансформаторов напряжения и другого оборудования. Предотвращение феррорезонансных процессов связано с определенными трудностями. Но несмотря на отмеченные серьезные недостатки, полностью изолированная нейтраль широко применяется в сетях 6–35 кВ. В ряде случаев целесообразность применения полностью изолированной нейтрали следует считать необоснованной.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

фаз и нарастанием тока в индуктивности L_n . Эти процессы практически мало зависят один от другого.

При отключении замыкания на землю имеет место обратный переход от режима, показанного на рисунке 8, к режиму, приведенному на рисунке 6. При этом также начинается затухающий переходный процесс. В отличие от предыдущего он протекает в замкнутом контуре, т.е. является общим для емкости $3C$ и индуктивности L_n .

При решении практических вопросов компенсации емкостного тока замыкания на землю в отличие от некомпенсированных сетей уже нельзя пренебрегать активными утечками в сети и потерями в меди и стали ДГР.

Обычно при нормальном состоянии сети проводимости активных утечек в ней составляют 2–3 % емкостных, а активная проводимость ДГР – около 2 % его индуктивной проводимости. При учете утечек и потерь схема компенсированной сети представляется в виде, показанном на рисунке 9.

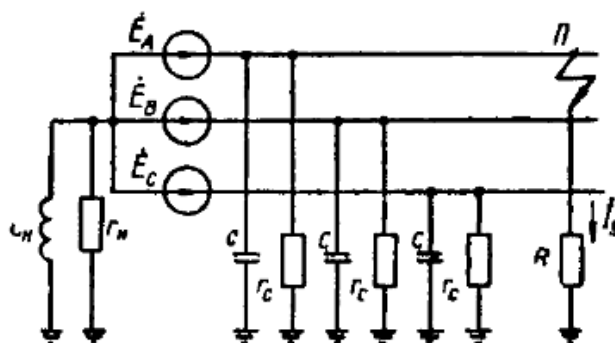


Рисунок 9 – Упрощенная схема компенсированной сети

В сетях среднего напряжения 3–69 кВ европейских стран (Германия, Чехия, Швейцария, Австрия, Франция, Италия, Румыния, Польша, Финляндия, Швеция, Норвегия и др.) широко используется заземление нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим низковольтным резистором. Низковольтный шунтирующий резистор напряжением 500 В подключается через специальный контактор во вторичную силовую обмотку 500 В дугогасящего реактора. Такое техническое решение имеет следующие преимущества:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю и соответственно потребителя;

- малый остаточный ток в месте повреждения;
- самоликвидация однофазных замыканий (особенно на воздушных линиях);
- возможность организации селективной автоматически действующей релейной защиты от однофазных замыканий на землю;
- исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов.

В существующих российских сетях 6–35 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы старой конструкции с ручным регулированием и реакторы с подмагничиванием, но без шунтирующего резистора существует проблема организации селективной защиты от однофазных замыканий на землю. В этих сетях не могут использоваться как простые токовые защиты от замыканий на землю, так и направленные защиты. Первые в связи с тем, что дугогасящий реактор компенсирует ток однофазного замыкания в поврежденном присоединении практически до нуля. Вторые в связи с совпадением направления тока в поврежденном и неповрежденных фидерах по направлению. В поврежденном фидере в направлении «от шин» течет индуктивный ток по величине равный собственному емкостному току фидера, а в неповрежденных фидерах собственные емкостные токи в направлении «к шинам».

Режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим низковольтным резистором, подключаемым во вторичную силовую обмотку напряжением 500 В, позволяет реализовать селективную защиту от замыканий на землю как с использование простых токовых защит, так и более сложных направленных защит по направлению тока или активной мощности нулевой последовательности («ватт-метрические»). Как правило, защиты от замыканий на землю в этом случае действуют на сигнал (ток в месте повреждения мал и его немедленное отключение не требуется).

При наличии шунтирующего низковольтного (500 В) резистора логика использования дугогасящих реакторов следующая. До момента возникновения однофазного замыкания дугогасящий реактор настроен в резонанс, а шунтирующий резистор отключен. В начальной стадии замыкания дуга обычно неустойчива и возникают повторные зажигания и гашения. При этом реактор действует как дугогасящее устройство, и позволяет не отключать поврежденный фидер.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

В нормальном режиме низковольтный шунтирующий резистор дугогасящего реактора отключен и не влияет на точность настройки компенсации. Резистор подключается только на время, требуемое для срабатывания защит от замыканий на землю (1–3 сек). Термическая стойкость резистора, как правило, от 6 до 60 секунд. Подключение шунтирующего резистора регулятор реактора может выполнять как по факту перехода замыкания в устойчивое, так и просто через определенную выдержку времени (например, через 5 с после возникновения перемежающегося замыкания). Если замыкание в течение выдержки времени не перешло в устойчивое, то подключение шунтирующего резистора увеличивает активную составляющую в месте повреждения, тем самым, способствуя стабилизации дуги (переходу замыкания в устойчивое). Если замыкание самоустранилось за время менее 5 с, резистор не подключается и сеть продолжает работать в нормальном режиме.

