

Серия проектировщика

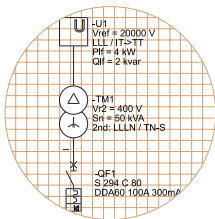
Апрель 2007

Трансформаторные подстанции СН /НН: теория и примеры расчета токов коротких замыканий и выбора автоматических выключателей

ADVLOC08020MAN07ARU



ABB



Серия проектировщика

Трансформаторные подстанции СН /НН: теория и примеры расчета токов коротких замыканий и выбора автоматических выключателей

Содержание:

1. Общая информация о трансформаторных подстанциях СН/НН

1.1	Классические типологии	2
1.2	Обзор трансформаторов СН/НН	5
1.3	Аппараты защиты СН: рассмотрение ограничений, накладываемых электроснабжающими организациями	8
1.4	Аппараты защиты НН	8

2. Расчет токов короткого замыкания

2.1	Данные, необходимые для расчета.....	11
2.2	Расчет токов короткого замыкания	12
2.3	Расчет вклада двигателей в ток короткого замыкания	15
2.4	Расчет ударных токов.....	15

3. Выбор аппаратов защиты и управления

3.1	Обзор основных электрических параметров аппаратов защиты и управления	17
3.2	Критерии выбора автоматических выключателей	19
3.3	Координация между автоматическими выключателями и выключателями нагрузки.....	21
3.4	Координация между автоматическими выключателями и выключателями дифференциального тока (ВДТ).	2
3.5	Пример расчета сети СН/НН	23

Приложение А:

Расчет ударного тока трансформатора	30
---	----

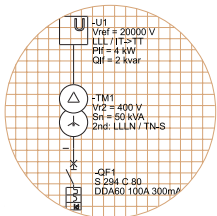
Приложение Б:

Пример расчета тока короткого замыкания	32
---	----

Б1 Метод симметричных составляющих.....	33
---	----

Б2 Метод мощностей	38
--------------------------	----

Глоссарий.....	40
----------------	----



Серия проектировщика

1. Общая информация о трансформаторных подстанциях СН/НН

1.1 Классические типологии

Электрические трансформаторные подстанции состоят из целого ряда устройств (проводников, аппаратов измерения и управления, электрических машин) предназначенных для преобразования напряжения распределительной сети СН (например, 15 кВ или 20 кВ), до значений напряжений, пригодных для питания низковольтных линий (400 В - 690 В).

Электрические подстанции можно разделить на две группы: общественные и частные:

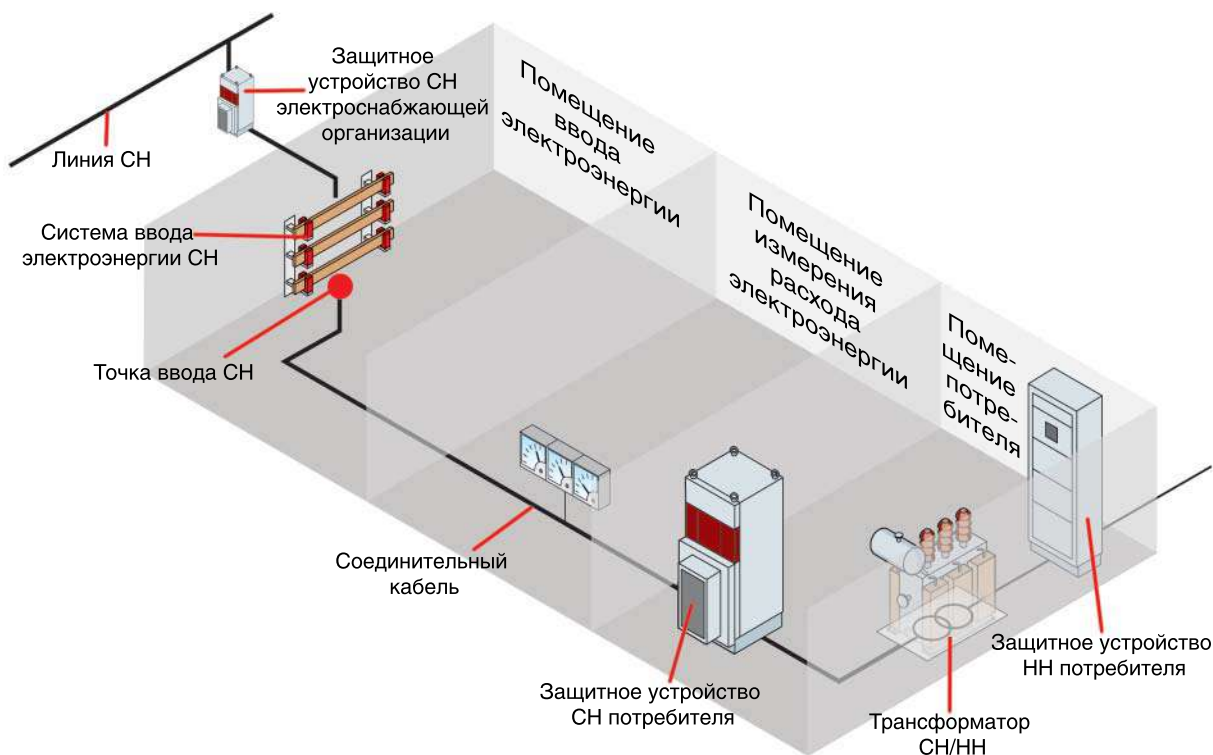
Общественные подстанции: принадлежат электроснабжающим организациям и снабжают частных потребителей однофазным или трехфазным током (типичные значения напряжений питания 230 В и 400 В). В свою очередь, подстанции данной группы можно разделить на городские подстанции и подстанции сельской местности, состоящие из небольших одиночных трансформаторов. Городские подстанции представляют собой кирпичные здания, в то время как сельские часто устанавливаются внешне на опорах линий СН.

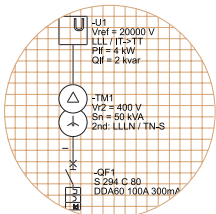
Частные подстанции: часто рассматриваются как абонентские подстанции, т.е. подстанции, где линия СН заканчивается в точке установки самой подстанции. Подстанции данного типа могут снабжать электроэнергией как общественные объекты (школы, больницы и т.д.), так и промышленные от общественной сети СН. Такие подстанции чаще всего располагают в одном здании или рядом с предприятием, которое они снабжают электроэнергией и в основном состоят из трех отдельных помещений:

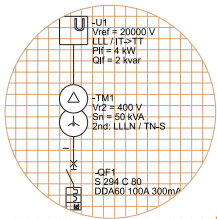
- **помещение ввода электроэнергии:** место, где установлен коммутирующий аппарат электроснабжающей организации. Эта комната должна быть достаточной по объему для того, чтобы вместить систему ввода/вывода, которую электроснабжающая организация имеет право устанавливать и расширять даже по прошествии времени для удовлетворения новых требований. Точка ввода находится в помещении ввода электроэнергии и представляет собой границу и место соединения общественной сети с промышленным потребителем.
- **помещение измерения расхода электроэнергии:** место, где располагается измерительное оборудование. Доступ к этим помещениям должен осуществляться только уполномоченным персоналом, в присутствии потребителя либо в его отсутствие.
- **помещение потребителя:** содержит трансформатор, коммутирующие аппараты СН и НН, которые являются собственностью потребителя. Это помещение обычно является смежным по отношению к предыдущим двум.

На рис. 1 показана типичная структура подстанции с отдельными вышеописанными помещениями.

Рис 1: Структурная схема подстанции

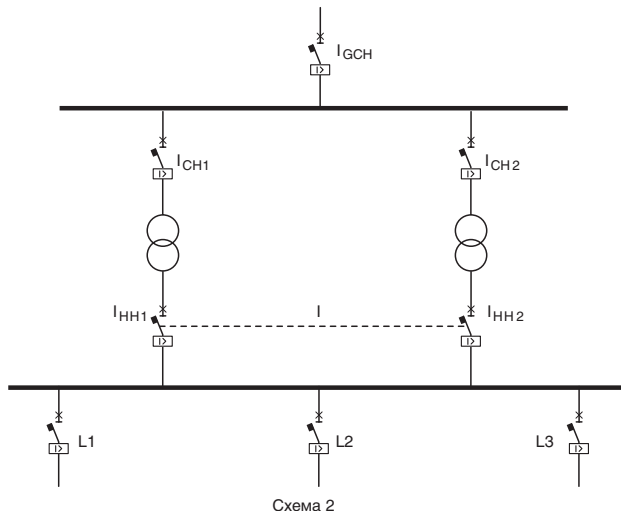






Серия проектировщика

Схема 2

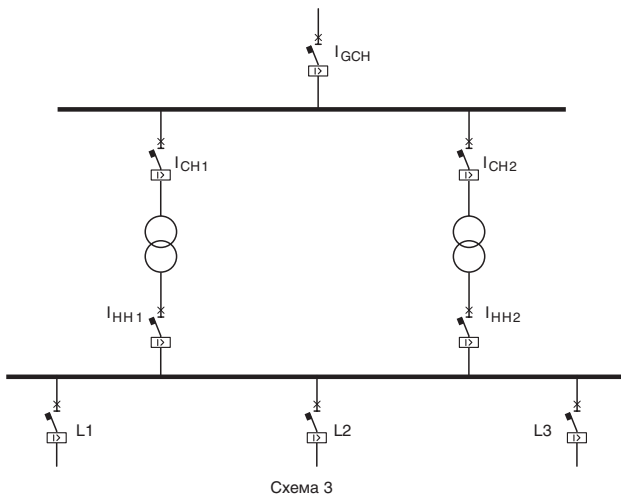


Подстанция с двумя трансформаторами, причем один из них резервный.

При установке резервного трансформатора выключатели стороны НН должны быть оснащены функцией взаимной блокировки "I", которая предназначена для того, чтобы предотвратить включение трансформаторов в параллель.

Помимо общего аппарата коммутации, изолирования и защиты на стороне СН "I_{GCH}", рекомендуется устанавливать индивидуальные аппараты каждого трансформатора ("I_{CH1}" и "I_{CH2}"). В этом случае при отключении аппаратов на стороне питания и на стороне потребителя, можно обеспечить изоляцию и безопасный доступ к нему, не отключая всю подстанцию от сети.

Схема 3

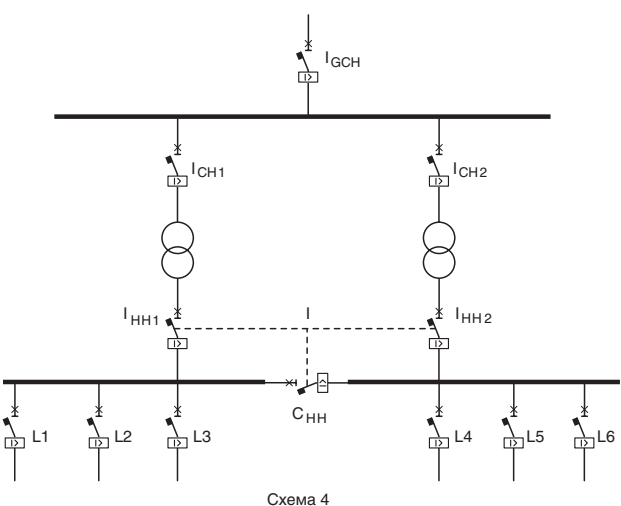


Подстанция с двумя трансформаторами, которые работают параллельно на одну шину.

При установке двух трансформаторов, работающих параллельно, при одной и той же полной потребляемой мощности установки возможно использование трансформаторов меньшей номинальной мощности. Сравнивая с двумя предыдущими схемами, в данном случае возможны несколько большие токи короткого замыкания из-за меньших значений $U_{к\%}$ трансформаторов меньшей мощности.

Для трансформаторов, работающих в параллель, могут возникать проблемы в аварийных режимах. При выходе из строя одного из них, должна быть предусмотрена система отключения неприоритетных нагрузок, для предотвращения перегрузки второго трансформатора и обеспечения бесперебойного питания приоритетных нагрузок. При координации защит необходимо учитывать, что при возникновении коротких замыканий на стороне НН токи короткого замыкания от обоих трансформаторов будут складываться в точке повреждения.

