

*Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети,
электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.02 «Современная концепция
электробезопасности и способы ее обеспечения»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

**Направление подготовки (специальность): 13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника»**

**Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи,
их режимы, устойчивость и надежность»**

Уровень высшего образования: магистратура

Нормативный срок обучения: 2 года

Форма обучения: очная

Год набора: 2022

Смоленск

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети,
электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.02 «Современная концепция
электробезопасности и способы ее обеспечения»



Методические материалы составил:

к.т.н., доц. Андреев Е.С.

подпись

ФИО

« 27 » сентября 2021 г.

Заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы»:

к.т.н., доцент Р.В. Солопов

подпись

ФИО

« 08 » октября 2021 г.

*Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети,
электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.02 «Современная концепция
электробезопасности и способы ее обеспечения»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**Методическое обеспечение лекций и самостоятельного изучения
дополнительных разделов по дисциплине**

**СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И
СПОСОБЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

(НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

Смоленск

Тема 1 Определения электробезопасности, критерии электробезопасности и способы ее обеспечения. По международной классификации СЭС.

Цели и задачи лекции: усвоить понятие электробезопасность и современную базу по электробезопасности. Знать современную концепцию электробезопасности и способы ее обеспечения, и знать международную классификацию СЭС.

В лекции дается определение электробезопасности и приводятся шаги энергетического сообщества по созданию СЭС отвечающих международным требованиям в вопросах обеспечения электробезопасности. Рассматриваются критерии электробезопасности, установленные безопасные уровни токов и напряжений прикосновения к токоведущей части находящейся под напряжением и рассматриваются защиты обеспечивающие электробезопасность, которые разбиты на 3 уровня и приводятся описания сути этих защит.

Тема 2 Характеристика мер и защит, обеспечивающих электробезопасность

Цели и задачи лекции: четко уяснить принцип осуществления защиты от поражения электрическим током человека как при нормальном состоянии СЭС так и при отказе этой защиты. Дается характеристика второго уровня защит, работающих при повреждении основной защиты и знать третий уровень защиты, определяемый как дополнительная защита, обеспечивающая защиту человека даже при прямом прикосновении к токоведущим частям.

Тема 3 Устройство третьего уровня защиты электрооборудования (УЗО)

Цели и задачи лекции: изучить принципы выполнения защит от прямого прикосновения к токоведущим частям и знать устройство элементов этих защит и область их применения.

Здесь рассматриваются дифференцированные защиты типа УЗО реагирующие на появление тока утечки на землю при появлении цепи человека шунтирующего сопротивление изоляции электроустановки, а также защита осуществляющая контроль величины сопротивления изоляции, снижение которой может вызвать появление потенциала ЭУ относительно земли или при шунтировании сопротивления изоляции относительно малым сопротивлением тела человека.

Излагаются методы расчета уставок таких защит и эффективности такой защиты на устройстве УЗО.

Тема 4 «Выполнение заземления сетей и ЭУ и требования к ним. Устройство и расчет этих цепей и их эффективность».

Цели и задачи лекции: Знать нормативные требования по устройству цепей заземления, по нормированию сопротивления (или сечения) защитных проводников в зависимости от сечения провода линии при выполнении ими различных функций в системе TNС и TN-S по международной характеристике. Освоить методику расчетов и параметров цепи заземления.

В лекции даются материалы по устройству цепи заземления (зануления) и требования отечественных нормативных документов (ПУЭ) и международных стандартов (МЭК). Четко определяется, что использовать в качестве заземляющих проводников для ЛЭП и кабелей. Порядок определения эффективности защиты человека с использованием заземляющих устройств и защиты сетей и ЭП. Поясняется как учитывается проводимость сторонних проводящих частей (СПЧ) и других естественных заземлений. Рассматривается устройство заземлителей ЭУ и сетевых заземлителей и их расчет.

Тема 6: «Устройство системы зануления и выравнивания потенциалов»

Цели и задачи лекции: Уяснить понятие выравнивания потенциалов, способы устройства и требования к выполнению. Освоить методику расчета цепей выравнивания потенциалов.

В данной лекции рассматриваются явления связанные с протеканием тока в землю с главного заземлителя и распределением потенциалов на поверхности земли. Показано как можно уравнивать потенциал на какой-либо площади помещения и области пространства. Рассматриваются методы расчета потенциалов при выравнивании потенциалов и оценка ее эффективности.

*Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети,
электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.02 «Современная концепция
электробезопасности и способы ее обеспечения»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине

**СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И
СПОСОБЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

(НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

Смоленск

Упражнение 1

Тема занятия: Исследование простых групповых заземлителей.

Цели и задачи занятий:

Изучить влияние изменения геометрических размеров и взаимной ориентации составляющих группового заземлителя на его электрические параметры.

1. Определить потенциал группового заземлителя $\varphi_{гр}$ и коэффициент использования его проводимости η для заданных параметров.
2. Рассчитать согласно предложенным вариантам зависимости коэффициента использования от формы, размеров и размещения электродов, а также количества электродов и расстояния между соседними электродами.
3. Построить графики полученных зависимостей.
4. Произвести анализ графиков и сделать выводы.
5. Оформить отчет о проделанной работе.

Условия задания

Ток $I_з$ стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из трех соединенных между собой одинаковых стержневых электродов диаметром d . Стержни забиты в землю на глубину L и размещены в вершинах равностороннего треугольника, земля однородная, ее удельное сопротивление ρ .

Варианты исходных данных

№ по журналу	$I_з, А$	$d, м$	$L, м$	$\rho, Ом м$	$S, м$
1-5	35	0,010..0,05	1,5	100	3
6-10	40	0,040	1,5..5,0	100	2
11-15	45	0,045	2	20..400	1
16-20	50	0,050	3	100	2..50

Методические рекомендации

Поскольку электроды группового заземлителя связаны между собой электрически, они имеют одинаковый потенциал, являющийся потенциалом группового заземлителя $\varphi_{гр}$. Следовательно, потенциал каждого электрода группового заземлителя состоит из собственного потенциала, обусловленного стеканием через него тока, и потенциалов, наведенных другими электродами:

$$\varphi_{гр} = \varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_n$$

Где $\varphi_{01} = I_1 R_1$ - собственный потенциал первого электрода, В; I_1 – ток стекающий через этот электрод в землю; R_1 – сопротивление его растеканию, Ом; n – количество электродов в групповом заземлителе; $\varphi_{гр}$ – потенциал, наведенный на первом электроде одним из соседних, В, который определяется из уравнения потенциальной кривой этого соседнего электрода с учетом расстояния между электродами.