Из изложенного выше вытекает, что благодаря компенсации емкостного тока замыкания на землю в сети достигаются следующие преимущества. Практически устраняется опасность перемежающихся дуговых замыканий на землю (возможны лишь неустойчивые прерывистые замыкания на землю). В связи с этим предотвращается повышение напряжения на поврежденной фазе выше нормального фазового. Перенапряжения на неповрежденных фазах, обусловленные высокочастотными колебаниями, имеют существенно меньшие значения, чем в сети с изолированной нейтралью. Благодаря снижению перенапряжений резко уменьшается вероятность перехода однофазных замыканий в разноместные замыкания на землю двух фаз. В этом отношении достигаются такие же преимущества, как при заземлении через высокоомное активное сопротивление [5].

Однако в отличие от такого заземления при точной настройки компенсации, небольших высших гармониках и незначительном активном токе утечек почти полностью устраняется ток в месте повреждения. Поэтому многие дуговые замыкания на землю полностью ликвидируются непосредственно после их возникновения.

При однофазном замыкании на землю продолжается бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией. Такой режим не является аварийным, а расценивается как ненормальный и, согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ), может продолжаться несколько часов.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

Помимо того, что при компенсации уменьшается ток в месте повреждения, при ней замедляется восстановление напряжения на поврежденной фазе после отключения замыкания на землю или после погасания дуги. Это также способствует самоликвидации замыканий на землю.

Опыт эксплуатации сетей с компенсированной нейтралью показывает, что при незначительной расстройке компенсации указанные выше преимущества в основном не теряются. даже при сравнительно большой расстройке применение ДГР оказывается весьма эффективным. Отклонения от точной настройки практически незначительно ухудшают условия гашения дуги, причем повторные зажигания в большинстве случаев уже не имеют места, а перенапряжения достигают меньших значений, чем при изолированной нейтрали.

Предельным остаточным током, при котором предотвращается повторное зажигание дуги на воздушных линиях, можно считать 30–40 А. В некомпенсированных сетях с изолированной нейтралью емкостные токи замыкания на землю указанных значений обычно приводит к устойчивому горению дуги (из-за быстрого восстановления напряжения на поврежденной фазе), а в компенсированных сетях практически полностью устраняется возможность феррорезонансных процессов.

наряду с перечисленными большими преимуществами компенсированным сетям свойственны и определенные недостатки. В них возможно возникновение продольного резонанса и связанного с ним повышения напряжений сети при нормальном режиме. При неточной настройке индуктивности ДГР может возникнуть биение напряжений после погасания заземляющей дуги. В момент замыкания на землю через тело человека, прикоснувшегося к токоведущей части, возникает дополнительных свободный, сравнительно медленно затухающий ток дугогасящего реактора, что ухудшает условия электробезопасности [7].

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

1.5 Резистивное заземление нейтрали

Все режимы заземления нейтрали через резистор (или, по-другому, резистивное заземление нейтрали) можно разделить на две большие группы с позиции создаваемого активного тока:

а) высокоомное резистивное заземление нейтрали – это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) не превышает 10 А. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал;

б) низкоомное резистивное заземление нейтрали – это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) превышает 10 А. Как правило, суммарный ток однофазного замыкания при этом режиме заземления нейтрали существенно превышает 10 А, а именно, достигает десятков и сотен ампер, что требует действия защит от замыканий на землю на отключение без выдержки времени (или малой выдержкой).

На рисунке 10 приведены возможные варианты включения резистора в сеть. Как правило, для реализации резистивного заземления нейтрали используют варианты а) и в). Вариант б) достаточно редкий и требует для своей реализации специального трансформатора.

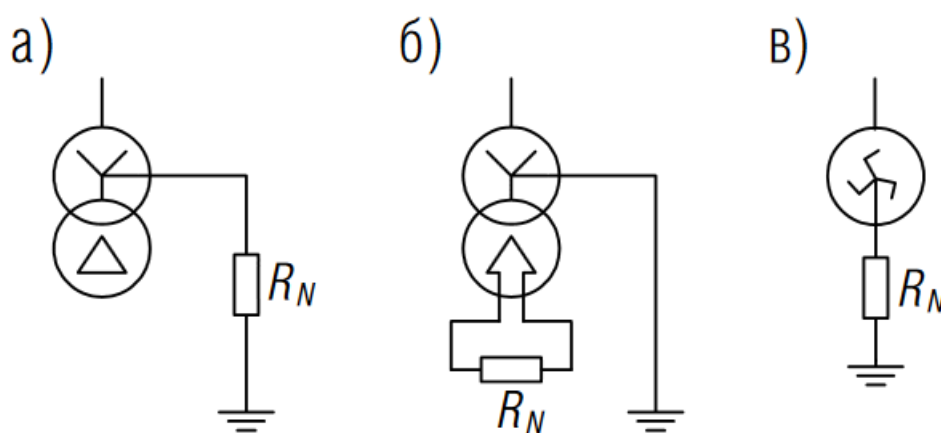


Рисунок 10 – Варианты включения резистора в сеть

Указанное деление на высокоомное и низкоомное резистивное заземление в отечественных документах не выполнено. Четкая граница между этими двумя подвидами резистивного заземления нейтрали дана в зарубежных нормативных докумен-