Схема 4

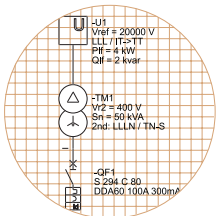


Подстанция с двумя трансформаторами, которые работают одновременно на две отдельные системы сборных шин.

Основными отличиями данной схемы от предыдущей, являются наличие шиносоединительного выключателя C_{HH} и наличие функции взаимной блокировки "I" выключателей I_{HH1}, I_{HH2} и C_{HH}. В данном случае функция "I" предотвращает включение выключателя C_{HH} при одновременно включенных выключателях I_{HH1} и I_{HH2}. В данной схеме трансформаторы питают отдельные низковольтные шины.

При такой же мощности трансформаторов, данный метод управления позволяет снизить токи короткого замыкания на шинах. Другими словами, каждый трансформатор определяет ток короткого замыкания в своей системе сборных шин. Влияние остальных трансформаторов отсутствует.

Если один трансформатор выходит из строя, то сразу включается шиносоединительный выключатель и питание всей установки осуществляется от одного трансформатора. При этом должна быть реализована система отключения неприоритетных нагрузок.



Серия проектировщика

1.2 Обзор трансформаторов СН/НН

Трансформатор является наиболее важной частью трансформаторной подстанции. Его выбор влияет на конфигурацию подстанции и основывается на различных факторах.

Так как данный вопрос не является основным вопросом этой брошюры, и в стремлении отразить только основные принципы следует отметить, что для низких мощностей (до 630 кВА - 800 кВА), могут устанавливаться одиночные трансформаторы, в то время как для повышенных мощностей (до 1000 кВА-1600 кВА), передаваемая мощность может разделяться на группу трансформаторов.

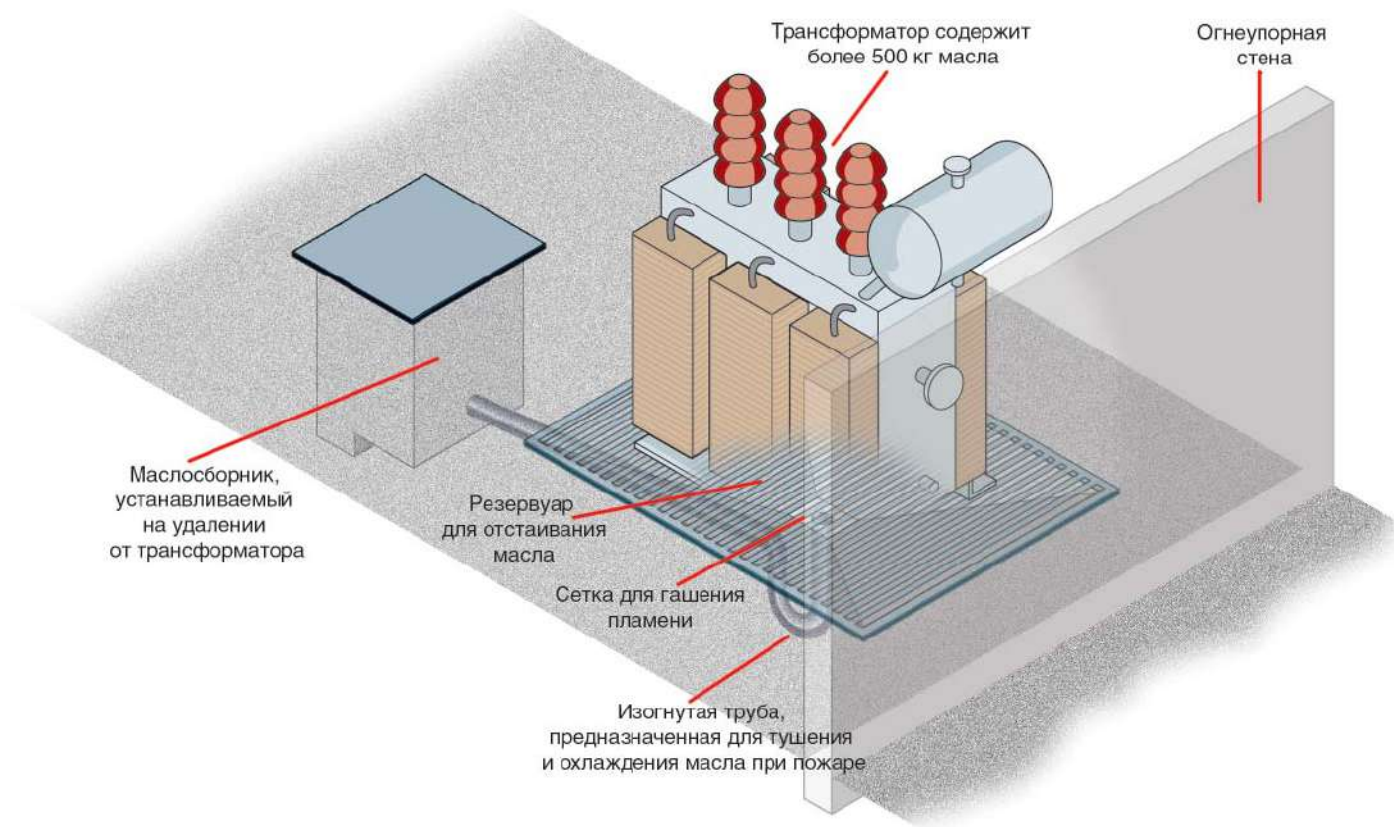
Следующим фактором, принимаемым во внимание при выборе трансформатора, является тип охлаждающей системы, которая может быть как масляной, так и воздушной. В отличие от сухих трансформаторов, в случае применения масляных трансформаторов, необходимо принять определенные меры. Например, для предотвращения

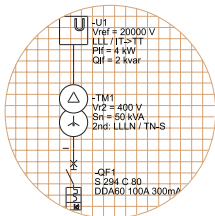
растекания масла, необходимо предусмотреть специальный маслосборник, как показано на рис. 2. Более того, подстанция должна обладать огнеупорным сопротивлением не менее 60 минут (REI 60) и вентиляция должна работать только на выдувание воздуха наружу. В соответствии с типом охлаждения, выделяют следующие типы трансформаторов:

- С (AN)** сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением;
- СД (AF)** сухие трансформаторы с дутьем;
- М (ONAN)** масляные трансформаторы с естественной циркуляцией воздуха и масла;
- МЦ (ONAF)** масляные трансформаторы с естественной циркуляцией воздуха и принудительной циркуляцией масла;
- ДЦ (OFAF)** масляные трансформаторы с принудительной циркуляцией воздуха и масла.

Наиболее распространенными являются типы С и М, потому что не рекомендуется использовать трансформаторы с вентиляторами или маслососами, так как не редко это создает трудности в обслуживании подстанций.

Рисунок 2: трансформаторы типа М содержат более 500 кг масла (>800кВА)





Серия проектировщика

Также, не менее важными характеристиками являются те характеристики, которые связаны с электрическими параметрами. Помимо стандартного набора характеристик, таких, как номинальная мощность, напряжение холостого хода вторичной обмотки, коэффициент трансформации, номинальное напряжение короткого замыкания в процентах $U_{к\%}$, они приобретают большую важность, когда несколько трансформаторов работают в параллель:

- схема соединения обмоток (схема треугольник/звезда с заземленной нейтральной точкой является наиболее часто используемой на подстанциях);
- группа соединений, обычно выражается числом, которое если умножить на 30, то получится угол сдвига между фазными напряжениями на НН стороне и СН стороне трансформатора.

Наличие двух и более трансформаторов, а также возможность замыкания секционного аппарата на низковольтных шинах, позволяют организовать работу электросети при параллельной работе трансформаторов.

При наличии повреждений данный метод соединения вызывает повышенные значения токов короткого замыкания на стороне НН, что влечет за собой увеличение размеров автоматических выключателей на отходящих шинах и более тяжелые условия для шин по сравнению с работой от одиночного трансформатора. Это объясняется меньшим значением $U_{к\%}$, что свойственно трансформаторам с меньшей мощностью. С другой стороны при правильном управлении, метод параллельного соединения имеет преимущество, заключающееся в том, что, по крайней мере, основные потребители будут запитаны через секционный выключатель, даже если один из трансформаторов выведен из работы.

Следующие примеры показывают увеличение токов короткого замыкания на шине в случае параллельной работы трансформаторов:

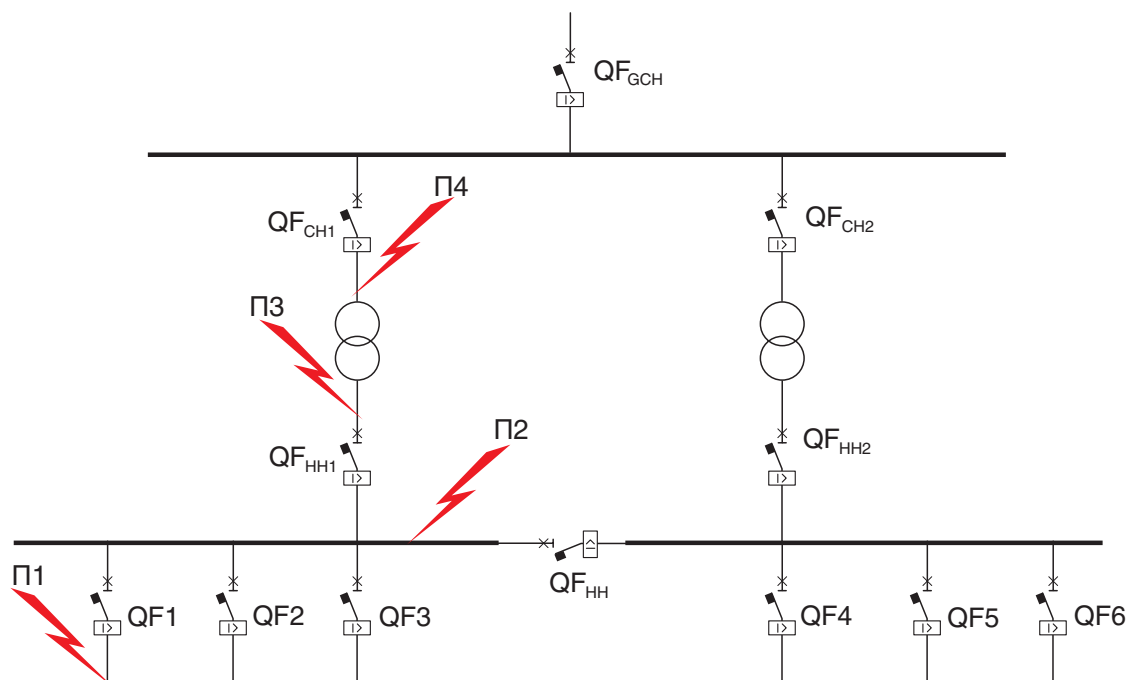
Данные сети, мощность короткого замыкания	$S_{к\text{ сети}}=750\text{MBA}$
Напряжение сети на стороне НН	$U_{2\text{ ном}}=400\text{В}$
Мощность одиночного трансформатора	$S_{\text{номтр.}}=1600\text{кВА}$
Номинальное напряжение короткого замыкания одиночного трансформатора	$U_{к\%}=6\%$
Мощность трансформатора для параллельной работы	$S_{\text{номтр.}}=800\text{кВА}$
Номинальное напряжение короткого замыкания	$U_{к\%}=4\%$

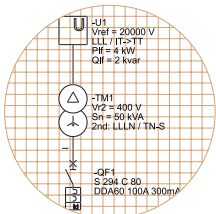
Используя эти данные, после несложного подсчета получаем значение тока короткого замыкания равное 37кА на зажимах одиночного трансформатора мощностью 1600кВА.

При двух параллельно работающих трансформаторах мощностью 800кВА ток короткого замыкания на шинах будет составлять около 55кА.