При очень больших расстояниях между электродами группового заземлителя (более 40 м) сопротивление всей группы заземляющих электродов R_{∞} , Ом, описывается равенством:

$$R_{\infty} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_0}}$$

Если электроды одинаковы, а следовательно, одинаковы и их сопротивления растеканию R_0 , то сопротивление группового заземлителя, Ом, будет равно

$$R_{\infty} = \frac{R_0}{n}$$

При расстояниях между электродами меньше 40 м происходит взаимодействие полей растекания тока, в результате чего на общих участках земли, по которым проходят токи, стекающие с нескольких электродов, увеличивается плотность тока, и, следовательно, на этих участках возрастает падение напряжения. Это явление, равноценное уменьшению сечения земли, по которому проходит ток от заземлителя, приводит к увеличению сопротивления растеканию как отдельных электродов, составляющих групповой заземлитель, так и заземлителя в целом. Иначе говоря, при уменьшении расстояния между электродами до 40 м и менее сопротивление группового заземлителя увеличивается, а проводимость соответственно уменьшается, что может быть представлено следующими соотношениями:

$$R_{zp} = \frac{R_{\infty}}{\eta}; \frac{1}{R_{zp}} = \eta \frac{1}{R_{\infty}}$$

Где $R_{гр}$ – действительное значение сопротивления растеканию группового заземлителя при данном размещении его электродов, Ом; R_{∞} - наименьшее значение сопротивления растеканию тока группового заземлителя, т.е. при расстояниях между его электродами более 40 м, Ом; η – коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости заземлителей и называемый коэффициентом использования проводимости группового заземлителя или просто коэффициентом использования.

Таким образом, сопротивление группового заземлителя, Ом, в общем случае описывается уравнением

$$R_{zp} = \frac{1}{\eta \sum_1^n \frac{1}{R_0}}$$

Пример решения

Исходные данные

№ по журналу	I_3, A	$d, м$	$L, м$	$\rho, Ом м$	$S, м$
0	60	0,05	2	100	2

Потенциал группового заземлителя:

$$\varphi_{зп} = \varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_n$$

Если три одинаковых электрода размещены в вершинах равностороннего треугольника, то потенциал группового заземлителя можно рассчитать:

$$\varphi_{зп} = \varphi_0 + (n-1)\varphi_n$$

Так как электроды одинаковы и находятся в одинаковых условиях, у них равны:

токи, стекающие через них в землю:

$$I_0 = \frac{I_3}{n} = \frac{60}{3} = 20 A$$

сопротивления растеканию тока:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \ln \frac{4 \cdot 2}{0,05} = 40,4 Ом$$

собственные потенциалы:

$$\varphi_0 = I_0 R_0 = 20 \cdot 40,4 = 808 В$$

Уравнение потенциальной кривой для стержневого вертикального заземлителя круглого сечения с диаметром d ; длиной l :

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}$$

Потенциал φ_n , наведенный на первом электроде одним из соседних – одинаков для всех электродов:

При $S=2$

$$\varphi_n = \frac{20 \cdot 100}{2\pi \cdot 2} \ln \frac{\sqrt{4+4}+2}{2} = 140,3 В$$

При $S=10$

$$\varphi_n = \frac{20 \cdot 100}{2\pi \cdot 2} \ln \frac{\sqrt{100+4}+2}{10} = 31,6 В$$

Определим потенциал группового заземлителя:

$$\varphi_{зп} = 808 + (3-1)140,3 = 1088,6 В$$

Определим η – коэффициент использования группового заземлителя:

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Электроэнергетические системы, сети,
электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.02 «Современная концепция
электробезопасности и способы ее обеспечения»



$$\eta = \frac{R_{\infty}}{R_{zp}} = \frac{\varphi_{\infty}}{\varphi_{zp}}$$

где $\varphi_{\infty} = \varphi_0$ – потенциал группового заземлителя при бесконечно больших расстояниях между электродами равен собственному потенциалу любого электрода, так как каждый из них находится вне полей растекания тока с других электродов.

$$\eta = \frac{\varphi_{\infty}}{\varphi_{zp}} = \frac{808}{1088,6} = 0,74$$

Упражнение 2

Тема занятия: Анализ эффективности защит в системах TN-C; TN-S

Цели и задачи занятия: Произвести расчет значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения для трехфазной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ типа TN-C; TN-S (рис). Затем оценить действие установленной в данной сети защиты и сделать вывод о возможном исходе ее срабатывания.

Методические рекомендации

Для трехфазной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ типа TN-C (рис. 1) значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения определяются фазным напряжением сети и не зависят от сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

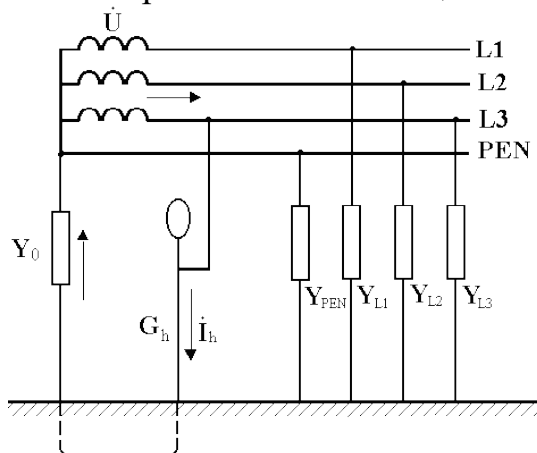


Рис. 1. Однофазное прямое прикосновение в сети с заземленной нейтралью типа TN-C при нормальном режиме работы

Действительно, проводимости фазного и нулевого проводников относительно земли по сравнению с $U_0 = 1/R_0$ проводимостью заземления нейтрали малы ($U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} \ll U_0$). При этом выражение для тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазному проводу при нормальном режиме работы сети TN-C (рис. 1), принимает вид:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R_0}, \quad (1)$$

где R_0 - сопротивление рабочего заземления нейтрали.

Напряжение прикосновения в этом случае определяется из уравнения:

$$U_h = \frac{UR_h}{R_h + R_0}, \quad (2)$$

Так как обычно $R_0 \ll R_h$, то можно считать, что человек в этом случае попадает практически под фазное напряжение сети.

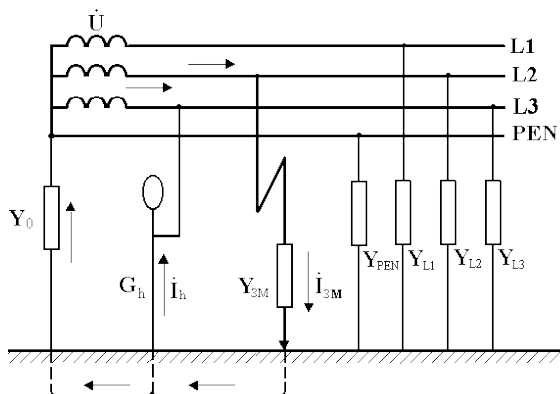


Рис. 2. Прикосновение к исправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа TN-C при аварийном режиме работы

При аварийном режиме, когда один из фазных проводов сети, например, провод $L2$ (рис. 2), замкнут на землю через относительно малое активное сопротивление R_{3M} , а человек прикасается к исправному фазному проводу, уравнение напряжения имеет следующий вид:

$$\dot{U}_h = U \frac{Y_{3M}(1-a) + Y_0}{Y_{3M} + Y_0 + Y_h}.$$

Здесь учтено, что Y_{L1} , Y_{L2} и Y_{PEN} малы по сравнению с Y_0 , а Y_{L3} – по сравнению с Y_0 и Y_{3M} , т.е. ими можно пренебречь и считать равными нулю.