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

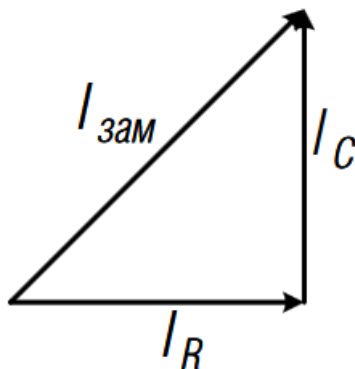


Рисунок 12 – Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании в сети с резистивным заземлением нейтрали

При равенстве активного тока, создаваемого резистором, и емкостного тока сети суммарный ток в месте повреждения увеличивается всего в $\sqrt{2}$ раз. Так при емкостном токе сети величиной 5 А и активном токе 5 А, создаваемом резистором, суммарный ток в месте повреждения составит всего 7 А.

Низкоомное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток I_R , создаваемый резистором, также должен быть больше емкостного тока сети. Как правило, активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостный ток сети не менее чем в 2 раза.

Обычно, ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, лежит в пределах от 20 до 2000 А.

Выбор тока, создаваемого резистором, при низкоомном заземлении нейтрали является разумным компромиссом между двумя противоположными задачами: повышением чувствительности защит от замыканий на землю за счет увеличения тока однофазного замыкания и ограничением тока в месте повреждения (однофазного замыкания) для снижения объема разрушения оборудования.

Достоинства и недостатки сетей с нейтралью, заземленной через резистор представлены в таблице 2.

Таблица 2 – достоинства и недостатки сетей с резистивным заземлением нейтрали

Достоинства	Недостатки
1. Полное устранение феррорезонансных явлений	1. Увеличение тока замыкания на землю (до 40 %)
2. Снижение уровня дуговых перенапряжений и устранение перехода ОЗЗ в двух- и трехфазные замыкания.	2. Появление на подстанции греющего оборудования.
3. Возможность селективных защит от ОЗЗ.	3. Необходимость отключения однофазных замыканий (только для высокоомного заземления нейтрали)
4. Отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю (только для высокоомного заземления нейтрали)	
5. Простая реализация релейной защиты	

Такие существенные преимущества сетей с резистивным заземлением нейтрали как отсутствие перенапряжений при однофазных замыканиях на землю, исключение феррорезонансных процессов насыщения трансформаторов напряжения и возможность организации селективной релейной защиты от замыканий на землю предопределили широкое использование этого режима в зарубежных странах.

Присущие режиму резистивного заземления нейтрали недостатки (увеличение тока в месте повреждения и необходимость отключения замыканий) преодолеваются за счет быстрого отключения поврежденного фидера и организации резервного питания потребителей.

Организация релейной защиты от замыканий на землю в сетях с высокоомным и низкоомным заземлением нейтрали может отличаться.

Как правило, в сетях с высокоомным заземлением нейтрали защиты от замыканий на землю действуют на сигнал. При этом могут использоваться как простые токовые защиты при существенном превышении активным током емкостного, так и направленные защиты при значительных собственных емкостных токах присоединений. Защита от замыканий на землю с действием на отключение в сетях с высокоомным

резистивным заземлением нейтрали может применяться, но необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания в таких сетях нет.

В сетях с низкоомным заземлением нейтрали защиты от замыканий на землю должны действовать на отключение поврежденного фидера с минимально возможной выдержкой времени. Однофазное замыкание при низкоомном резистивном заземлении нейтрали должно отключаться также быстро, как и двухфазное или трехфазное КЗ.

При значительном токе однофазного замыкания на землю (порядка сотен ампер), создаваемом резистором, могут использоваться простые токовые защиты. Уставка по току токовых защит от замыканий на землю отстраивается от собственного емкостного тока присоединений. Как правило, при применении современных цифровых защит с входной фильтрацией сигнала уставка по току может приниматься на уровне 1,5 собственных емкостных тока присоединения. Уставки по времени выбираются по ступенчатому принципу с нарастанием по мере приближения к шинам подстанции и ступенью порядка 0,5 сек. На тупиковых присоединениях уставка по времени равна нулю. При отказе в действии защиты или выключателя отходящего от шин подстанции присоединения резервирование отказа осуществляется отключением выключателя ввода (аналогично резервированию при отказах в отключении междуфазных КЗ). Резервирование в отключении выключателя ввода осуществляется отключением присоединения с резистором. То есть резистор отключается последним, как исключительная мера.

Основываясь на изложенном выше, можно сделать вывод о том, что в сетях 6 – 35 кВ наиболее благоприятными с точки зрения эксплуатации являются режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор с низковольтным шунтирующим резистором и режим заземления через резистор (высокоомный или низкоомный). Режим изолированной нейтрали должен быть полностью исключен из практики эксплуатации [5,7].

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

В связи с несовершенством существующих на сегодняшний день методов исследования условий электробезопасности (аналитический, экспериментальный, статистический, ЛВМ) предпочтение отдается различным методам компьютерного моделирования в определенных программах[12].