На примере электросети, показанной на рис. 3, рассмотрим принципы организации защиты в сетях с параллельно работающими трансформаторами:

Рис. 3





Серия проектировщика

П1 короткое замыкание на одном из потребителей

В независимости от наличия или отсутствия секционного аппарата:

в результате правильного выбора устройств защиты, а также в соответствии с принципами селективности НН, можно исключить короткое замыкание и гарантировать непрерывность обслуживания размыканием лишь выключателя QF1.

П2 короткое замыкание на главной шине НН

Без секционного аппарата:

повреждение исключается двумя основными низковольтными выключателями (QF_{HH1} и QF_{HH2}) трансформаторов, что вызывает обесточивание всей электроустановки. Трансформаторы должны оставаться под напряжением. Чтобы исключить срабатывание автоматических выключателей QF_{CH1} и QF_{CH2} , важно обеспечить селективность между аппаратами СН и НН.

С секционным аппаратом:

секционный автоматический выключатель QF_{HH} должен сработать, с целью разделения шин и окончательного исключения короткого замыкания в результате срабатывания автоматического выключателя QF_{HH1} . Такое поведение выключателя QF_{HH} позволяет обеспечить бесперебойность электроснабжения части электроустановки, питающейся от шины, незатронутой повреждением. В свою очередь, такое поведение выключателей QF_{HH1} , QF_{HH2} и QF_{HH} , каждый из которых затронут повреждением, может быть скоординировано при использовании устройств с функцией направленной зонной селективности. Такими устройствами могут быть, например, защитные расцепители PR123 для серии Етах и расцепители PR333 для выключателя Х1.

П3 короткое замыкание на шине НН непосредственно за трансформатором

Без секционного аппарата:

ток повреждения протекает по обоим трансформаторам. Таким образом, возможно срабатывание выключателей QF_{CH1} , QF_{CH2} , QF_{HH1} и QF_{HH2} одновременно, и вся электроустановка останется обесточенной. В таком случае становятся важными изучение и реализация специальной логики управления (например, направленная селективность), которая позволила бы выключателям QF_{CH1} и QF_{HH1} сработать с целью изолирования лишь трансформатора, затронутого повреждением. Также должна быть предусмотрена функция отключения неприоритетных нагрузок, так как электроустановка будет питаться только от одного трансформатора.

С секционным аппаратом:

логика управления остается такой же, но также может быть предусмотрено срабатывание секционного выключателя.

П4 короткое замыкание на шине СН непосредственно перед трансформатором

Без секционного аппарата:

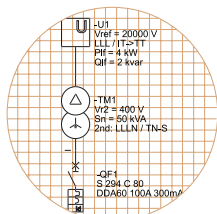
логика управления должна позволить автоматическому выключателю QF_{CH1} , по которому протекает ток замыкания, сработать мгновенно (по QF_{CH2} будет протекать ток замыкания, ограниченный сопротивлениями двух трансформаторов). В случае если необходимо бесперебойное питание электроустановки, последует изолирование трансформатора путем отключения выключателя QF_{HH1} , и питание электроустановки будет осуществляться от другого трансформатора. Также должна быть предусмотрена функция отключения неприоритетных нагрузок, так как электроустановка будет питаться от одного трансформатора.

С секционным аппаратом:

логика управления остается без изменений, и секционный аппарат будет иметь лишь функцию разделения шин, отделяя шину с выведенным из работы трансформатором.

После анализа методик локализации повреждений, которые при определенных обстоятельствах оказываются достаточно сложными благодаря наличию двойного питания от параллельных трансформаторов, рассмотрим минимальные требования к двум трансформаторам, работающим параллельно:

- внутренние соединения должны относиться к одной группе и трансформаторы должны иметь одинаковый коэффициент трансформации. Выполняя эти предписания, мы получим две группы напряжений, совпадающих по фазе, равных по амплитуде и противоположных по знаку; в результате векторная разность между вторичными напряжениями в какой-либо из петель и циркулирующие токи будут отсутствовать. В противном случае будут генерироваться циркулирующие токи, которые могут повредить даже ненагруженные трансформаторы;
- значения напряжений короткого замыкания ($U_{к\%}$) должны быть одинаковыми. Благодаря данной мере суммарный ток нагрузки будет распределен между трансформаторами пропорционально их соответствующим номинальным мощностям. В противном случае трансформаторы будут нагружены по-разному, и трансформатор с меньшим значением внутреннего падения напряжения будет нагружен больше.



Серия проектировщика

1.3 Аппараты защиты СН: рассмотрение ограничений, накладываемых электроснабжающими организациями.

Отходящие линии СН, питающие подстанцию потребителя оборудуются устройствами защиты от сверхтоков и замыкания на землю; поэтому электроснабжающей организации не следует снабжать потребителя защитными устройствами.

Для того, чтобы предотвратить какие-либо внутренние повреждения установки СН или НН от воздействия распределительной сети, потребитель должен установить соответствующее оборудование. Выбор и координация защитной аппаратуры должны обеспечивать безопасность для персонала и оборудования, обеспечивая в то же время высокую надежность обслуживания электроустановки.

Ниже приведены обозначения характеристик защит СН/НН, которые должны также взаимодействовать между собой. Времятоковые характеристики устройств защиты электроснабжающих организаций обычно являются независимыми от времени, и уставкой срабатывания является верхний предел, обеспечивающий работу без ложных срабатываний.

Ниже приведен пример диапазона настроек уставок различных защитных устройств:

- уставка защиты от сверхтока (перегрузка 51):
Уставка (30-600)А, с шагом 15А (прив. к первичной обмотке);
Временная задержка (0,05-5)сек, с шагом 0,05сек.
- уставка защиты от сверхтока (короткое замыкание 50):
Уставка (30-600)А, с шагом 15А (прив. к первичной обмотке);
Временная задержка (0,05-5)сек, с шагом 0,05сек.
- защита от замыкания на землю: в соответствии с характеристиками электроустановки пользователя, защита от замыкания на землю может быть построена как на основе объединения прямой защиты от замыкания на землю с защитой от сверхтока нулевой последовательности 67N, так и просто защиты от сверхтока нулевой последовательности 51N.

Например, что касается защиты от сверхтока нулевой последовательности, диапазоны настроек могут быть следующими:

Уставка (0-10)А, с шагом 0,5А (прив. к первичной обмотке);
Временная задержка (0,05-1)сек, с шагом 0,05сек.

1.4 Аппараты защиты НН.

Устройства защиты НН располагаются на стороне нагрузки трансформатора.

Функциями защиты устройств НН обычно являются защиты от перегрузки, от короткого замыкания и от замыкания на землю.

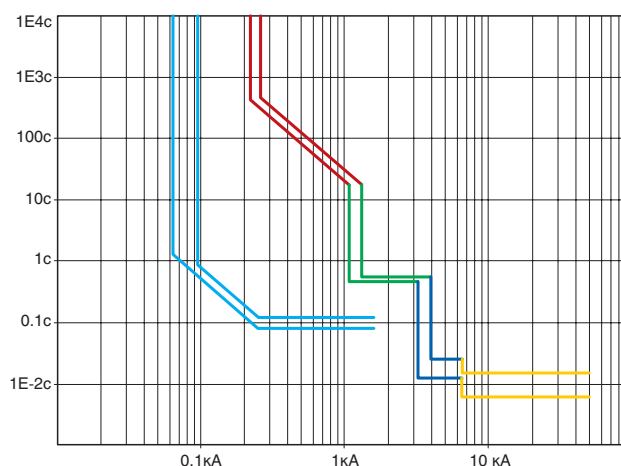
Ниже представлены описания защитных функций, выполняемых микропроцессором, устанавливаемом на электронных расцепителях:

- **Защита от перегрузки**
Обозначается буквой «L», защита с обратозависимой долговременной задержкой по времени, с возможностью настройки времени и тока. В электронных расцепителях АББ также обозначается функцией I1.
- **Защита от короткого замыкания**
Обозначается буквами «S», защита от короткого замыкания с обратозависимой кратковременной задержкой по времени (в электронных расцепителях АББ обозначается как функция I2) и «I», защита от короткого замыкания с мгновенным срабатыванием (в электронных расцепителях АББ обозначается как функция I3).
Характеристика функции «S» может быть как обратозависимой так и независимой от времени. Характеристика функции «I» является независимой от времени и может настраиваться только токовая уставка.
- **Защита от замыкания на землю**
Обозначается буквой «G», может быть как обратозависимой так и независимой от времени. Данная защита может быть реализована на заземляющем проводнике при помощи внешнего тороида.

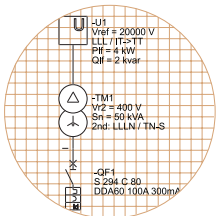
Кривая желтого цвета отображает поведение автоматического выключателя при значениях тока, которые много больше уставки защиты I3.

На рис. 4 показан пример времятоковой характеристики автоматического выключателя НН, в котором активированы все выше упомянутые функции.

Рис. 4



Следующий пример объясняет, как пользоваться времятоковыми кривыми функций L-S-G с обратозависимой



Серия проектировщика

выдержкой времени, если характеристика I^2t постоянна.

Пусть, для защитной функции “L” расцепителя, установленного на автоматический выключатель в литом корпусе серии Tmax, например T2...160 In100 (In отражает типоразмер расцепителя, установленного на выключатель), возможны кривые А и Б.

Для кривой А известно, что при токе:

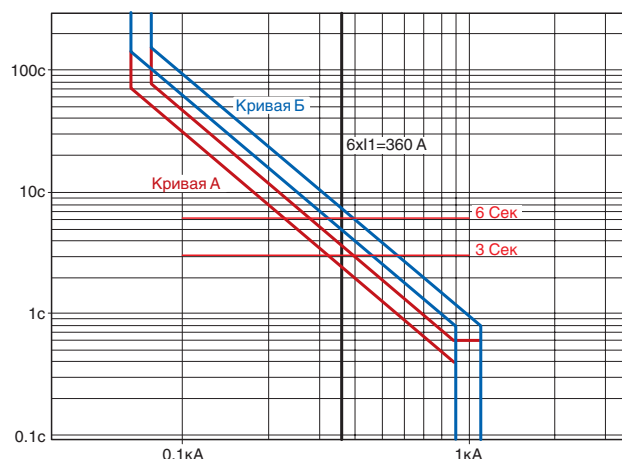
$6 \times I_n$ время срабатывания $t_1=3$ сек

Для кривой Б известно, что при токе:

$6 \times I_n$ время срабатывания $t_1=6$ сек

Таким образом, при условии, что установка $I_n=0.6 \times I_n=0.6 \times 100=60$ А и при токе $6 \times I_n=360$ А, вышеупомянутое означает, что для двух рассмотренных кривых характерны времена срабатывания 3 и 6 секунд (без учета допусков), как и показано на рис. 5.

Рис. 5



Так как для данных кривых характеристика I^2t постоянна, будут выполняться следующие условия:

для кривой А:

$$(6 \times I_n)^2 \times 3 = \text{const} = I^2t$$

для кривой Б:

$$(6 \times I_n)^2 \times 6 = \text{const} = I^2t$$

Теперь в качестве примера при данных условиях можно найти время срабатывания при токе перегрузки равном 180А.

Поэтому, воспользовавшись этими уравнениями, получим:

$$(6 \times I_n)^2 \times 3 = 180^2 \times t_A$$

$$(6 \times I_n)^2 \times 6 = 180^2 \times t_B$$

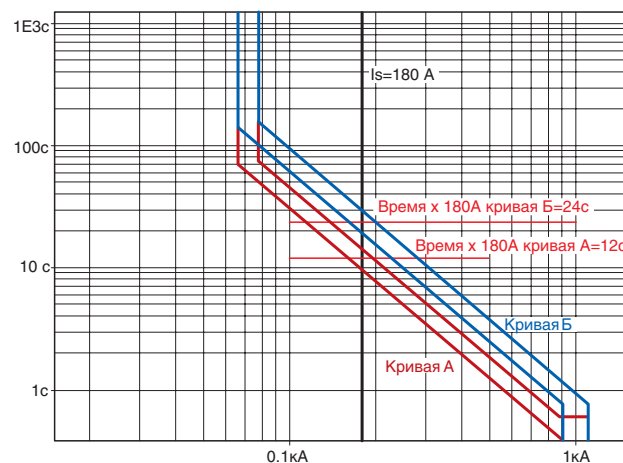
откуда:

$$t_A = 12 \text{ сек}$$

$$t_B = 24 \text{ сек}$$

Эти результаты получены математическим путем, но они могут быть сверены непосредственно с кривыми времятоковых характеристик, как показано на рис. 6.