С учетом того, что

$$Y_{3M} = \frac{1}{R_{3M}}; \quad Y_0 = \frac{1}{R_0}; \quad Y_h = \frac{1}{R_h}, \quad a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

напряжение прикосновения в действительной форме имеет вид

$$U_h = UR_h \frac{\sqrt{R_{3M}^2 + 3R_{3M}R_0 + (R_0\sqrt{3})^2}}{R_{3M}R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}.$$

Учитывая, что

$$3R_{3M}R_0 \approx 2\sqrt{3}R_{3M}R_0,$$

предыдущее выражение можно записать как

$$U_h = UR_h \frac{R_{3M} + R_0\sqrt{3}}{R_{3M}R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}. \quad (3)$$

При этом выражение для определения тока через тело человека имеет вид

$$I_h = U \frac{R_{3M} + R_0\sqrt{3}}{R_{3M}R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}. \quad (4)$$

Рассмотрим два характерных случая.

1. Если принять, что сопротивление замыкания фазного провода на землю $R_{зм}$ равно нулю, то напряжение прикосновения

$$U_h = U\sqrt{3} \quad (5)$$

Следовательно, в данном случае человек окажется практически под воздействием линейного напряжения сети.

2. Если принять равным нулю сопротивлению заземления нейтрали R_0 , то

$$U_h = U,$$

т.е. напряжение под которым окажется человек, будет практически равно фазному напряжению.

Однако в реальных условиях сопротивления $R_{зм}$ и R_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, т.е. напряжение прикосновения U_h всегда меньше линейного, но больше фазного, то есть

$$U\sqrt{3} > U_h > U \quad (6)$$

С учетом того, что всегда $R_{зм} > R_0$, напряжение прикосновения U_h в большинстве случаев незначительно превышает значение фазного напряжения, что менее опасно для человека, чем в аналогичной ситуации в сети типа IT.

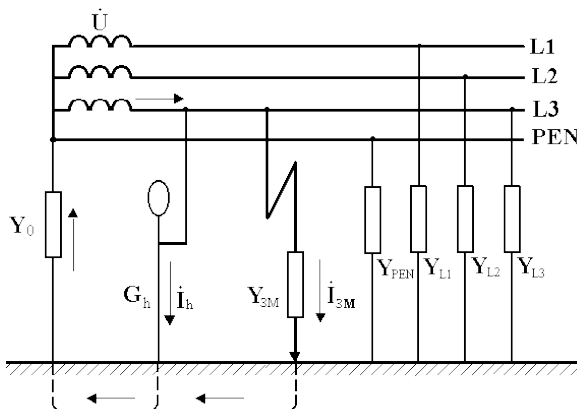


Рис. 3 Прикосновение к неисправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа TN-C при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа TN-C, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (рис. 3); человек касается фазного провода L3) ток через тело человека будет определяться, также, как и в сети типа IT, падением напряжения на сопротивлениях растеканию тока в месте замыкания на землю $R_{зм}$:

$$I_h = \frac{I_{зм} R_{зм}}{R_h} \cdot \alpha_1 \alpha_2, \quad (7)$$

где I_{3M} - ток замыкания на землю; a_1, a_2 - коэффициенты напряжения прикосновения.

При $a_1 = a_2 = 1$

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h},$$

Ток замыкания на землю в сети TN-C зависит только от сопротивления растеканию тока R_{3M} , сопротивления заземления нейтрали R_0 и сопротивления тела человека R_h . Если принять во внимание, что обычно $R_{3M} \ll R_h$, то

$$I_{3M} = \frac{U}{(R_{3M} + R_0)}.$$

В этом случае напряжение прикосновения лишь незначительно отличается от значения фазного напряжения.

Таким образом, прикосновение к неисправному фазному проводу (замкнувшемуся на землю) в сети TN-C практически также опасно, как к исправному. Значение тока, протекающего через тело человека, в этом случае почти такое же, как при прямом однофазном прикосновении в нормальном режиме работы в сети TN-C.

Пример решения задачи

В сети напряжением 380/220 В, 50 Гц с заземленной нейтралью типа TN-C произошло замыкание на землю фазного провода, при этом: $R_{3M} = 18 \text{ Ом}$; $R_0 = 4 \text{ Ом}$; $R_h = 1 \text{ кОм}$.

Какой ток протекает через тело человека при прикосновении к поврежденной фазе, если человек находится на расстоянии 40 м от места замыкания на землю?

Схема, соответствующая условию задачи, приведена на рис. 3.

Решение:

1. Рассчитаем ток замыкания на землю по формуле:

$$I_{3M} = \frac{U}{(R_{3M} + R_0)},$$
$$I_{3M} = \frac{220}{18 + 4} = 10 \text{ А}.$$

При этом учтено, что R_h и R_{3M} включены параллельно и $R_h \gg R_{3M}$.

2. Определим напряжение поврежденного фазного провода относительно земли по формуле:

$$U_{3M} = I_{3M} * R_{3M},$$
$$U_{3M} = 10 * 18 = 180 \text{ В}.$$

3. Рассчитаем ток через тело человека по формуле:

$$I_h = \frac{U_{зм}}{R_h} \alpha_1 \alpha_2$$

Так как человек находится на расстоянии 40 м от места замыкания на землю, $a_1 = a_2 = 1$ и

$$I_h = \frac{U_{зм}}{R_h},$$

$$I_h = \frac{180}{1} = 180 \text{ мА}$$

Ответ задачи: $I_h = 180 \text{ мА}$ - справедлив в том случае, когда человек стоит вне зоны растекания тока с поврежденного провода.

Упражнение 3

Тема занятия: Анализ эффективности защиты в сетях ТТ и IT.

Цели и задачи занятий: Произвести расчет значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения для трехфазной сети с изолированной нейтралью типа ТТ и IT. Затем оценить действие установленной в данной сети защиты и сделать вывод о возможном исходе ее срабатывания.

Методические рекомендации

Для трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью типа IT, напряжением до 1 кВ (рис. 1)

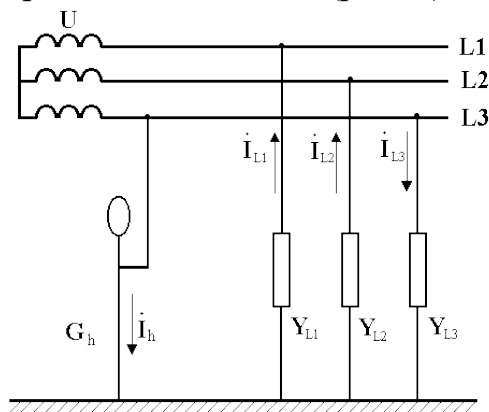


Рис. 1 Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа IT при нормальном режиме работы

характерным является то, что при однофазном прикосновении значение тока, проходящего через тело человека при нормальном режиме работы сети, тем меньше, чем меньше рабочее напряжение сети (фазное напряжение) и чем больше значение сопротивления изоляции проводов относительно земли. Действительно, ток через тело человека и напряжение прикосновения описываются следующими выражениями, полученными при условии, что $Y_0 = 0$; $Y_{PEN} = 0$:

$$\dot{i}_k = U G_h \frac{Y_{L2}(1-a^2) + Y_{L3}(1-a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h}, \quad \dot{U}_k = U \frac{Y_{L2}(1-a^2) + Y_{L3}(1-a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h}, \quad (1)$$

где Y_{L1} , Y_{L2} , Y_{L3} - полные проводимости изоляции фазных проводов относительно земли в комплексной форме:

$$Y_{L1} = \frac{1}{R_{L1}} + j\omega C_{L1}; \quad Y_{L2} = \frac{1}{R_{L2}} + j\omega C_{L2}; \quad Y_{L3} = \frac{1}{R_{L3}} + j\omega C_{L3};$$

U - действующее значение фазного напряжения сети;

$G_h = \frac{1}{R_h}$ - проводимость тела человека;

a - фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз.