Проведение эксперимента с виртуальной моделью дает ряд преимуществ по сравнению с реальными объектами. Так моделирование на компьютерных программах обеспечивает возможность изучения и оптимизации сложных процессов, в которых задаются несколько параметров одновременно, исследование которых традиционными способами затруднительно или даже, в некоторых случаях, невозможно.

Среди ряда программ компьютерного моделирования особо выделяется универсальный программный комплекс MATLAB с расширением Simulink, которое позволяет строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты [9,10].

Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств, как правило, электротехнических: источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи, силовых ключей, регуляторов напряжений и тока и т.п.

Компьютерная модель разрабатывалась при помощи пакета прикладных программ MATLAB, как общепризнанной системы моделирования, с использованием встроенного пакета Simulink.

Пакет Simulink, поставляемый вместе с комплексом MATLAB, предназначен для интерактивного моделирования достаточно сложных систем, состоящих из стандартных блоков. Он позволяет реализовать по существу визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы или устройства, составления и решения её уравнений состояния и наглядного представления результатов моделирования. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Модель сети, построенной в программе Matlab, изображена на рисунке 16.

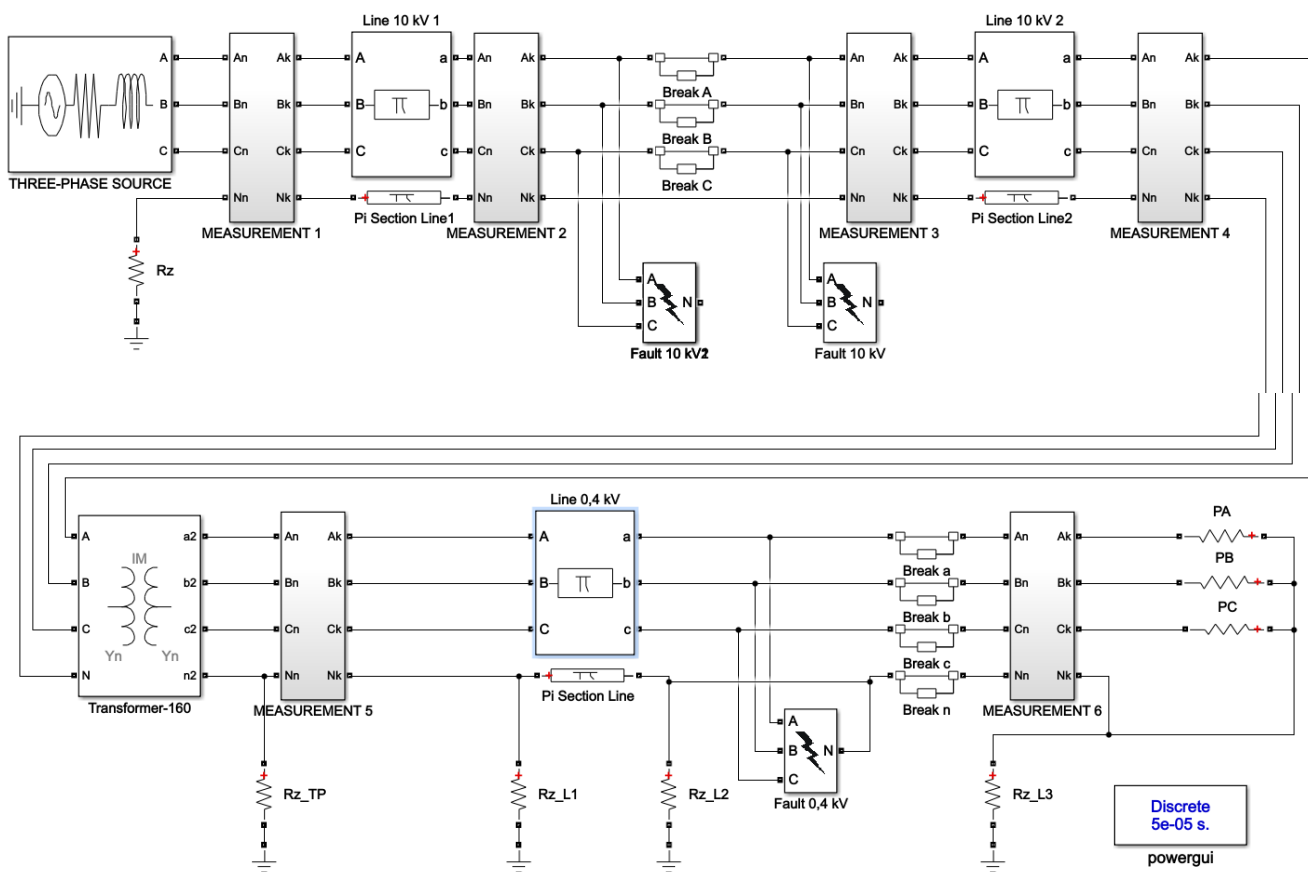


Рисунок 16 – Модель электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ с резистивным заземлением нейтрали

Для построения этой модели используются стандартные блоки библиотеки Simulink:

- Three-Phase Source – моделирует трёхфазный источник питания;
- Three-Phase PI Section Line и PI Section Line – моделирует трёхфазную и однофазную линию с сосредоточенными параметрами;
- Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) – моделирует трёхфазный двухобмоточный трансформатор с различной конфигурацией обмоток и геометрией магнитопровода;
- Parallel RLC Load – моделирует нагрузочную ветвь;
- Three-Phase Fault – моделирует различные виды короткого замыкания в трёхфазной цепи;
- Breaker – моделирует обрыв фазы линии;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

– Series RLC Branch – моделирует последовательную RLC-цепь (в данной модели используется для моделирования активного сопротивления различного рода заземляющих устройств);

– Powergui – является инструментом графического интерфейса

Также в модели использованы дополнительные подсистемы Measurement, объединяющие в себе стандартные измерительные блоки, позволяющие проводить измерения напряжений и токов и их симметричных составляющих как по величине, так и по фазе в различных точках сети.