Рис. 6



Если же по требованиям электроустановки необходимо, чтобы ток перегрузки равный 180А был отключен за время меньшее, чем 15 секунд, из проведенного анализа будет следовать, что целесообразно использовать времятоковую характеристику с кривой А (время срабатывания $t_1=3$ сек при токе $6 \times I_n$).

Используя условие

$$(6 \times I_n)^2 \times t = \text{const}$$

чтобы выбрать кривую, подходящую для удовлетворения указанного условия, можно воспользоваться обратным путем вычислений, записав уравнение:

$$(6 \times 0.6 \times 100)^2 \times t = \text{const} = 180^2 \times 15$$

Данное соотношение позволяет рассчитать максимальную временную задержку времятоковой характеристики, чтобы удовлетворить требованиям электроустановки.

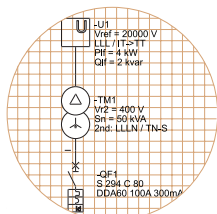
После вычислений получим следующее значение:

$$t = 3.75 \text{ сек}$$

Для приемлемой кривой значение “ t_1 ” должно быть меньше “ t ”. Поэтому следует использовать кривую А, что также следует из проведенного анализа.

Эти виды защит, главным образом для защит СН, обозначаются кодами буквенно-цифровыми кодами такими, как 50-51N-67, и которые не имеют эквивалентов в номенклатуре защит НН. Здесь приводится информация, объясняющая наиболее общие коды, и отражающая связь, где это возможно, между обозначениями защит СН и защит НН.

Стандарт МЭК 60617-7 является действующим стандартом; в нем определены символы и соответствующие функции расцепителей, обычно используемых в электроустановках. Для многих, работая в области электротехники, является обычным использование системы кодов стандарта ANSI/IEEE C37.2.



Серия проектировщика

Ниже приводится пример соответствия между системами кодов стандартов МЭК и ANSI/IEEE для некоторых основных защитных функций СН.

50 Реле сверхтоков с мгновенным срабатыванием

Устройство, срабатывающее без временных задержек, если ток превышает предустановленную величину. Данный вид защиты можно сравнить с функцией "I" расцепителей НН.

51 Реле сверхтоков с задержкой срабатывания

Устройство, срабатывающее, если протекающий ток превышает предустановленную величину, и в котором протекающий ток и время срабатывания обратнозависимы. Данный вид защиты можно сравнить с функцией "S" расцепителей НН.

51N или 51G Реле замыкания на землю с задержкой срабатывания

Устройство, срабатывающее с определенной временной задержкой при возникновении замыкания на землю. В частности:

51N: дифференциальный ток измеряется тремя трансформаторами тока в фазах. Данное устройство можно сравнить с функцией "G" расцепителей НН.

51G: дифференциальный ток может измеряться как встроенными трансформаторами тока так и внешним тороидальным трансформатором тока. Данное устройство можно сравнить с функцией защиты, которую можно реализовать, например, с помощью однополярного тороида, управляющего устройством дифференциального тока с настраиваемым временем срабатывания (таким, как RCQ), или с функцией "G" защитного расцепителя, соединенного с внешним тороидом.

50N или 50G Реле замыкания на землю с мгновенным срабатыванием

Устройство, срабатывающее без намеренной временной задержки при возникновении замыкания на землю. В частности:

50N: дифференциальный ток измеряется общим трансформатором тока. Данное устройство можно сравнить с функцией "G" расцепителей НН.

50G: дифференциальный ток может измеряться как встроенными трансформаторами тока так и внешним тороидальным трансформатором тока. Данное устройство можно сравнить с функцией защиты, которую можно реализовать, например, с помощью однополярного тороида, управляющего устройством дифференциального тока.

67 реле переменного тока направленной мощности и направленной защиты от сверхтока

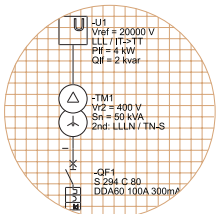
Устройство, срабатывающее при определенном значении проходящей в заданном направлении мощности, или от сверхтока определенного направления. Данное реле можно сравнить с функцией защиты "D" расцепителей НН.

49 Тепловое реле переменного тока

Устройство, срабатывающее, если температура машины или аппарата превышает заданное значение. Данное реле можно сравнить с функцией защиты от перегрузки "L" расцепителей НН, даже при условии, что настоящая защита от перегрузки не применяется на стороне СН.

Таблица 1

Код ANSI/IEEE	Определение функции	Символьное обозначение согласно стандарту МЭК 60617-7
51	Защита от сверхтоков с задержкой срабатывания	$I > \overline{I}$
50	Мгновенная защита от сверхтоков	$I > \overline{I}^0$
51N	Защита от замыкания на землю с задержкой срабатывания	$I > \overline{I} \overline{I}^0$
50N	Мгновенная защита от замыкания на землю	$I > \overline{I}^0$
67	Направленная защита фазы от сверхтока	$I > \overline{I}^0 \overline{I}^0$
67N	Направленная защита нулевой последовательности от сверхтока	$I > \overline{I}^0 \overline{I}^0$



Серия проектировщика

2 Расчет токов короткого замыкания

2.1 Данные, необходимые для расчета.

Ниже приводятся некоторые общие определения параметров, характеризующих основные компоненты электроустановки. Знание этих параметров является фундаментальным для проведения полного анализа электроустановки.

Распределительные сети:

В сетях СН номинальное напряжение является единственно известным параметром.

Чтобы рассчитать токи короткого замыкания необходимо знать мощность короткого замыкания, которая может изменяться от 250МВА до 500МВА для систем напряжением до 30кВ.

Если уровень напряжения будет выше, то мощность короткого замыкания будет лежать в пределах от 700МВА до 1500МВА.

Уровни напряжения распределительных сетей СН и соответствующие им мощности короткого замыкания, принятые Стандартом МЭК 60076-5, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Напряжение распределительной сети [кВ]	Полная мощность короткого замыкания (европейский опыт) [МВА]	Полная мощность короткого замыкания (североамериканский опыт) [МВА]
7.2-12-17.5-24	500	500
36	1000	1500
52-72.5	3000	5000

Синхронный генератор:

Данными, обычно известными для электрических машин, являются номинальное напряжение $U_{ном}$ и полная номинальная мощность $S_{ном}$.

Для синхронного генератора, как и для любой электрической машины, чтобы провести полный анализ также необходимо рассмотреть:

- поведение в условиях установившегося режима для анализа проблем статической устойчивости.
- поведение в условиях переходного режима при внезапном изменении нагрузки для анализа проблем динамической устойчивости, и в особенности при возникновении трехфазного короткого замыкания.

Поэтому, становится необходимым знать значения реактивного сопротивления машины, в частности:

- для первой проблемы определяющим параметром является синхронное реактивное сопротивление;
- для второй проблемы определяющими являются значения переходного реактивного сопротивления с соответствующими значениями постоянных времени и сверхпереходное реактивное сопротивление.

В данной статье статический и динамический анализы явлений, связанных с генераторами, подробно рассматриваться не будут, но следующие пункты следует изучить и определить:

- максимальное значение тока в начальные моменты короткого замыкания, от которого зависят механические напряжения в обмотках, соединительных шинах генератора с трансформатором и на опорах генератора;
- форму тока короткого замыкания, от которой зависит

правильная координация устройств защиты. Времятоковая характеристика в режиме короткого замыкания выглядит обычным образом: прежде чем достичь установившегося значения, значения тока короткого замыкания выше и постепенно уменьшаются со временем.

Такое поведение объясняется тем, что полное сопротивление генератора, которое обычно состоит практически из одного только реактивного сопротивления, не имеет определенного значения, а изменяется во времени из-за магнитного потока, который не достигает установившегося режима мгновенно. Различные значения реактивного сопротивления обусловлены различными конфигурациями магнитного потока, главным образом из-за того, что магнитные линии поля проходят разный путь. Кроме того, в цепи содержится не одно индуктивное сопротивление, а несколько (сопротивления обмоток якоря, обмоток возбуждения, демпферных обмоток и они взаимосвязаны. В целях упрощения рассматривают только следующие параметры:

сверхпереходное реактивное сопротивление, прямая ось X''_d

переходное реактивное сопротивление, прямая ось X'_d

синхронное реактивное сопротивление, прямая ось X_d

Изменение данных параметров во времени влияет на ток короткого замыкания в генераторе. Реактивные сопротивления обычно выражаются в относительных единицах или в процентах от номинальных параметров машины.

Они могут быть получены из следующего соотношения:

$$x_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{ном} \cdot X}{U_{ном}} \cdot 100,$$

где:

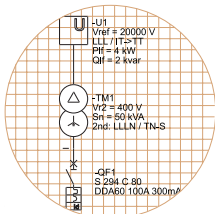
X – значение рассматриваемого реактивного сопротивления, [Ом];

$I_{ном}$ – номинальный ток машины;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение машины.

Количественно различные значения реактивных сопротивлений могут составлять:

- сверхпереходное реактивное сопротивление: для турбогенераторов значение лежит в пределах от 10% до 20% (машины с гладким ротором), а для машин с явнополюсным ротором от 15% до 30%;
- переходное реактивное сопротивление: для турбогенераторов значение может изменяться от 15% до 30% (изотропные машины с гладким ротором), а для машин с явнополюсным ротором от 30% до 40%;
- синхронное реактивное сопротивление: для турбогенераторов значение может изменяться от 120% до 200% (машины с гладким ротором), а для машин с явнополюсным ротором от 80% до 150%.



Серия проектировщика

Трансформаторы:

Трансформаторы СН/НН с первичными обмотками, соединенными в треугольник (Δ), и вторичными обмотками, соединенными в звезду с заземленной нейтральной точкой (\star).

Электрическими параметрами трансформатора, которые обычно известны, являются:

- номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$ [кВА];
- номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1\text{ном}}$ [В];
- номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2\text{ном}}$ [В];
- напряжение короткого замыкания в процентах ($U_{\text{к\%}}$) (например, 4% и 6%).

С помощью этих данных можно определить номинальные токи первичных и вторичных обмоток и токи в условиях короткого замыкания.

Значения напряжения короткого замыкания в зависимости от мощности трансформатора представлены в таблице 2 (в соответствии со Стандартом МЭК 60076-5).

Таблица 2

Номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$ [кВА]	Напряжение короткого замыкания $U_{\text{к\%}}$
≤ 630	4
$630 < S_{\text{ном}} \leq 1250$	5
$1250 < S_{\text{ном}} \leq 2500$	6
$2500 < S_{\text{ном}} \leq 6300$	7
$6300 < S_{\text{ном}} \leq 25000$	8

Перегрузочная способность зависит от конструктивных особенностей каждого трансформатора. Обобщенная информация об этом представлена в Стандарте ANSI C57.92 и в таблице 3.

Таблица 3

Кратность номинального тока трансформатора	Время [сек]
25	2
11.3	10
6.3	30
4.75	60
3	300
2	1800

Асинхронные двигатели:

Для асинхронных двигателей обычно известны номинальная активная мощность [кВт], номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ и номинальный ток $I_{\text{ном}}$. Кроме того задаются коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

В случае короткого замыкания асинхронный двигатель ведет себя как генератор с сверхпереходным реактивным сопротивлением от 20% до 25% от установившегося. Это означает, что ток в 4-5 раз больший, чем номинальный, подпитывает место короткого замыкания.