При равенстве проводимостей фазных проводов относительно земли $Y_{L1} = Y_{L2} = Y_{L3} = Y$ (т.е. при равенстве сопротивлений изоляции и емкостей фазных проводов относительно земли $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$ и $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C$), ток через тело человека и напряжение прикосновения определяется:

$$\dot{I}_h = U G_h \frac{3Y}{3Y + G_h}; \quad (2)$$

или

$$\dot{I}_h = \frac{U}{R_h + Z/3}, \quad (3)$$

где Z - полное сопротивление фазного провода относительно земли в комплексной форме

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}, \quad (4)$$

R - активное сопротивление изоляции фазного провода относительно земли; C - емкость фазного провода относительно земли.

В действительной форме этот ток равен

$$I_h = \frac{U}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R(R+6R_h)}{9R_h^2(1+R^2\omega^2C^2)}}}. \quad (5)$$

При равенстве сопротивлений изоляции фазных проводов относительно земли $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$ и отсутствии емкостей, т.е. $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C = 0$, выражение (5) упрощается

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3}.$$

Таким образом, в сетях с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы опасность для человека при прямом однофазном прикосновении зависит от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли. С увеличением сопротивления изоляции и уменьшением емкости фазных проводов относительно земли опасность уменьшается. Этот вывод иллюстрируется графиками зависимости $I_h = f(R)$ при $C = 0$ (что может иметь место в коротких сетях) и $I_h = f(C)$ при $R = \text{const}$, представленными на рис. 2.

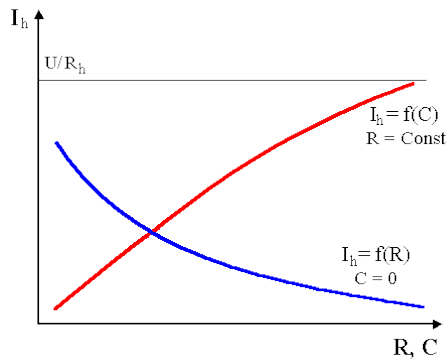


Рис. 2. Зависимость значения тока, протекающего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу в сети IT с симметричными параметрами в нормальном режиме работы, от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли

При аварийном режиме работы сети (рис.3), когда один из фазных проводов, например, провод L2, замкнулся на землю, опасность поражения током человека, прикоснувшегося к исправному фазному проводу, значительно возрастает.

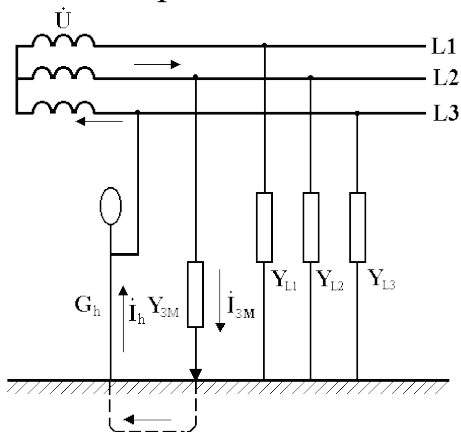


Рис. 3 Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

В этом случае ток через тело человека будет равен:

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h + R_{3M}}, \quad (6)$$

где R_{3M} - сопротивление растеканию тока в месте замыкания фазного провода на землю (на рис.3 - фазного провода L2).

Так как обычно выполняется условие $R_{3M} \ll R_h$, то:

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h}; \quad U_h = U\sqrt{3}. \quad (7)$$

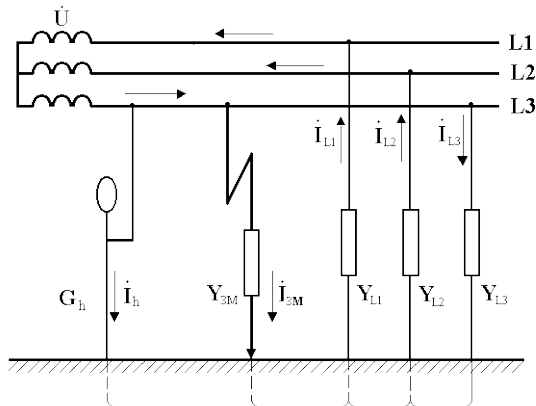


Рис. 4. Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа IT, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (рис. 4; человек касается фазного провода L3) ток через тело человека будет определяться падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю R_{3M} :

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h} \cdot a_1 a_2, \quad (8)$$

где I_{3M} - ток замыкания на землю; a_1, a_2 - коэффициенты напряжения прикосновения.

При $a_1 = a_2 = 1$

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h},$$

Ток замыкания на землю в сети IT зависит от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли, сопротивления растеканию R_{3M} , R_h . Если принять во внимание, что обычно $R_{3M} \ll R_h$, то

$$I_{3M} = \frac{U}{(R_{3M} + Z/3)}.$$

В действительности ток замыкания на землю будет меньше, что более безопасно для человека.

Таким образом, прикосновение к неисправному фазному проводу (замкнувшемуся на землю) в сети IT значительно менее опасно, чем к исправному. Значение тока, протекающего через тело человека, в этом случае меньше, чем при прямом однофазном прикосновении в нормальном режиме работы.

Пример решения

Человек прикоснулся к фазному проводу сети типа IT при нормальном режиме работы. Определить ток, протекающий через тело человека I_h для двух случаев:

- 1) $U = 220$ В, $R_h = 1$ кОм; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = 0$; $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 30$ кОм.

2) $U=220$ В, $R_h=1$ кОм; $C_{L1}=C_{L2}=C_{L3}=\infty$; $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}=R=30$ кОм
Схема, соответствующая условию задачи, приведена на рис. 1

Решение:

1. Рассчитаем ток, протекающий через тело человека в первом случае,
по формуле:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3} \quad I_h = \frac{220}{1 + 30/3} = 20 \text{ мА}$$

2. Во втором случае ток, протекающий через тело человека,
определяется по формуле:

$$\dot{I}_h = \frac{U}{R_h + Z/3}, \quad Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}$$

С учетом того, что при $C_{L1}=C_{L2}=C_{L3}=\infty$ $Z=0$

$$I_h = \frac{U}{R_h} = \frac{220}{1} = 220 \text{ мА}$$

Ответ задачи: 1) 20 мА; 2) 220 мА.

Упражнение 4

Тема занятий: Расчет заземляющего устройства ТП 10/04.

Цели и задачи занятий: произвести практические расчеты и проанализировать типовые варианты заземляющих устройств трансформаторной подстанции.

Пользуясь информационными и методическим материалами ОАО «РОСЭП» для проектирования заземляющего устройства ТП, по указанию преподавателя принять схему ЗУ и рассчитать его параметры. По результатам расчетов необходима дать критическую оценку полученных значений.