Данная компьютерная модель предоставляет широкие возможности для исследований. Она позволяет моделировать такие режимы, которые достаточно сложно организовать в реальной электрической сети, и которые небезопасны для людей и животных, находящихся рядом с воздушной линией. Такими режимами могут быть обрывы проводов как ВЛ-10 кВ, так и ВЛ-380 В, различного вида КЗ и др.

В компьютерной модели заключены возможности изменения в широких пределах параметров электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ.

Для упрощения моделирования в рабочей среде MATLAB в редакторе М-файлов написан программный код, который управляет запусками модели, меняя в ней необходимые параметры электрической сети. По окончании моделирования каждого режима, результаты сохраняются в рабочее пространство MATLAB, затем автоматически запускается следующий режим. Так, по очереди, программа запускает все заданные режимы, а результаты измерений каждого из них записываются в файл Microsoft Excel, в котором они представлены в удобном для анализа виде. Таким образом, данный код позволяет быстро промоделировать и записать результаты исследований множества режимов работы моделируемой сети при различном сочетании её технических характеристик [11].

Предполагается дальнейшее проведение исследований на компьютерной модели.

3. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Поражение человека электрическим током возможно при замыкании электрической цепи через тело человека, т.е. при соприкосновении человека с электрической цепью, находящейся под напряжением.

Опасность такого прикосновения оценивается такими факторами как величина тока, проходящего через тело человека (I_h), и напряжение прикосновения ($U_{пр}$), и зависит от ряда факторов: схемы включения человека в цепь, напряжения сети, схемы самой сети, режима ее нейтрали, степени изоляции токоведущих частей от земли, а также от величины емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Схемы включения человека в цепь могут быть различными. Однако наиболее распространенными схемами включения человека в сеть являются: между двумя проводами и между одним проводом и землей, т.е. двухфазная и однофазная схемы соответственно.

Сопротивление тела человека, находящегося между двумя электродами, можно рассматривать как сумму трех последовательно соединенных сопротивлений: двух, создаваемых наружным слоем кожи, и еще одного – остальной частью тела (схема замещения была приведена на рисунке 14). Также дополнительно могут учитывать сопротивления обуви $r_{об}$ и пола $r_{п}$, на котором находится человек.

Под установившимся режимом электрической сети понимается такой нормальный или послеаварийный режим, в котором токи, напряжения и мощности в ее элементах принимаются неизменными. Известно, что при прикосновении к электроустановкам важным фактором, от которого существенно зависят величина тока и, следовательно, степень реакции человека на воздействие этого тока является величина сопротивления тела человека. Общее сопротивление тела человека Z_h представляет собой сумму сопротивлений тканей, расположенных по пути протекания тока, которые колеблются в очень широких диапазонах и зависят от напряжения, площади контактов, длительности протекания токов и других факторов.

Рассмотрим установившийся режим для схемы, приведенной на рисунке 17.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Связь между фазным и линейным напряжением выглядит следующим образом:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

Тогда при указанных параметрах ток и напряжение замыкания будут равны:

$$I_{\text{зам}} = \frac{3488}{1000 + 4} = 3,5 \text{ А},$$

$$U_{R_3} = 3,5 \cdot 4 = 14 \text{ В}.$$

Отсюда ток, протекающий через тело человека будет равен:

$$I_{\text{h}} = \frac{14}{1000} = 0,014 \text{ А} = 14 \text{ мА}.$$

Если принять в расчет сопротивление обуви (например, сопротивление кирзовых сапог, побывавших в носке) равным 3 кОм, то ток через тело человека составит:

$$I_{\text{h}} = \frac{14}{1000 + 3000} = 3,5 \text{ мА}.$$

Приведенные расчеты справедливы в случае отказа защиты от замыкания на землю.

Рассмотрим второй вариант. В цепи заземления высоковольтной машины случился обрыв. Также произошло замыкание фазы А на корпус. В этом случае через тело человека будет протекать ток замыкания. Если принять сопротивление обуви равным нулю, то ток, протекающий через тело человека, при указанных ранее параметрах составит:

$$I_{\text{h}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{h}} + R_{\text{В0}}} = \frac{3468}{1000 + 1000} = 1,7 \text{ А}.$$

Если учесть сопротивление обуви ($r_{\text{об}}$), то величина тока будет равняться:

$$I_{\text{h}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{h}} + R_{\text{В0}} + r_{\text{об}}} = \frac{3468}{1000 + 1000 + 3000} = 0,69 \text{ А}.$$

При наличии под ногами какого-либо изолирующего основания, на величину тока, протекающего через тело человека, сопротивление этого основания будет оказывать влияние.