2.2 Расчет тока короткого замыкания

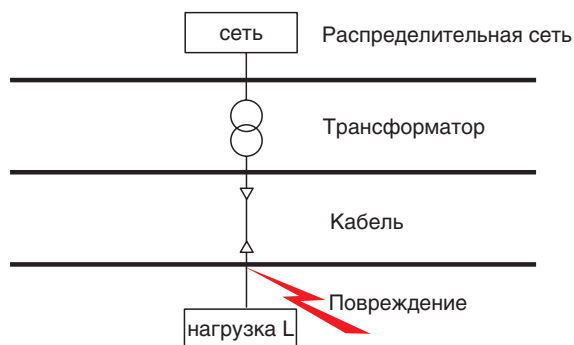
Рассмотрим электрическую сеть, изображенную на рис. 1, в которой произошло короткое замыкание на зажимах нагрузки. Данную сеть можно изучить, представив ее в виде электрической схемы, состоящей из активных и реактивных сопротивлений каждого электрического компонента.

Значения активных и реактивных сопротивлений должны быть приведены к одному и тому же значению напряжения, используемому при расчете короткого замыкания.

Связь между значением полного сопротивления Z_1 , приведенного к высшему напряжению (U_1), и значением Z_2 , приведенного к низшему напряжению, определяется коэффициентом трансформации:

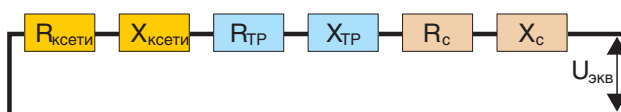
$$K = \frac{U_1}{U_2} \text{ откуда следует, что: } Z_2 = \frac{Z_1}{K^2}$$

Рис. 1



Структура рассматриваемой электрической сети может быть представлена виде последовательно соединенных элементов; таким образом, получаем эквивалентную цепь, как и показано на рис. 2, которая позволяет рассчитать полное эквивалентное сопротивление до точки повреждения.

Рис. 2

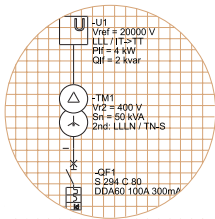


По отношению к точке короткого замыкания эквивалентное напряжение источника определяется как:

$$U_{\text{ЭКВ}} = \frac{c \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}$$

Коэффициент "с" зависит от напряжения системы и учитывает влияние нагрузок и изменение напряжения сети.

Основываясь на данных соображениях, можно определить значения активных и реактивных сопротивлений элементов, которые составляют электрическую установку.

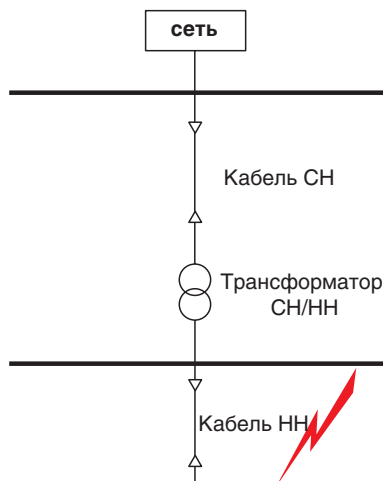


Серия проектировщика

Рассмотрим пример расчета тока трехфазного короткого замыкания, с использованием рассмотренных выше уравнений.

Пример:

Параметры различных элементов рассматриваемой схемы являются:



Мощность и ток короткого замыкания сети:

$$S_{к\text{ сети}} = 500 \text{ МВА}; I_{к\text{ сети}} = 14.4 \text{ кА.}$$

Номинальное напряжение сети СН: $U_c = 20 \text{ кВ.}$

Кабель СН:

Активное сопротивление $R_{к\text{ СН}} = 360 \text{ мОм};$

Реактивное сопротивление $X_{к\text{ СН}} = 335 \text{ мОм.}$

Номинальная мощность трансформатора: $S_{\text{ном.ТР}} = 400 \text{ кВА};$

Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора

$U_{2\text{ ном}} = 400 \text{ В};$

Данные трансформатора при коротком замыкании:

$U_{к\%} = 4\%; P_{к\%} = 3\%.$

Кабель НН длиной $L = 5 \text{ м};$

Активное сопротивление $R_{к\text{ НН}} = 0.388 \text{ мОм};$

Реактивное сопротивление $X_{к\text{ НН}} = 0.395 \text{ мОм.}$

Учитывая все вышесказанное расчет суммарного полного сопротивления проводится для того, чтобы отыскать ток трехфазного короткого замыкания в заданной точке.

Так как повреждение находится на стороне НН, все параметры, определенные для стороны СН должны быть приведены к вторичному номинальному напряжению с применением коэффициента:

$$K = \frac{20000}{400} = 50$$

Сеть:

$$Z_{к\text{ сети}} = \frac{c \cdot U_{\text{сети}}}{\sqrt{3} \cdot I_{к\text{ сети}}} = \frac{1.1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 14.4 \cdot 10^3} = 0.88 \text{ Ом}$$

$$Z_{к\text{ сети } 400\text{В}} = \frac{Z_{к\text{ сети}}}{K^2} = \frac{0.88}{50^2} = 0.00035 \text{ Ом}$$

$$X_{к\text{ сети } 400\text{В}} = 0.995 \cdot Z_{к\text{ сети } 400\text{В}} = 0.000348 \text{ Ом}$$

$$R_{к\text{ сети } 400\text{В}} = 0.1 \cdot X_{к\text{ сети } 400\text{В}} = 0.0000348 \text{ Ом}$$

Кабель СН:

$$R_{к\text{ СН } 400\text{В}} = \frac{R_{к\text{ СН}}}{K^2} = \frac{360 \cdot 10^{-3}}{50^2} = 0.000144 \text{ Ом}$$

$$X_{к\text{ СН } 400\text{В}} = \frac{X_{к\text{ СН}}}{K^2} = \frac{335 \cdot 10^{-3}}{50^2} = 0.000134 \text{ Ом}$$

Трансформатор:

$$Z_{\text{ТР}} = \frac{U_{2\text{ ном}}^2 \cdot U_{к\%}}{100 \cdot S_{\text{ном.ТР}}} = \frac{400^2 \cdot 4}{100 \cdot 400 \cdot 10^3} = 0.016 \text{ Ом}$$

$$P_{\text{ТР}} = \frac{P_{к\%} \cdot S_{\text{ном.ТР}}}{100} = \frac{3}{100} \cdot 400 \cdot 10^3 = 12 \text{ кВт}$$

$$I_{2\text{ ном}} = \frac{S_{\text{ном.ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ ном}}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577 \text{ А}$$

$$R_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{ТР}}}{3 \cdot I_{2\text{ ном}}^2} = \frac{12000}{3 \cdot 577^2} = 0.012 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{ТР}} = \sqrt{(Z_{\text{ТР}}^2 - R_{\text{ТР}}^2)} = \sqrt{(0.016^2 - 0.012^2)} = 0.0106 \text{ Ом}$$

Кабель НН:

$$R_{к\text{ НН}} = 0.388 \text{ мОм}$$

$$X_{к\text{ НН}} = 0.395 \text{ мОм}$$

Суммарное активное сопротивление короткого замыкания: $R_{\Sigma\text{к}} = \Sigma R$

$$R_{\Sigma\text{к}} = R_{к\text{ сети } 400\text{В}} + R_{к\text{ СН } 400\text{В}} + R_{\text{ТР}} + R_{к\text{ НН}}$$

$$R_{\Sigma\text{к}} = 0.0000348 + 0.000144 + 0.012 + 0.000388 = 0.01256 \text{ Ом}$$

Суммарное реактивное сопротивление короткого замыкания: $X_{\Sigma\text{к}} = \Sigma X$

$$X_{\Sigma\text{к}} = X_{к\text{ сети } 400\text{В}} + X_{к\text{ СН } 400\text{В}} + X_{\text{ТР}} + X_{к\text{ НН}}$$

$$X_{\Sigma\text{к}} = 0.000348 + 0.000134 + 0.0106 + 0.000395 = 0.01147 \text{ Ом}$$

Значение симметричного тока

трехфазного короткого замыкания:

Рассчитаем значение суммарного полного сопротивления:

$$Z_{\Sigma\text{к}} = \sqrt{(R_{\Sigma\text{к}}^2 + X_{\Sigma\text{к}}^2)} = \sqrt{(0.01256^2 + 0.01147^2)} = 0.017 \text{ Ом}$$

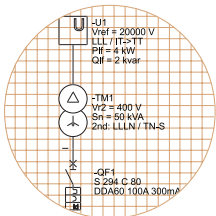
Учитывая коэффициент $c^{(1)} = 1.1$, получим значение тока короткого

$$I_{к3\text{ф}} = \frac{c \cdot U_{2\text{ ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma\text{к}}} = \frac{1.1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0.017} = 14943 \text{ А} = 14.95 \text{ кА}$$

Более подробный расчет тока короткого замыкания представлен в Приложении Б.

⁽¹⁾ коэффициент "с" необходим для того, чтобы учесть некоторые явления, не учитываемые при расчете, например, такие как:

- изменение напряжения во времени;
- изменение контактного сопротивления зажимов трансформатора;
- переходные явления в роторах машин (генераторы и двигатели).



Серия проектировщика

2.3 Расчет вклада двигателя в ток короткого замыкания

В случае возникновения короткого замыкания двигатель начинает работать как генератор, питая повреждение в течение ограниченного времени, необходимого для того, чтобы выделить энергию, запасенную в магнитной цепи двигателя. Учитывая сверхпереходное реактивное сопротивление "X" машины, можно рассчитать численное значение вклада двигателя. Как правило, это число сложно получить; поэтому общим правилом является рассмотрение вклада двигателя через кратность номинального тока. Обычно данное значение лежит в пределах от 4 до 6.

Для двигателей НН, эффект вклада двигателя в ток короткого замыкания с течением времени становится незначительным по прошествии нескольких периодов от момента возникновения короткого замыкания. В Стандартах МЭК 60909 или СЕИ 11-28 представлен минимальный перечень критериев, для учета данного явления; это могут быть:

$$\sum I_{\text{НОМ,ДВ}} > \frac{I_k}{100}$$

где:

$\sum I_{\text{НОМ,ДВ}}$ является суммой номинальных токов двигателей подключенных напрямую к цепи, где произошло короткое замыкание. I_k — ток трехфазного короткого замыкания, полученный без учета вклада двигателя.

2.4 Расчет ударных токов

Ток короткого замыкания " i_k " может рассматриваться как сумма двух составляющих:

- периодическая составляющая " i_p " имеет синусоидальную форму и абсолютно симметрична по отношению к оси времени. Данная составляющая выражается следующим соотношением:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_k)$$

- аperiodическая составляющая " i_a ", изменяющаяся по экспоненциальному закону благодаря наличию индуктивности. Данная составляющая характеризуется постоянной времени $\tau = L/R$ ("R" является активным сопротивлением, "L" индуктивностью цепи выше точки повреждения) и затухает по истечении от 3 до 6 τ .

$$i_a = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

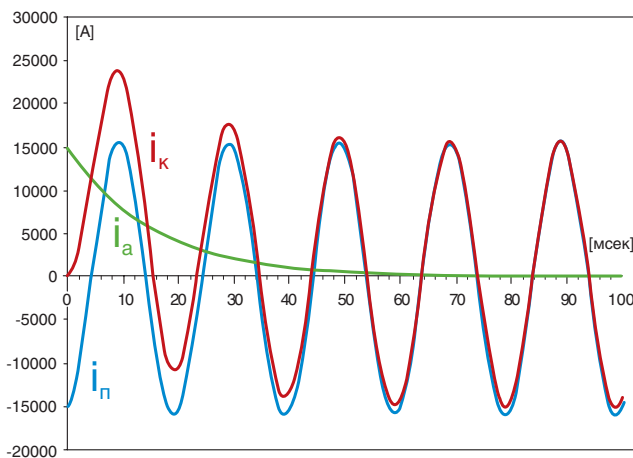
Аperiodическая составляющая во время переходного процесса обуславливает создание асимметричного тока короткого замыкания, характеризующегося наличием максимального значения, называемого ударным значением тока, которое получается выше, чем амплитудное значение

синусоидальной составляющей. В общем, можно установить, что относительно действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания " I_k ", значение первого пикового значения тока может лежать в пределах от

$$\sqrt{2} \cdot I_k \text{ до } 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

После переходного процесса ток короткого замыкания становится практически симметричным. Токосые кривые представлены на рис. 3.