Пример решения.

Рассчитать сопротивление заземляющего устройства КТПП 10/0,4 кВ проходного типа с ВЛ 0,38 кВ (более 2-х) показанного на рисунке.

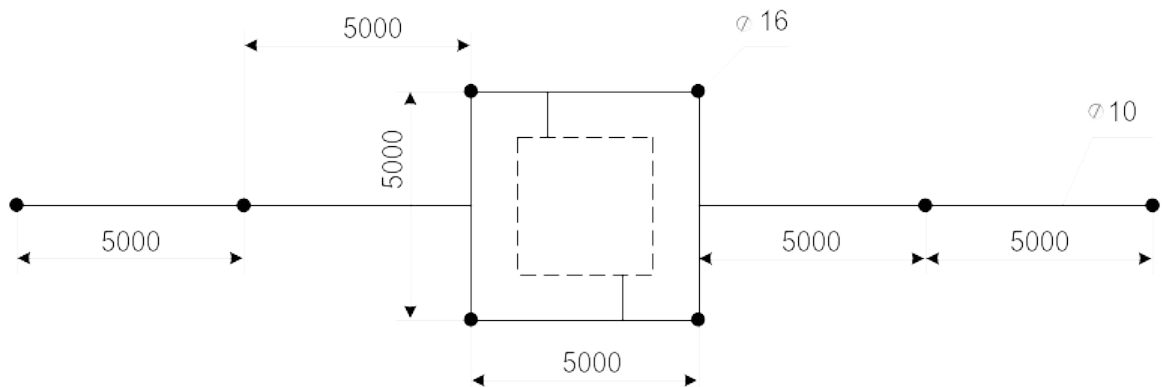


Рис. 1. Схема ЗУ КТПП 10/0,4 кВ.

Эквивалентное сопротивление грунта $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение.

Расчетное сопротивление земли с учетом сезонного изменения сопротивления для I климатической зоны $K_c = 1,35$ для вертикальных электродов $l = 5 \text{ м}$.

$$\rho_g = 1,35 \cdot \rho = 1,35 \cdot 100 = 135 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Для горизонтальных электродов при глубине залегания $H = 0,7 \text{ м}$, $K_c = 5$.

$$\rho_z = 5 \cdot \rho = 5 \cdot 100 = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Периметр горизонтальных электродов, соединенных в контур равен 20 м. Длина электродов лучевых заземлителей 10 и 10 м. Вертикальные электроды заглублены так, что верхние концы их заглублены на $H_0 = 0,7 \text{ м}$ от поверхности земли, тогда $H = H_0 + \frac{1}{2} \cdot l = 0,7 + 2,5 = 3,2 \text{ м}$.

Определим сопротивление заземлителей.

а) горизонтального электрода (контур)

$$r_{\text{эк}} = \frac{\rho_z}{3 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot H} = \frac{500}{3 \cdot \pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20^2}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 29,1 \text{ Ом}$$

б) горизонтальных электродов (лучи)

$$r_{\text{эл1}} = r_{\text{эл2}} = \frac{\rho_z}{3 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot H} = \frac{500}{3 \cdot \pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10^2}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 50,8 \text{ Ом}$$

в) вертикального электрода

$$r_e = \frac{\rho_e}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot H + 1}{4 \cdot H - 1} \right) = \frac{135}{2 \cdot \pi \cdot 5} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot 5}{16 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 3,2 + 1}{4 \cdot 3,2 - 1} \right) = 31,0 \text{ Ом}$$

31,0 Ом

Уточняем сопротивление вертикальных и горизонтальных электродов с учетом их коэффициента использования.

Коэффициент использования соединительных электродов в контуре из вертикальных электродов при числе вертикальных электродов $n_v = 4$ и отношении длины электродов к расстоянию между ними $l/a = 5/5 = 1$: $\eta_{\text{зк}} = 0,45$, тогда:

$$R_{\text{зк}} = \frac{r_{\text{зк}}}{\eta_{\text{зк}}} = \frac{29,1}{0,45} = 64,67 \text{ Ом}.$$

Для лучевых заземлителей коэффициент использования $\eta_l = 0,95$ при длине 10 м.

$$R_{\text{эл1}} = R_{\text{эл2}} = \frac{r_{\text{эл1}}}{\eta_l} = \frac{50,8}{0,95} = 53,5 \text{ Ом}.$$

$$R_{\Sigma \text{эл}} = \frac{R_{\text{эл1}} \cdot R_{\text{эл2}}}{R_{\text{эл1}} + R_{\text{эл2}}} = \frac{53,5 \cdot 53,5}{53,5 + 53,5} = 26,75 \text{ Ом}$$

$$R_z = \frac{R_{\text{зк}} \cdot R_{\Sigma \text{эл}}}{R_{\text{зк}} + R_{\Sigma \text{эл}}} = \frac{64,67 \cdot 26,75}{64,67 + 26,75} = 18,92 \text{ Ом}$$

Коэффициент использования вертикальных электродов в контуре при их числе $n_v = 4$ и отношении длины электродов к расстоянию между ними $l/a = 5/5 = 1$: $\eta_{\text{вк}} = 0,7$; коэффициент использования вертикальных электродов размещенных в ряд при их числе $n_{\text{вр}} = 2$ и отношении $l/a = 5/5 = 1$: $\eta_{\text{вр1}} = 0,85$; тогда:

$$R_e = \frac{r_e}{n \cdot \eta_{\text{вк}} + n \cdot \eta_{\text{вр1}} + n \cdot \eta_{\text{вр2}}} = \frac{31}{4 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,85 + 2 \cdot 0,85} = 5 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление заземляющего устройства

$$R_3 = \frac{R_z \cdot R_e}{R_z + R_e} = \frac{18,92 \cdot 5}{18,92 + 5} = 3,95 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

Что удовлетворяет требованиям ПУЭ для ТП данного типа.

Упражнение 5

Тема занятия: Выбор схемы и элементов измерительного комплекса системы учета электроэнергии (СУЭ). Оценка схемных погрешностей измерительного комплекса при учете реактивной мощности.

Цели и задачи занятия: изучить основные принципы построения СУЭ. Оценить погрешность учета реактивной энергии при несимметрии нагрузки

Система учета электроэнергии – это совокупность измерительных комплексов на энергообъекте.

В состав измерительного комплекса в качестве технических средств могут входить:

- счетчики электрической энергии (индукционные, электронные);
- измерительные трансформаторы тока (ТТ);
- измерительные трансформаторы напряжения (ТН);
- линии присоединения счетчиков к ТН и ТТ.

При этом измерение объемов электрической энергии осуществляется по следующей схеме: первичные преобразователи (ТТ и ТН) преобразуют ток и напряжение сети в удобную для измерения форму, к которым подключаются счетчики электрической энергии по всем вводам потребителя. Следует отметить, что большая часть потребителей (бытовой сектор, мелкопромышленные предприятия) обходятся без первичных преобразователей и сумматоров, а измерения осуществляется прямым непосредственным подключением счетчиков в сеть.

Система учета создается посредством линий связи через сумматор происходит объединение всех измерительных комплексов в единую систему.