На рисунке 18 представлена зависимость тока через тело человека от величины сопротивления изолирующего основания:

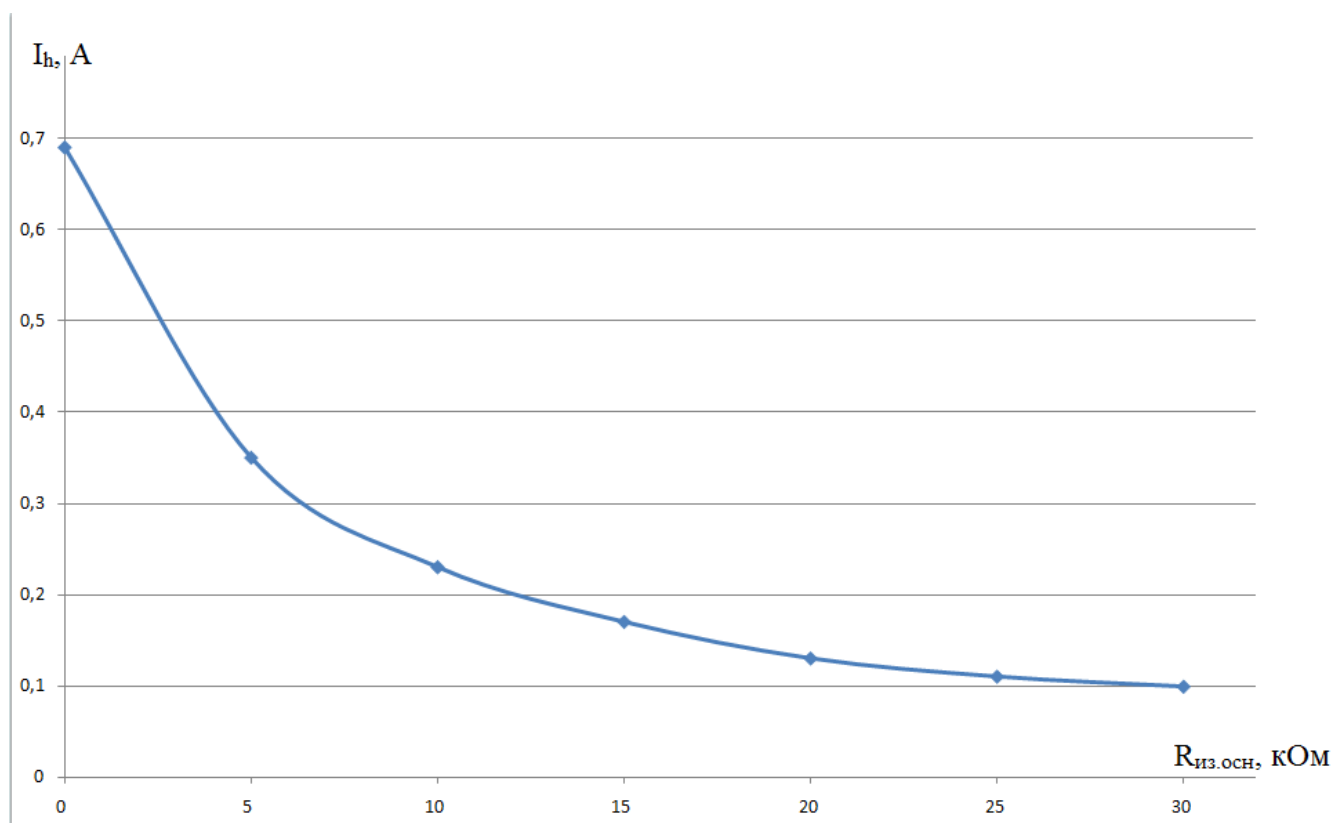


Рисунок 18 – зависимость тока через тело человека от величины сопротивления изолирующего основания

Из рисунка 18 следует, что при неизменных параметрах высоковольтного сопротивления заземления нейтрали, сопротивления тела человека и обуви, ток через тело человека будет определяться величиной сопротивления изолирующего основания, и при определенной его величине он будет не превышать предельно допустимый уровень, который для длительного режима воздействия составляет 6 мА [1].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРИКОСНОВЕНИИ ЧЕЛОВЕКА К ФАЗНОМУ ПРОВОДУ

Переходные процессы возникают в электрических сетях при различных воздействиях, приводящих их из стационарного состояния в новое стационарное состояние, то есть, – при действии различного рода коммутационной аппаратуры, например, ключей, переключателей для включения или отключения источника или приемника энергии, при обрывах в цепи, при коротких замыканиях отдельных участков или же при прикосновении человека к одной из фаз электрической цепи.

Для анализа опасности поражения электрически током в переходном режиме составим однолинейную схему замещения сети с резистивным заземлением нейтрали, которая приведена на рисунке 18.