Рис. 3



Как известно, применение выключателя в условиях короткого замыкания, в зависимости от рабочего напряжения устройства, главным образом определяется следующими параметрами:

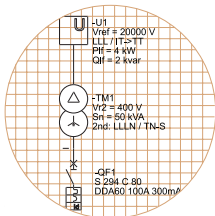
$I_{\text{си}}$ = отключающая способность

$I_{\text{ст}}$ = включающая способность

Отключающая способность $I_{\text{си}}$ определяется действующим значением периодической составляющей тока короткого замыкания. Известно, что действующее значение периодической составляющей синусоидального тока равно значению постоянного тока, которое за равное время вызывает такой же тепловой эффект. Синусоидальные величины обычно выражаются через действующие значения. Действующее значение тока короткого замыкания можно рассчитать по классической формуле:

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Включающая способность $I_{\text{ст}}$ определяется в соответствии с ударным значением ожидаемого тока короткого замыкания.



Серия проектировщика

Так как каждый элемент своим полным сопротивлением оказывает влияние на ток короткого замыкания, и так как автоматический выключатель в свою очередь является элементом со своим собственным сопротивлением, ожидаемый ток определяется как ток, протекающий в цепи, при отсутствии устройства защиты.

В Стандарте МЭК 60947-2 (ГОСТ 50030.2) представлена таблица, позволяющая перейти от расчетного действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания к соответствующему ударному значению, умножая на коэффициент, также связанный с коэффициентом мощности. Данные этой таблицы необходимо учитывать при определении значений I_{cm} и I_{cu} различных автоматических выключателей.

При переходе от характеристик автоматического выключателя к характеристикам электроустановки, когда расчет действующего значения периодической составляющей тока довольно прост, определение соответствующего ударного значения может быть менее очевидным. Необходимые параметры, такие как коэффициент мощности при коротком замыкании или соотношение между активным и реактивным сопротивлениями цепи, не всегда доступны.

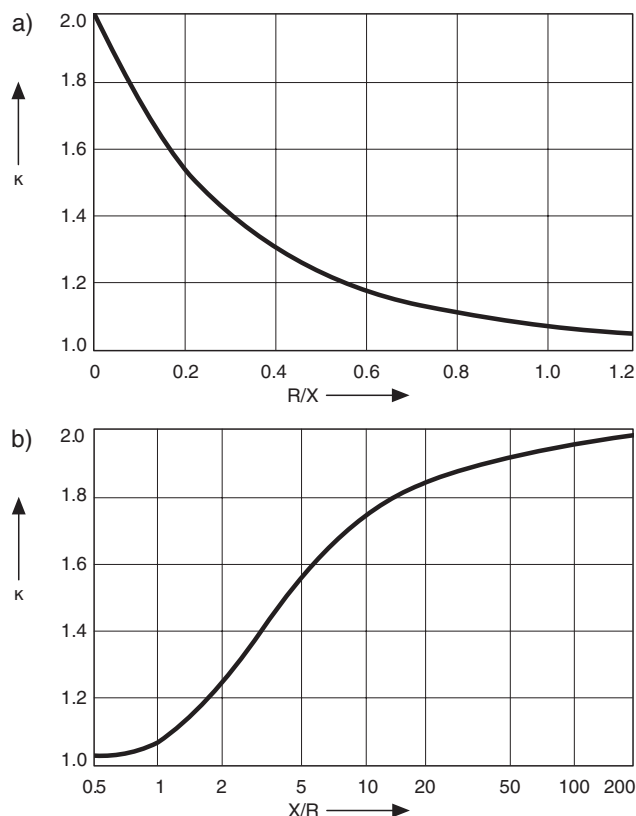
В Стандарте МЭК 60909 дается полезная информация по определению ударного тока и, в частности, предлагаются следующие формулы:

$$I_{уд} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

где коэффициент “к” может быть найден из формулы:

$$k = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot R}{X}}$$

или через следующие диаграммы, показывающие зависимость коэффициента “к” от параметра “R/X” “X/R”.

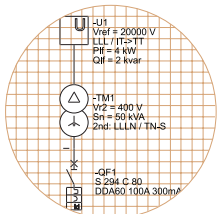


Пример:

Зная действующее значение периодической составляющей трехфазного тока короткого замыкания $I_k = 33$ кА и коэффициент мощности в условиях короткого замыкания ($\cos \varphi_k = 0.15$), можно рассчитать ударное значение следующим образом: из значения $\cos \varphi_k$ можно найти соотношение $X/R = 6.6$, а по графику или по формуле можно найти значение коэффициента $k=1.64$, при котором ударное значение $I_{уд} = 76.6$ кА при соответствующем токе трехфазного короткого замыкания $I_k = 33$ кА.

Для защиты электроустановки с номинальным напряжением 400 В, учитывая только ток трехфазного короткого замыкания, можно выбрать автоматический выключатель с отключающей способностью $I_{cu}=36$ кА, значение включающей способности которого составляет $I_{cm} = 75.6$ кА, в соответствии со стандартом МЭК 60947-2. Такая включающая способность будет ниже ударного значения, которое будет иметь место в рассматриваемой электроустановке; таким образом, выбор автоматического выключателя будет некорректен, и необходимо выбрать исполнение автоматического выключателя с более высокой отключающей способностью (например, 50 кА) и соответственно более высокой включающей способностью, превосходящей ударное значение электроустановки.

Из вышеупомянутого видно, что в рассмотренном примере выбор автоматического выключателя исполнения “N” (отключающая способность 36 кА) – некорректен, и с учетом ударного значения, необходимо выбирать автоматический выключатель исполнения “S” или “H”.



Серия проектировщика

3. Выбор аппаратов защиты и управления.

3.1 Обзор основных электрических параметров аппаратов защиты и управления.

Вообще говоря, при необходимости анализа и выбора устройства защиты и управления, такого как автоматический выключатель, следует оценить некоторые электрические параметры, характеризующие само устройство, например, номинальный ток и отключающую способность.

Ниже представлено краткое описание этих параметров, а также их связь с электрическими параметрами электроустановки.

Номинальное рабочее напряжение U_e : значение напряжения, на которое рассчитано электрооборудование, и которому соответствуют другие основные параметры оборудования. Обычно выражается, как напряжение между фазами.

Номинальный длительный ток I_n : значение тока, которое устройство может проводить неограниченное время (недели, месяцы или даже годы). Данный параметр используется для определения размера автоматического выключателя.

Номинальный ток I_n : значение тока, характеризующее защитный расцепитель, установленный на автоматический выключатель, и в зависимости от доступных настроек расцепителя, определяет защитные характеристики самого автоматического выключателя. Данный ток обычно соотносится с номинальным током нагрузки, защищаемой автоматическим выключателем.

Номинальная предельная отключающая способность I_{cu} при коротком замыкании: действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания, которое автоматический выключатель способен отключить. Данная величина устанавливается в определенном тестовом цикле (O-t-BO), и испытательные методики представлены в Стандарте МЭК 60947-2 (ГОСТ 50030.2). Автоматические выключатели классифицируются в соответствии с уровнями исполнения, обозначаемыми буквами ("N" "S" "H" "L" и т.д.) в соответствии с их отключающей способностью.

Номинальная рабочая отключающая способность I_{cs} при коротком замыкании: действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания, которое

автоматический выключатель способен отключить. Данная величина устанавливается в определенном тестовом цикле (O-t-BO-t-BO), и испытательные методики представлены в Стандарте МЭК 60947-2 (ГОСТ 50030.2).

Данный параметр обычно выражается в процентах 25% - 50% - 75% - 100% от номинальной предельной отключающей способности при коротком замыкании, например $I_{cs} = 75\% I_{cu}$.

Значение отключающей способности должно соотноситься с величиной тока короткого замыкания в месте установки самого автоматического выключателя и должны выполняться следующие условия $I_{cu} > I_k$ или $I_{cs} > I_k$.

Номинальная включающая способность при коротком замыкании I_{cm} : максимальное ожидаемое значение тока, при котором автоматический выключатель обязан включиться. При переменном токе значение включающей способности автоматического выключателя в условиях короткого замыкания должно быть не ниже, чем его номинальная предельная отключающая способность, умноженная на коэффициент "n", а именно $I_{cm} = n \times I_{cu}$.

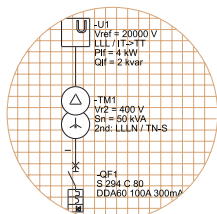
Такое значение I_{cm} должно соотноситься с ударным значением тока, измеренным в точке установки автоматического выключателя, и условие $I_{cm} > I_{уд}$ должно выполняться.

В таблице 1 представлены значения коэффициента "n", определяемого Стандартом на изделия МЭК 60947-2 (ГОСТ 50030.2).

Таблица 1

Отключающая способность I_{cu}	Коэффициент мощности	n
$4.5 \leq I_{cu} \leq 6$	0.7	1.5
$6 < I_{cu} \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I_{cu} \leq 20$	0.3	2
$20 < I_{cu} \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I_{cu}$	0.2	2.2

Номинальный кратковременно-выдерживаемый ток I_{cw} : действующее значение переменного тока, которое автоматический выключатель способен выдерживать без ухудшения характеристик за определенное время, предпочтительными значениями которого являются 1 и 3 сек.



Серия проектировщика

Автоматические выключатели в литом корпусе

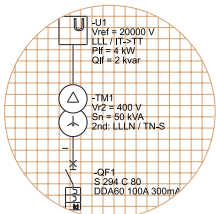
серия	Tmax									
автоматический выключатель	T1			T2				T3		
номинальное рабочее напряжение (Ue)	690			690				690		
номинальный длительный ток (Iu)	160			160				250		
номинальная предельная отключающая способность (Icu)	B	C	N	N	S	H	L	N	S	
(AC) 50-60 Гц 220/230 В	25	40	50	65	85	100	120	50	85	
(AC) 50-60 Гц 380/415 В	16	25	36	36	50	70	85	36	50	
(AC) 50-60 Гц 440 В	10	15	22	30	45	55	75	25	40	
(AC) 50-60 Гц 500 В	8	10	15	25	30	36	50	20	30	
(AC) 50-60 Гц 690 В	3	4	6	6	7	8	10	5	8	
номинальная рабочая отключающая способность (Ics)										
(AC) 50-60 Гц 220/230 В	100%	75%	75%	100%	100%	100%	100%	75%	50%	
(AC) 50-60 Гц 380/415 В	100%	100%	75%	100%	100%	100%	75%(1)	75%	50%(2)	
(AC) 50-60 Гц 440 В	100%	75%	50%	100%	100%	100%	75%	75%	50%	
(AC) 50-60 Гц 500 В	100%	75%	50%	100%	100%	100%	75%	75%	50%	
(AC) 50-60 Гц 690 В	100%	75%	50%	100%	100%	100%	75%	75%	50%	
номинальная включающая способность (Icm)										
(AC) 50-60 Гц 220/230 В	52.5	84	105	143	187	220	264	105	187	
(AC) 50-60 Гц 380/415 В	32	52.5	75.6	75.6	105	154	187	75.6	105	
(AC) 50-60 Гц 440 В	17	30	46.2	63	94.5	121	165	52.5	84	
(AC) 50-60 Гц 500 В	13.6	17	30	52.5	63	75.6	105	40	63	
(AC) 50-60 Гц 690 В	4.3	5.9	9.2	9.2	11.9	13.6	17	7.7	13.6	

(1) 70 кА (2) 27кА (3) 75% для Т5 630 (4) 50% для Т5 630 (5) только для Т7 800/1000/1250А