По линиям связи информация об объемах измеренной электроэнергии (мощности) от отдельных измерительных комплексов или счетчиков может передаваться в центральный узел контроля и учета электроэнергии (диспетчеру). Таким образом организуется автоматизированная система контроля и учета электропотребления – АСКУЭ.

Реактивную мощность и энергию можно измерить специальными счетчиками реактивной энергии.

В настоящее время для измерения и учета реактивной энергии применяются следующие счетчики реактивной энергии:

- трехэлементные счетчики с 90-градусным сдвигом (начальный сдвиг между токами и напряжениями)
- двухэлементные с дифференциальным включением токовых цепей с 90-градусным сдвигом
- двухэлементные с 60-градусным сдвигом

Эти счетчики рассчитаны для применения в цепях при простой асимметрии (т.е. для условий, когда звезда фазных напряжений не искажена). Это вызвано тем, что 90-градусный сдвиг осуществляется путем схемных решений, основанных на 90-градусном сдвиге между фазным U_A и линейным U_{BC} для симметричной трехфазной системы напряжений.

Измерение будет правильным только в случае, когда фазные (и следовательно, линейные) напряжения равны между собой и сдвинуты относительно друг друга на 120° , в иных случаях наступает погрешность, которую часто называют **схемной погрешностью**.

Наибольшую схемную погрешность приближенно можно оценить выражением

$$\Delta W_{Q_{max}} \approx \frac{2 \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_U}{\sin \varphi_{CP}} \cdot 100\%,$$

где $\varepsilon_U - \delta$ степень несимметрии по напряжению; $\varepsilon_T - \delta$ степень несимметрии по току.

Приближенно степень несимметрии можно определить по следующей зависимости

$$\varepsilon_n = \sqrt{2 \cdot (\delta_{12}^2 + \delta_{23}^2 + \delta_{31}^2)} / 3,$$

где

$$\delta_{12} = \frac{U_{AB} - U_{CP}}{U_{CP}}; \delta_{23} = \frac{U_{BC} - U_{CP}}{U_{CP}}; \delta_{31} = \frac{U_{CA} - U_{CP}}{U_{CP}};$$

$$U_{CP} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}).$$

Аналогично определяется ε_T для токов, подводимых к счетчику.

Пример: Оценить погрешность учета реактивной энергии для тяговой подстанции переменного тока при следующей несимметрии нагрузки:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{CA} = 90 : 105 : 105 \text{ и } I_A : I_B : I_C = 100 : 100 : 0;$$

Средний $\cos \varphi_{CP}$ принимаем 0,8 ($\sin \varphi_{CP} = 0,6$).

Решение: 1. Определим среднее линейное напряжение:

$$U_{CP} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) = \frac{1}{3} \cdot (90 + 105 + 105) = 100$$

2. Относительное отклонение напряжения от среднего:

$$\delta_{12} = \frac{U_{AB} - U_{CP}}{U_{CP}} = \frac{90 - 100}{100} = -0,1; \delta_{23} = \frac{U_{BC} - U_{CP}}{U_{CP}} = \frac{105 - 100}{100} = 0,05;$$

$$\delta_{31} = \frac{U_{CA} - U_{CP}}{U_{CP}} = \frac{105 - 100}{100} = 0,05;$$

3. Степень несимметрии напряжения по (8.6):

$$\varepsilon_n = \sqrt{2 \cdot (\delta_{12}^2 + \delta_{23}^2 + \delta_{31}^2)} / 3 = \sqrt{2 \cdot (0,1^2 + 0,05^2 + 0,05^2)} / 3 = 0,1$$

4. Определим средний ток нагрузки:

$$I_{CP} = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C) = \frac{1}{3} \cdot (100 + 100 + 0) = 67$$

5. Относительное отклонение токов от среднего:

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{100 - 67}{67} = 0,5; \delta_3 = \frac{0 - 67}{67} = -1,0$$

6. Степень несимметрии токов по (8.6):

$$\varepsilon_T = \sqrt{2 \cdot (0,5^2 + 0,5^2 + 1,0^2)} / 3 = 0,91$$

7. Наибольшая погрешность учета реактивной энергии по (2.5):

$$\Delta W_Q = \frac{2 \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_U}{\sin \varphi_{CP}} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 0,91 \cdot 0,1}{0,6} \cdot 100\% = 30,34\%$$

По ГОСТ 6570-96, схемная погрешность при разнице линейных напряжений до 10% и отсутствии тока в одной или двух фазах для счетчика класса 2 при токах от 20 до 100% номинального не должна быть выше $\pm 3,5\%$. Полученная схемная погрешность имеет не допустимо большее значение и практически исключает применение счетчиков реактивной энергии типа СРЗ (трехэлементный с 90-градусным сдвигом).

Упражнение 6

Тема занятия: Расчет погрешностей счетчиков ЭЭ от влияющих факторов и оценка недоучета электроэнергии.

Цели и задачи занятий: изучить факторы влияющие на погрешность счетчиков ЭЭ а также дать анализ возможных последствий недоучета электроэнергии.

Следует заметить, что наибольшее число факторов влияющих на погрешность приходится на счетчик электрической энергии (согласно ГОСТ их число достигает 15), поэтому необходимо учитывать, что большинство их может быть устранено при выборе условий размещения счетчиков и его конструкции, эти же условия относятся и к выбору других элементов и схема их соединения.

Расчетные формулы для вычисления относительной погрешности :

$$\delta_{w1} = \pm 1,1 \cdot \left[\delta_{c.o}^2 + \delta_{o.п}^2 + \sum_{j=1}^n \delta_j^2 \right]^{1/2}, (2.7)$$

где $\delta_{c.o}$ – основная погрешность счетчика, %; $\delta_{o.п}$ – погрешность определения разности показания счетчика, %; δ_j – дополнительная погрешность счетчика от j -й влияющей величины, %.

Упражнение 7

Тема занятия: Расчет погрешности ТТ и ТН от влияющих факторов и оценка недоучета электроэнергии.

Цели и задачи занятий: изучить факторы влияющие на погрешность ТТ и ТН, а также дать анализ возможных последствий недоучета электроэнергии.

Расчетные формулы для вычисления относительной погрешности комплексов:

. Измерительный комплекс состоит из счетчика совместно с ТТ.

Погрешность измерительного комплекса рассчитывается по формуле

$$\delta_{w2} = \pm 1,1 \cdot \left[\delta_T^2 + \delta_\theta^2 + \delta_{c.o}^2 + \delta_{o.п}^2 + \sum_{j=1}^n \delta_j^2 \right]^{1/2},$$

где δ_T – токовая погрешность ТТ, %; δ_θ – погрешность учета обусловленная угловой погрешностью ТТ, которая определяется следующими формулами:

а) для активной энергии

$$\delta_\theta = 0,029 \cdot \theta_T \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 0,029 \cdot \theta_T \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где θ_T – угловая погрешность ТТ, минуты;

б) для реактивной энергии

$$\delta_{\theta} = 0,029 \cdot \theta_T \cdot \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} = 0,029 \cdot \theta_T \cdot c \operatorname{tg} \varphi,$$

Измерительный комплекс состоит из счетчика совместно с ТТ, ТН.