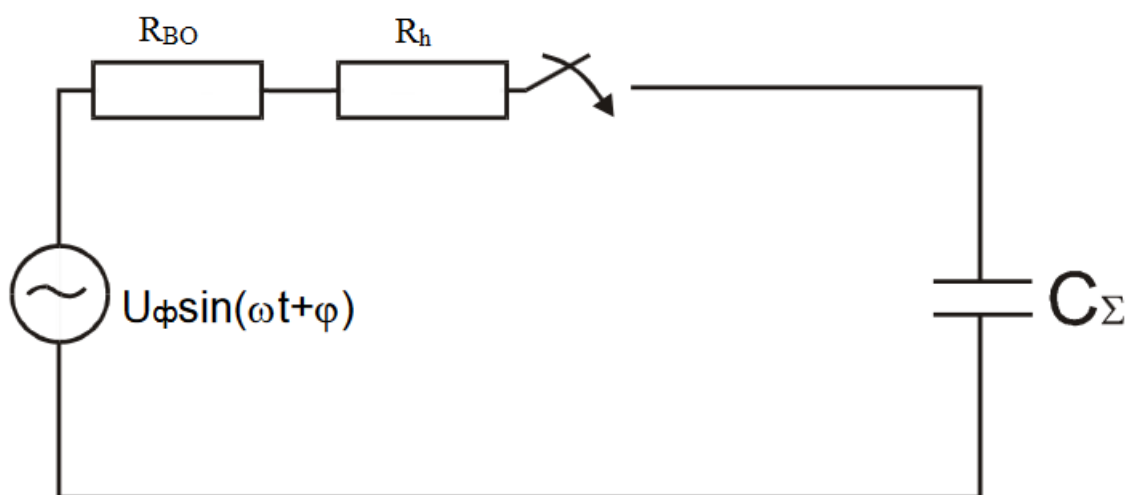


Рисунок 18 – схема замещения сети с резистивным заземлением нейтрали

На рисунке 18 представлено:

$U_{\phi} \sin(\omega t + \varphi)$ – напряжение источника переменного тока, В;

R_{BO} – сопротивление заземления нейтрали сети, Ом;

R_h – сопротивление тела человека, Ом;

C_{Σ} – суммарная емкость относительно земли, мкФ.

Уравнение переходного процесса для этой схемы замещения запишется в виде:

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{Z} (\sin \omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_{\phi}}{R_h} \sin \varphi \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \quad (14)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega C_{\Sigma} R_{h_3}}, \quad (16)$$

$$\tau = R_{h_3} C_{\Sigma}, \quad (17)$$

$$R_{h_3} = R_{BO} + R_h, \quad (18)$$

$$Z = \sqrt{R_{h_3}^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{\Sigma}^2}}. \quad (19)$$

ω – круговая частота напряжения сети;

ψ – начальная фаза напряжения сети;

τ – время переходного процесса;

φ – фазовый сдвиг между напряжением и током в сети.

По завершении переходного процесса [$t = (3-4)\tau$] уравнение примет вид:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} = \frac{R_h}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{X_C}{3}\right)^2}}. \quad (20)$$

Современная аппаратура защиты на электроустановках рассчитана на время контакта человека с проводом до 0,2 секунд, а дальше должно срабатывать защитное отключение. Примем суммарную емкость относительно земли (C_{Σ}) 9 мкФ, сопротивление тела человека (R_h) 1000 Ом, сопротивление заземления нейтрали (R_{BO}) 1000 Ом и начальную фазу напряжения сети (ψ) равной нулю. Тогда зависимость тока, протекающего через тело человека, от времени срабатывания защиты будет выглядеть так, как показано на рисунке 19.