Воздушные автоматические выключатели

серия	Emax								
автоматический выключатель	X1			E1		E2			
номинальное рабочее напряжение (Ue)	690			690		690			
уровень исполнения	B	N	L	B	N	B	N	S	L
номинальный длительный ток (Iu)	630	630	630	800	800	1600	1000	800	1250
	800	800	800	1000	1000	2000	1250	1000	1600
	1000	1000	1000	1250	1250		1600	1250	
	1250	1250	1250	1600	1600		2000	1600	
	1600	1600						2000	
номинальная предельная отключающая способность (Icu)									
(AC) 50-60 Гц 220/230/380/415 В	42	65	150	42	50	42	65	85	130
(AC) 50-60 Гц 440 В	42	65	130	42	50	42	65	85	110
(AC) 50-60 Гц 500/525 В	42	55	100	42	50	42	55	65	85
(AC) 50-60 Гц 660/690 В	42	55	60	42	50	42	55	65	85
номинальная рабочая отключающая способность (Ics)									
(AC) 50-60 Гц 220/230/380/415 В	42	50	150	42	50	42	65	85	130
(AC) 50-60 Гц 440 В	42	50	130	42	50	42	65	85	110
(AC) 50-60 Гц 500/525 В	42	42	100	42	50	42	55	65	65
(AC) 50-60 Гц 660/690 В	42	42	45	42	50	42	55	65	65
номинальная включающая способность (Icm)									
(AC) 50-60 Гц 220/230/380/415 В	88.2	143	330	88.2	105	88.2	143	187	286
(AC) 50-60 Гц 440 В	88.2	143	286	88.2	105	88.2	143	187	242
(AC) 50-60 Гц 500/525 В	88.2	121	220	75.6	75.6	84	121	143	187
(AC) 50-60 Гц 660/690 В	88.2	121	132	75.6	75.6	84	121	143	187
ном. коротковременно-выдерживаемый ток (Icw) (1сек)	42	42	15	42	50	42	55	65	10
(3сек)				36	36	42	42	42	

(1) при напряжении 600 В – 100 кА



Серия проектировщика

	T4					T5					T6				T7			
	690					690					690				690			
	250/320					400/630					630/800/1000				800/1000/1250/1600			
	N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V ⁽⁵⁾
	70	85	100	200	300	70	85	100	200	300	70	85	100	200	85	100	200	200
	36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
	30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
	25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	40	50	85	100
	20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75%	100%	100%	100%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75%	100%	100%	100%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75%	100%	100%	100%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100% ⁽³⁾	100% ⁽⁴⁾	100%	100%	100%	75%	100%	100%	75%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100% ⁽³⁾	100% ⁽⁴⁾	100% ⁽⁴⁾	75%	75%	75%	75%	100%	75%	75%	75%
	154	187	220	440	660	154	187	220	440	660	154	187	220	440	187	220	440	440
	75.6	105	154	264	440	75.6	105	154	264	440	75.6	105	154	220	105	154	264	330
	63	84	143	220	396	63	84	143	220	396	63	94.5	105	176	105	143	220	286
	52.5	63	105	187	330	52.5	63	105	187	330	52.5	73.5	105	143	84	105	187	220
	40	52.5	84	154	176	40	52.5	84	154	176	40	48.4	55	66	63	88.2	105	132

	E3					E4			E6	
	690					690			690	
	N	S	H	V	L	S	H	V	H	V
	2500	1000	800	800	2000	4000	3200	3200	4000	3200
	3200	1250	1000	1250	2500		4000	4000	5000	4000
		1600	1250	1600					6300	5000
		2000	1600	2000						6300
		2500	2000	2500						
		3200	2500	3200						
		3200								
	65	75	100	130	130	75	100	150	100	150
	65	75	100	130	110	75	100	150	100	150
	65	75	100	100	85	75	100	130	100	130
	65	75	85 ⁽¹⁾	100	85	75	85 ⁽¹⁾	100	100	100
	65	75	85	100	130	75	100	150	100	125
	65	75	85	100	110	75	100	150	100	125
	65	75	85	85	65	75	100	130	100	100
	65	75	85	85	65	75	85	100	100	100
	143	165	220	286	286	165	220	330	220	330
	143	165	220	286	242	165	220	330	220	330
	143	165	187	220	187	165	220	286	220	286
	143	165	187	220	187	165	187	220	220	220
	65	75	75	85	15	75	100	100	100	100
	65	65	65	65		75	75	75	85	85

3.2 Критерии выбора автоматических выключателей

Помимо выполнения условий, предъявляемых к электрическим параметрам автоматических выключателей (напряжение – ток – отключающая способность и т.д.), также необходимо выполнение условий защиты автоматическим выключателем соответствующего оборудования.

Ниже приводится краткий обзор методик проверки, которые необходимо выполнять, чтобы обеспечить защиту наиболее часто применяемых устройств в электроустановках.

Защита кабелей

Кабели должны быть защищены от перегрузки и короткого замыкания.

Для защиты от перегрузки должно выполняться следующее условие:

$$I_B \leq I_1 \leq I_2,$$

где:

I_B – рабочий ток нагрузки;

I_1 – уставка защиты от перегрузки (функция “L”) выставляемая на защитном расцепителе;

I_2 – длительно-допустимый ток кабеля.

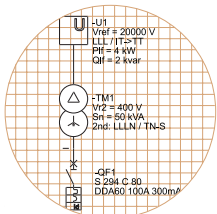
Для защиты от короткого замыкания должно выполняться следующее условие:

$$K^2 S^2 \geq I^2 t,$$

где:

$K^2 S^2$ – определенное значение теплового импульса, выдерживаемого кабелем, которое является функцией поперечного сечения S и константы K , для кабелей с ПВХ изоляцией равной 115, а для кабелей с полиэтиленовой изоляцией 143.

$I^2 t$ – определенное значение пропускаемого автоматическим выключателем теплового импульса при максимальном токе короткого замыкания электроустановки.



Серия проектировщика

Максимально защищаемая длина

Для сетей типа TN-S на стороне НН, в Стандарте МЭК 60364 (ГОСТ Р 50571) даны некоторые рекомендации для приблизительного расчета и оценки минимального тока короткого замыкания в конце кабеля. В данном Стандарте принято, что условием возникновения минимального тока короткого замыкания является однофазное короткое замыкание в конце проводника.

В зависимости от того, распределен ли нейтральный проводник или нет, расчет должен производиться по следующим формулам:

TN-S трехфазная трехпроводная система (двух фазное короткое замыкание)

$$I_{kmin} = \frac{0.8 \cdot U_0 \cdot S_{\phi}}{1.5 \cdot \rho \cdot 2 \cdot L}$$

TN-S трехфазная четырехпроводная система (короткое замыкание фазы на нейтраль)

$$I_{kmin} = \frac{0.8 \cdot U_0 \cdot S_{\phi}}{1.5 \cdot \rho \cdot (1 + m) \cdot L}$$

где:

- 0.8 – 1.5 – 2 константы рассматриваемых формул
- U_0 – линейное напряжение системы;
- U_{ϕ} – фазное напряжение системы;
- S_{ϕ} – сечение фазного проводника;
- ρ – удельное сопротивление материала проводника кабеля;
- m – отношение сопротивлений фазного и нейтрального проводников. В наиболее общем случае фазный и нейтральный проводники выполнены из одного материала, и коэффициент “ m ” становится отношением поперечных сечений фазного и нейтрального проводников;
- L – длина кабеля в метрах [м];
- I_{kmin} – минимальный ток короткого замыкания в конце кабеля.

Если в представленные формулы вместо значения I_{kmin} подставить значение уставки мгновенного срабатывания I_{3Max} , включая максимальный допуск используемого автоматического выключателя, и в качестве искомой величины выбрать длину, то решение уравнений дает значение максимальной длины защищаемого кабеля при данных настройках магнитного расцепителя устройства защиты.

Получим следующие формулы:

$$L_{Max} = \frac{0.8 \cdot U_0 \cdot S_{\phi}}{1.5 \cdot \rho \cdot (1 + m) \cdot I_{3Max}}$$

$$L_{Max} = \frac{0.8 \cdot U_0 \cdot S_{\phi}}{1.5 \cdot \rho \cdot 2 \cdot I_{3Max}}$$

Защита от косвенного прикосновения

Защита от косвенного прикосновения заключается в защите людей от риска прикосновения к открытым проводящим частям электроустановок, которые в нормальном состоянии не должны находиться под напряжением, но в случае повреждения основной изоляции оказываются под напряжением. Автоматическое отключение питания необходимо, когда в случае повреждения напряжение

прикосновения на металлических конструкциях достигает величин, опасных для человека или сохраняется в течение недопустимого времени.

Меры защиты от косвенного прикосновения в электроустановках НН представлены в Стандарте CEI 64-8¹, а для электроустановок СН в Стандарте CEI 11-1.

Для проверки обеспечения защиты в системах НН, даются рекомендации для различных типов распределительных сетей, основанные на сопротивлении контура повреждения, напряжении, токе срабатывания устройства защиты и времени его срабатывания.

В системах СН проблема защиты от косвенного прикосновения рассматривается всегда, если у пользователя имеется своя собственная трансформаторная подстанция. В соответствии со Стандартом CEI 11-1, ток замыкания на землю I_g может быть рассчитан по формуле:

$$I_g = U \cdot (0.003 \cdot L_1 + 0.2 \cdot L_2),$$

где L_1 отражает ответвление от воздушной линии, а L_2 сам кабель.

Отыскание значения тока замыкания на землю является довольно сложной задачей, и поэтому этот ток должен сообщаться производителем.

В Стандарте указываются максимальные значения шаговых напряжений и напряжений прикосновения в зависимости от времени отключения поврежденной цепи.

Защита генераторов

В соответствии с общими представлениями о защите генераторов от токов короткого замыкания, для его эффективной защиты защитное устройство должно иметь следующие характеристики:

- уставка защиты от перегрузки L равна или выше, чем номинальный ток генератора;
- минимальное время срабатывания защиты от короткого замыкания (мгновенной I или с задержкой S);
- защита от сверхтоков с учетом перегрузочной способности машины в соответствии со Стандартом МЭК 60034-1 (ГОСТ Р 28173) должна соответствовать условию отключения тока $1.5 \cdot I_{номГ}$ за 30 сек, где $I_{номГ}$ – номинальный ток генератора.

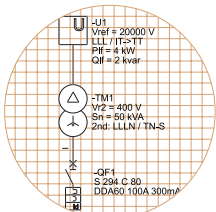
Защита трансформаторов

Рассмотрим трансформатор СН/НН для того, чтобы проанализировать характеристики устройства защиты, расположенного выше или ниже трансформатора.

Для вышестоящего автоматического выключателя необходимо учитывать кривую намагничивания трансформатора; данная кривая не должна иметь пересечений с времятоковой характеристикой автоматического выключателя. Отключающая способность должна соответствовать току короткого замыкания в сети перед трансформатором.

Нижестоящий автоматический выключатель должен иметь такую кривую срабатывания, чтобы была гарантирована защита от предельной тепловой перегрузки в случае

¹ Также данные меры представлены и в ПУЭ 7 изд.



Серия проектировщика

возникновения короткого замыкания. В Стандарте МЭК 60076-5 установлено, что в качестве пределов тепловых воздействий в результате коротких замыканий приняты значения токов короткого замыкания, пропускаемых трансформатором без повреждений, в течение 2 сек.

Данное условие должно выполняться также вышестоящим выключателем в случае, если короткое замыкание на вторичной стороне не вызывает срабатывания нижестоящего автоматического выключателя. В этом случае ток, приведенный к первичной стороне через коэффициент трансформации должен быть действительно “видимым” вышестоящим автоматическим выключателем.

В общем, анализ поведения вышестоящего и нижестоящего выключателей при повреждении на вторичной стороне должен проводиться для токов, действительно воздействующих на аппараты.