Погрешность измерительного комплекса рассчитывается по следующей формуле

$$\delta_{w3} = \pm 1,1 \cdot \left[\delta_T^2 + \delta_U^2 + \delta_{\theta_T}^2 + \delta_{C.O}^2 + \delta_{O.П}^2 + \delta_L^2 + \sum_{j=1}^n \delta_j^2 \right]^{1/2},$$

где $\delta_U^2 - i$ погрешность напряжения ТН, %; $\delta_L^2 - i$ погрешность из-за потери напряжения в линии присоединения счетчика к ТН, %; $\delta_{\theta_T}^2 - i$ погрешность трансформаторной схемы подключения счетчика за счет угловых погрешностей ТТ и ТН, %, которая определяется:

а) для учета активной энергии

$$\delta_{\theta} = \frac{0,029 \sqrt{\theta_T^2 + \theta_U^2} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi},$$

б) для учета реактивной энергии

$$\delta_{\theta} = 0,029 \sqrt{\theta_T^2 + \theta_U^2} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi},$$

где $\theta_T, \theta_U - i$ соответственно угловая погрешность ТТ и ТН, минуты.

$\cos \varphi - i$ средний коэффициент мощности сети в точке учета электроэнергии, определяемый за расчетный период по следующей формуле:

$$\cos \varphi_{CP} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \cos \varphi_i$$

$\cos \varphi_i - i$ i -ый результат наблюдения на присоединении; $m - i$ число наблюдений за учетный период.

На действующих установках $\cos \varphi$ рассчитывается по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии за предыдущие периоды.

Для оценки возможности использования имеющихся в сети ТТ необходимо определить соответствие I_n , ТТ и оценить нагрузку вторичной цепи ТТ. Это можно проиллюстрировать на следующей примере.

Пример: Учет электроэнергии выполняется на силовом трансформаторе $S_{ТН} = 630 \text{ кВА}$, 10/0,4 кВ. Мощность нагрузки трансформатора изменяется от 80 кВА до номинальной, со средним $\cos \varphi = 0,85$. Ячейка трансформатора оборудована ТТ типа ТПЛ-10 с $K_T = 100/5$, включенных в фазы А и С, вторичные обмотки которого соединены в неполную звезду. В цепи ТТ включены: счетчик активной энергии САЗУ-И670, счетчик реактивной энергии СРЧУ-И673, амперметр Э-30 и реле максимального тока РТ 40/10.

Счетчики расположены в шкафу учета. Длина контрольного кабеля 15 м, жил медные сечение 2,5 мм².

Требуется проверить пригодность этого ТТ в этой установке.

Решение.

1. Определим номинальный ток трансформатора по стороне 10 кВ:

$$I_{1н} = \frac{S_{ТН}}{\sqrt{3} U_{н}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 36,4 \text{ А}$$

2. Ток минимальной нагрузки

$$I_{1min} = \frac{S_{min}}{\sqrt{3} U_{н}} = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 10} = 4,6 \text{ А}$$

3. Вторичной ток при номинальной нагрузке

$$I_{2H(max)} = \frac{I_{1H}}{k_T} = \frac{36,4}{100} = 1,82 \text{ А}$$

4. То же при минимальной нагрузке

$$I_{2H(min)} = \frac{I_{1min}}{k_T} = \frac{4,6 \cdot 5}{100} = 0,23 \text{ А}$$

5. Отношение фактических вторичных токов к номинальному ТТ в % составит:

$$I_{2max}^{\dot{}} = \frac{I_{2H(max)}}{I_{2min}} \cdot 100\% = \frac{1,82}{5} \cdot 100 = 36,4\%$$

$$I_{2min}^{\dot{}} = \frac{I_{2H(min)}}{I_{2H}} \cdot 100\% = \frac{0,23}{5} \cdot 100 = 4,6\%$$

По ПУЭ эти соотношения должны быть не менее $I_{2max}^{\dot{}} \geq 40\%$;

$I_{2min}^{\dot{}} \geq 5\%$, а с появлением счетчиков класса 0,2S и 0,5S $I_{2min}^{\dot{}} \geq 1\%$

Для этого варианта необходим трансформатор тока с коэффициентом трансформации $K_T = 75/5$ или $K_T = 50/5$.

6. Сопротивление соединительных проводов

$$R_{np} = \frac{l}{\gamma F} = \frac{15}{53 \cdot 2,5} = 0,112 \text{ Ом}$$

Сопротивление приборов приведены в табл.3.9

Таблица 3.9

Сопротивление приборов

Прибор	Тип	S_{np}, VA	Сопротивление, Ом	
			$Z_{npф}$	Z_{np0}
Амперметр	Э-30	1,0	-	0,04
Счетчик (P)	САЗУ-И670	0,4	0,015	-
Счетчик (Q)	СР4У-И673	0,1	0,015	0,015
Реле тока	РТ-40/10	0,5	-	0,02
Итого			0,03	0,055
			0,075	

8. Суммарные расчеты нагрузки

Без учета реле тока:

$$Z_{\Sigma \text{ расч.}} = \sqrt{3} R_{np} + Z_{npф} + Z_{np0} + R_{\kappa} = \sqrt{3} \cdot 0,112 + 0,03 + 0,055 + 0,1 = 0,379 \text{ Ом}$$

С учетом реле тока:

$$Z_{\Sigma \text{ расч.}} = \sqrt{3} R_{np} + Z_{npф} + Z_{np0} + R_{\kappa} = \sqrt{3} \cdot 0,112 + 0,03 + 0,075 + 0,1 = 0,395 \text{ Ом}$$

Допустимая нагрузка для класса точности 0,5 составляет $Z_H = 0,4 \text{ Ом}$.

По допустимой погрешности ТТ пригоден для применения (без учета нагрузки реле РТ).

Упражнение 8

Тема занятия: Оценка погрешностей учета электроэнергии и мощности в заданной точке учета

Цели и задачи занятий: интеграция и закрепление полученных знаний по теме измерительных комплексов систем учета электроэнергии.

Объект учета: ЛЭП - 10 кВ, питающая главную понизительную подстанцию промышленного предприятия.

Оценить погрешность измерительного комплекса при учете активной энергии.

Измерительный комплекс включает: счетчик, трансформаторы тока и напряжения соединенные между собой по типовой схеме.

Пример решения

Исходные данные

1. Счетчик электрической энергии электронный ЦЭ 6850В 1Н 57,7 V 5 – 7,5 А Кл. 0,5 (ГОСТ 30206 - 94). Расположен в помещении с температурой окружающего воздуха в пределах 18 - 22 °С.

2. Трансформатор тока (ТТ) типа ТЛП-10–2 100/5. Кл. 0,2 . Фактическая нагрузка вторичной цепи номинальная 20 ВА.

3. Трансформатор напряжения (ТН) типа НОМ – 10. Кл. 0,5. нагрузка вторичной цепи ТН в пределах номинальной для Кл. 0,5.

4. Линия связи трансформатора напряжения со счетчиком выполнена кабелем с медной токоведущей жилой с фактической потерей напряжения $\delta_L = 0,25\%$.