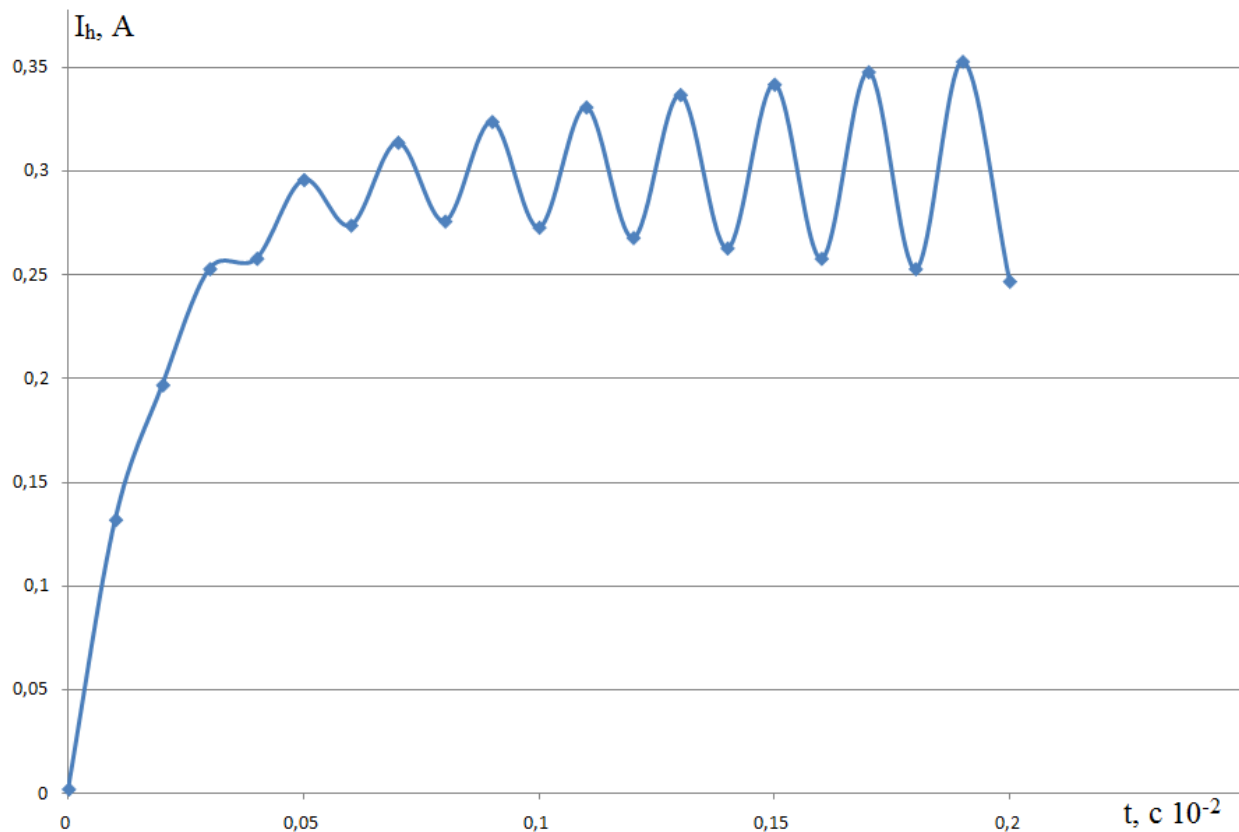


Рисунок 19 – зависимость тока, протекающего через тело человека от времени

5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в предыдущих главах результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1) При наличии защитного заземления и нормальном его состоянии ток, протекающий через тело человека, будет находится в допустимых пределах;
- 2) При нарушении непрерывности цепи заземления электроприемника, которого касается работник, ток, протекающий через него, существенно возрастает и определяется сопротивлением изолирующего основания, на котором стоит человек;
- 3) В переходном режиме в начальный момент времени ток через тело человека, определяется активным сопротивлением цепи замыкания, в установившемся режиме – наблюдается снижение тока, протекающего через тело человека, в течение времени срабатывания аппарата защиты.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе данной работы были рассмотрены режимы нейтрали, используемые в электрических сетях напряжением 6–35 кВ, рассмотрена работа этих сетей в нормальном и аварийных режимах, определены достоинства и недостатки каждой из них.

Была разработана компьютерная модель электрической сети с резистивным заземлением нейтрали в программе MATLAB с пакетом расширений Simulink, которая может быть использована для дальнейших исследований.

А также был проведен анализ опасности поражения током в установившемся и переходном режиме при прикосновении человека к проводу одной из фаз, установлены зависимости между током, протекающим через тело человека, и сопротивлением изолирующего основания (пола) в установившемся режиме и зависимость между током через тело человека и временем протекания тока через человека в переходном процессе. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- 1) При наличии защитного заземления и нормальном его состоянии ток, протекающий через тело человека, будет находится в допустимых пределах;
- 2) При нарушении непрерывности цепи заземления электроприемника, которого касается работник, ток, протекающий через него, существенно возрастает и определяется сопротивлением изолирующего основания, на котором стоит человек;
- 3) В переходном режиме в начальный момент времени ток через тело человека, определяется активным сопротивлением цепи замыкания, в установившемся режиме – наблюдается снижение тока, протекающего через тело человека, в течение времени срабатывания аппарата защиты.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 12.1.038-82. – Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. – М.:Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) 7-ое издание (утв. приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204).
3. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий / В.И. Серов, В.И. Шуцкий, Б.М. Ягудаев. – М.: Наука, 1985. – 135 с.
4. Влияние способа заземления нейтрали сети собственных нужд блока 500 МВт на перенапряжения и работу релейной защиты / В.А. Зильберман, И.М. Эпштейн, Л.С. Петрищев, Г.Г. Рождественский // Серия «Электричество». – 1987. – Вып. 12. – С. 52–56.
5. Титенков, С.С. Режимы заземления в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С.С. Титенков // Журнал энергоэксперт – 2010 г. – Вып. 2 – 17 с.
6. Основы электробезопасности: учебное пособие к лабораторным работам / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, И.С. Скуртова, А.Б. Тряпицын. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 85 с.
7. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.
8. IEEE Std 142-1991. Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems.
9. Дьяконов, В.П. MATLAB R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7/ Основы применения / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.
10. Моделирование работы электрических схем в Simulink. Применение операционных усилителей для фильтрации, усиления и генерации сигналов / М.А. Павлейно, В.М. Ромаданов, Ю.Ф. Сафронова, А.А. Статуя – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 210 с.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

11. Хлопова, А.В. Компьютерная модель для исследования режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 кв / А.В. Хлопова, А.М. Ершов – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – 10 с.

12. Сидоров, А.И. Обоснование параметров заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления / Сидоров А.И., Ш.С. Саъдуллозода – Душанбэ: «Промэкспо», 2019. 124 с.

					20.03.01.2019.375 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44