5. Параметры сети в точке учета представлены в табл. 1

Таблица 1

Ном. Значения			Предельные отклонения за учетный период								
U_n , кВ	I_n , А	f_n , Гц	$U/U_n, \%$		$\Delta U_{max}, \%$	$I/I_n, \%$		$f/f_n, \%$		$\Delta f, \%$	$\cos\varphi_{cp}$
			min	max		min	max	min	max		
10	82	50	96	105	5	11	116	99,5	100,4	0,5	0,76

Условия функционирования измерительного комплекса

Электросчетчик

1. Температура окружающей среды от 18 С до 22 °С при нормальной температуре счетчика 23 °С \pm 2 °С = 25 °С. Тогда наибольшее отклонение температуры

$$\Delta t = 7 \text{ °С.}$$

2. Индукция магнитного поля менее $B_f = 0,01$ мТл практического влияния на счетчик не оказывает.

3. Изменения напряжения, тока и частоты соответствуют данным параметров сети в точке учета (см. табл. 1).

Изменения подводимого тока к счетчику соответствует вторичному току ТТ,

$$\frac{0,11 \cdot 82}{100} \cdot 100\% = 9,02\%$$

т.е. от

$$\frac{1,16 \cdot 82}{100} \cdot 100\% = 95,12\%$$

до

Трансформатор тока

ТТ класса 0,2, согласно ГОСТ 7746 - 2001 при первичных токах в диапазоне 9,02 % - 95,12% имеет погрешность, соответственно

при первичном токе 9,02 % $\delta_{Imin} = 0,64\%$, $\theta_{min} = 26'$;

при первичном токе 95,12 % $\delta_{Imax} = 0,21\%$, $\theta_{max} = 10,31'$

Других влияющих факторов нет.

Трансформатор напряжения (ТН)

В заданных пределах изменений напряжения и при номинальной нагрузке вторичной цепи имеет погрешность (ГОСТ 1983-2004) $\delta_n = \pm 0,5\%$, $\theta_n = 20'$;

Линия связи счетчика

Линия связи счетчика с ТН по измеренным данным имеет потери напряжения $\delta_L = 0,25\%$.

Определение составляющих погрешности измерительного комплекса

Сравнивая допустимые границы параметров узла присоединения и рабочие условия применяемых средств измерений для состава измерительного комплекса. (ТТ, TV, счетчик и линия) (табл. 1) можно заключить, что данный измерительный комплекс может быть допущен к эксплуатации, но имеются отклонения от нормируемых условий применения счетчика, что обуславливает появление дополнительных погрешностей, которые входят в формулу (1) расчета погрешностей измерительного комплекса.

$$\delta_w = \pm 1,1 \cdot \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_\Theta^2 + \delta_L^2 + \delta_{сч}^2 + \sum_{i=1}^n \delta_{gi}^2} \quad (1)$$

где δ_i - основная токовая погрешность ТТ, %;

δ_U - погрешность измерения напряжения TV, %;

δ_Θ - погрешность трансформаторной схемы подключения счетчика за счет угловых погрешностей ТТ и TV, %.

$\cos\phi$ - коэффициент мощности нагрузки, средний за расчетный период;

δ_L - погрешность из-за потери напряжения в линии присоединения счетчика к TV, %;

$\delta_{сч}$ - основная погрешность счетчика.

δ_{gi} - дополнительные погрешности;

Значения параметров входящих в уравнение (1) будут следующими:

$\delta_i = 0,64$ % для наихудших условий при токе $0,0902 \cdot I_N$ для ТТ.

$\delta_U = 0,5$ % для TV;

$$\delta_\Theta = 0,029 \cdot \sqrt{\Theta_I^2 - \Theta_U^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi} = 0,029 \cdot \sqrt{26^2 - 20^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,76^2}}{0,76} = 0,412 \%$$

$\delta_L = 0,25$ %

Основная погрешность счетчика определяется по паспортным данным или по ГОСТ 30206 - 94 по формуле интерполяции функции $\cos\phi$ и тока $I = 0,0902 \cdot I_N$.

$$\delta_{сч}(\cos\phi) = 0,7 - 0,2 \cdot \cos\phi = 0,7 - 0,2 \cdot 0,76 = 0,548 \%$$

Дополнительные погрешности от трех влияющих величин:

1. Функция влияния напряжения по ГОСТу зависит от $\cos\phi$ и I и для счетчика кл. 0,5 (при отклонении $\Delta U \pm 10\%$)

$$K_U = 0,06 - 0,04 \cdot \cos\phi = 0,06 - 0,04 \cdot 0,76 = 0,03$$

Но эта величина соответствует отклонению напряжения на 10 %, тогда для нашего случая

$$\delta_U = K_U \cdot \Delta U_* = 0,03 \cdot \frac{9,02}{10} = 0,027 \%$$

2. Функция влияния температуры окружающей среды для данного счетчика

определяется по формуле интерполяции:

$$K_t = 0,07 - 0,04 \cdot \cos\phi = 0,07 - 0,04 \cdot 0,76 = 0,0396 \%$$

$$\delta_{gt} = K_t \cdot \Delta T = 0,0396 \cdot 7 = 0,28\%$$

3. Функция влияния частоты согласно ГОСТ не зависит от $\cos\phi$ и I и для счётчика класса 0,5 $K_f = 0,04$, тогда

$$\delta_{gf} = K_f \cdot \Delta f = 0,04 \cdot 0,5 = 0,02\%$$

Подставим полученные значения погрешности в формулу (1), получим

$$\delta_w = \pm 1,1 \cdot \sqrt{0,64^2 + 0,5^2 + 0,412^2 + 0,25^2 + 0,548^2 + 0,027^2 + 0,28^2 + 0,02^2} = 1,24$$

Округлим до десятых долей получим $\delta_w = 1,2\%$, что меньше допустимого значению 1,4% для $U_n = 10$ кВ

Если бы была линия 35 кВ, то измерительный комплекс с такими параметрами можно применять в этой точке учета, т.к. $\delta_w = 1,2\% < \delta_{w\text{доп}} = 1,4\%$, что удовлетворяет допустимым погрешностям измерений электроэнергии на напряжении 35 кВ.

Если бы была линия 110 кВ, то измерительный комплекс с такими параметрами в этой точке учета применять нельзя, т.к. $\delta_w = 1,2\% > \delta_{w\text{доп}} = 0,8\%$, следовательно необходимо заменить трансформатор тока с кл. 0,2 на трансформатор класса 0,2S, трансформатор напряжения с кл. 0,5 на трансформатор с кл.0,2 и будем обогревать до температуры 25 °С, т.о. $\delta_{gt} = 0$.

$$\delta_I = 0,31 \%$$

$$\delta_U = 0,2\%$$

$$\delta_\theta = 0,029 \cdot \sqrt{\Theta_I^2 - \Theta_U^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2\phi}}{\cos\phi} = 0,029 \cdot \sqrt{13,67^2 - 10^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,76^2}}{0,76} = 0,231 \%$$

$$\delta_L = 0,25 \%$$

Таким образом новая погрешность измерительного комплекса:

$$\delta_w = \pm 1,1 \cdot \sqrt{0,31^2 + 0,2^2 + 0,231^2 + 0,25^2 + 0,548^2 + 0,027^2 + 0,02^2} = 0,8$$

Что удовлетворяет допустимым погрешностям измерений электроэнергии на напряжении 110 кВ.