Координация с двигателями

Подробное изучение вопросов координации работы двигателей с аппаратами защиты является довольно сложной задачей и не будет детально рассматриваться в этой статье. В общем, автоматический выключатель для защиты двигателя должен иметь только магнитную защиту; магнитная уставка должна иметь такое значение, чтобы протекание пускового тока не вызывало срабатывания аппарата и, кроме того, в случае короткого замыкания в двигателе защитить контактор (коммутирующее устройство) и внешнее тепловое реле (устройство защиты от перегрузки).

АББ предлагает некоторые таблицы координации для двигателей различной мощности и разных условий пуска в зависимости от напряжения и токов короткого замыкания установки (<http://www.abb.com/lowvoltage>).

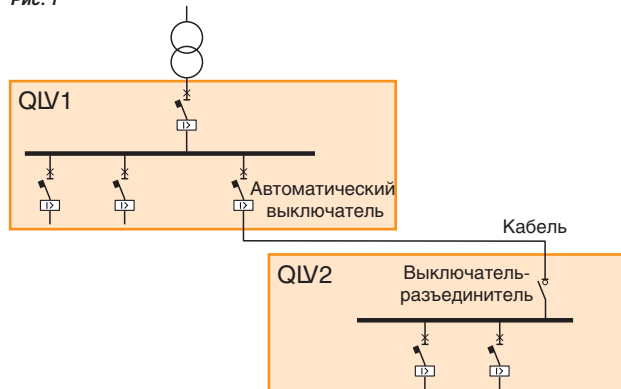
3.3 Координация между автоматическими выключателями и выключателями нагрузки-разъединителями.

Разъединение должно гарантировать выведение из работы всей электроустановки или ее части, путем ее надежного отсоединения от источника питания, таким образом, гарантируя безопасность людей, выполняющих сервисные работы. Разъединение должно осуществляться устройством, размыкающим все свои полюса за одну операцию. Что касается применений на СН, линия, входящая в подстанцию, может оснащаться выключателями-разъединителями и заземляющим разъединителем, оснащенными устройством взаимной блокировки; они используются в случае проведения сервисных работ, чтобы автоматически заземлить входящую линию при отключении разъединителя.

На стороне НН выключатель-разъединитель может быть вводным аппаратом в распределительных щитах, как показано на рис. 1. Разъединитель является коммутирующим устройством, обеспечивающим в разомкнутом состоянии определенное изоляционное расстояние между контактами. В общем, выключатель-разъединитель – это устройство позволяющее осуществлять размыкание и замыкание

цепей при небольших токах и не оснащается защитными расцепителями.

Рис. 1



Так как выключатели-разъединители не оснащаются устройствами, обеспечивающими их автоматическое размыкание, необходимо предусмотреть защитное устройство, например автоматический выключатель, чтобы защитить выключатель-разъединитель в случае короткого замыкания. Это означает, что в случае короткого замыкания, электрические явления, воздействующие на выключатель-разъединитель, обуславливаются поведением автоматического выключателя и должны быть выдержаны самим выключателем-разъединителем без ухудшения характеристик.

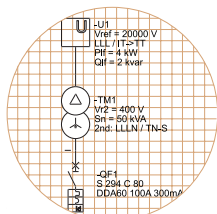
Для этих целей компанией АББ представлены некоторые таблицы; в зависимости от типа автоматического выключателя и выключателя-разъединителя, расположенного относительно него на стороне нагрузки, таблицы позволяют определить максимальный ток короткого замыкания, при котором данная комбинация аппаратов будет защищена. Таблицы 2 и 3 (взяты из пособия АББ SACE “Таблицы координации”) приведены ниже с примером, показывающим как ими пользоваться.

Выключатель в литом корпусе и выключатель-разъединитель, образованный из выключателя в литом корпусе:

Таблица 2

		Сторона питания		T1D	T3D	T4D	T5D
		Icw [kA]	Ith [A]	2	3.6	3.6	6
Сторона нагрузки	Исполнение	Icu [kA]	Iu [A]	160	250	320	400
				160	250	320	400
T1	B	16	160	16	16	16	16
	C	25		25	25	25	25
	N	36		36	36	36	36
T2	N	36	160	36	36	36	36
	S	50		50	50	50	50
	H	70		70	70	70	70
	L	85		85	85	85	85

В отношении показанной комбинации между автоматическим выключателем типа T2S160 на стороне питания и выключателя-разъединителя типа T1D160 на стороне нагрузки, защита разъединителя возможна при значениях тока до 50 кА (переменное напряжение 400 В).



Серия проектировщика

Выключатель в литом корпусе и выключатель-разъединитель ОТ или OETL

Таблица 3

		Сторона питания	OETL 200	OETL 250	OETL 315
		Icw [kA]	8	8	8
Сторона нагрузки	Расцепитель	Ith [A]	250	315	350
		Iu [A]	250	315	350
T5	TM	320	100*	100*	100*
		400	100*/***	100*	100*
		630			100***
	EL	320-630	100*/**	100*/**	100*/**

В комбинации, выделенной цветом, между автоматическим выключателем T5..400 на стороне нагрузки и выключателем разъединителем типа OETL200 защита выключателя-разъединителя обеспечивается при токах короткого замыкания до 100 кА (переменное напряжение 400 В).

Звездочкам в таблице 3 соответствуют следующие примечания:

* Следует выбирать наименьшее значение Icu между значениями для автоматического выключателя и приведенными в таблице.

Например, если выбран автоматический выключатель исполнения N с отключающей способностью Icu=36кА при 400В, то это означает, что ток короткого замыкания электроустановки должен быть ниже, чем 36кА (при использовании исполнения "N") и выключатель-разъединитель будет обязательно защищен, так как пределом защиты является 100кА. Если же был выбран автоматический выключатель исполнения L с отключающей способностью Icu = 200кА при 400В, то ток короткого замыкания в электроустановке может быть не больше 200кА, а выключатель-разъединитель будет защищен только до 100кА.

*** $I_l = 0.7 \times I$

Данное примечание относится к тепловой защите выключателя-разъединителя и означает, что максимальной уставкой тепловой защиты автоматического выключателя может быть $0.7 \times I_n$.

Аналогичное значение имеет примечание:

** Максимальная уставка по перегрузке расцепителя $PR2xx = 1.28 \times I_{th} OTxx/OETLxx$

из чего можно понять, что максимальная уставка защиты от перегрузки автоматического выключателя не должна превосходить более чем в 1.28 раз перегрузочную способность выключателя-разъединителя.

3.4 Координация между автоматическими выключателями и устройствами дифференциального тока (УДТ).

Устройства дифференциального тока обычно устанавливаются у конечных потребителей электроустановок НН, чтобы гарантировать эффективную защиту от косвенного прикосновения, т.е. прикосновения к металлическим частям, которые обычно не находятся под напряжением, а при определенных условиях и от прямого прикосновения, т.е. с частями обычно находящимися под напряжением.

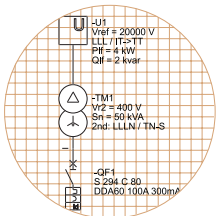
Однако, после тщательного изучения Стандартов становится понятно, что функция защиты человека от прямого и косвенного прикосновений является дополнительной функцией, выполняемой автоматическим выключателем, и электроустановка должна быть спроектирована и реализована таким образом, чтобы была гарантирована защита человека в основном благодаря подходящей системе заземления.

Поэтому металлические конструкции потребителей должны быть правильно соединены с системой заземления, чтобы избежать возможности опасных прикосновений в любой ситуации.

В электроустановках помимо обычных функций защит от перегрузки и короткого замыкания, которые обычно выполняются термоманитным автоматическим выключателем, существует хорошее правило устанавливать также и защиту от дифференциального тока.

Проще говоря, защита в электроустановках может осуществляться с помощью двух отдельных устройств (термоманитным автоматическим выключателем и устройством дифференциального тока). В таком случае УДТ является чувствительным только к токам замыкания на землю и должно устанавливаться последовательно с автоматическим выключателем, который защищает УДТ от термических и динамических воздействий, возникающих благодаря действию сверхтоков.

Также существует отдельное устройство такое, как термоманитный автоматический выключатель дифференциального тока, который сочетает в себе эти защитные функции, значительно снижая, таким образом, возможные риски, вызванные неправильной координацией двух аппаратов.



Серия проектировщика

3.5 Пример расчета сети СН/НН

Ниже приводится пример анализа электроустановки СН/НН, который имеет целью оценить основные электрические параметры сети и выбрать автоматические выключатели для защиты и правильного функционирования установки, также и с точки зрения селективности защит.

Описание характеристик установки:

Распределительная сеть:
номинальное напряжение
ток короткого замыкания

$$U_{1\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ}$$

$$I_{\text{КЗН}} = 12.5 \text{ кА}$$

Данные трансформатора подстанции следующие:

номинальное напряжение первичной обмотки: $U_{1\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ}$
номинальное напряжение вторичной обмотки: $U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$
номинальная мощность: $S_{\text{НОМТР}} = 800 \text{ кВА}$
номинальное напряжение короткого замыкания: $U_{\text{К\%}} = 5\%$

Установка обычно обеспечивает питание для различных типов нагрузок; чтобы упростить и ограничить область рассмотрения данного параграфа, рассмотрим следующие типы нагрузок:

статическая нагрузка L:

номинальная мощность
коэффициент мощности

$$S_{\text{НОМЛ}} = 300 \text{ кВт}$$

$$\cos\varphi = 0.8$$

питание осуществляется кабелем со следующими характеристиками:

сечение
длительно-допустимый ток кабеля
длина

$$2 \times (3 \times 240) \text{ мм}^2$$

$$I_z = 590 \text{ А}$$

$$L_c = 15 \text{ м}$$

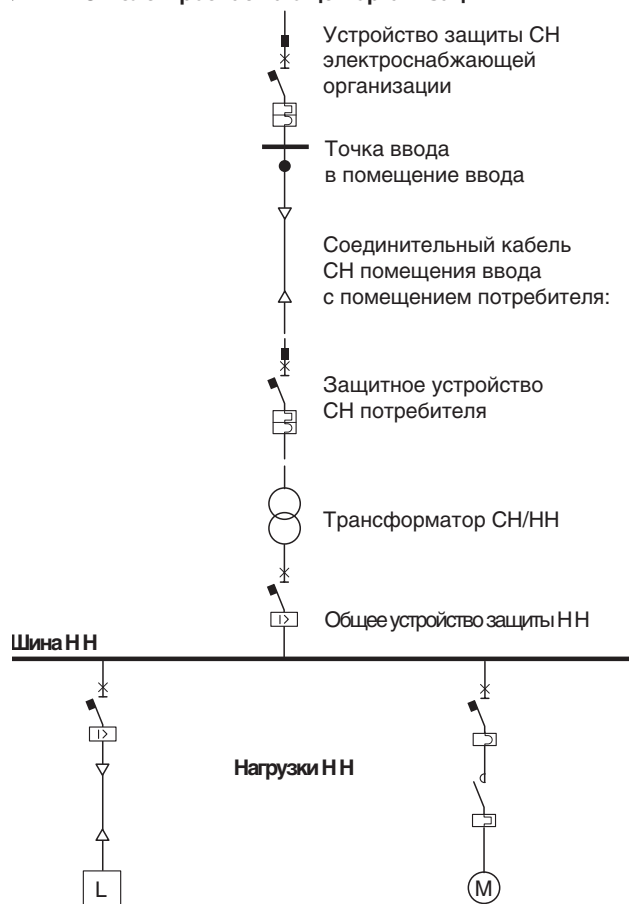
двигательная нагрузка – трехфазный асинхронный двигатель M:

номинальная мощность $P_{\text{НОМДВ}} = 90 \text{ кВт}$
коэффициент $\eta \times \cos\varphi = 0.8$
(КПД на коэффициент мощности)

Анализируемая схема выглядит следующим образом:

Рис. 2

Линия СН электроснабжающей организации

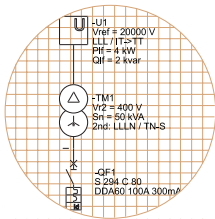


Для того, чтобы определить характеристики срабатывания защит как можно правильной, ниже приводится анализ электрических характеристик различных компонентов.

Распределительная сеть:

Начиная с источника питания, чем является электрическая сеть 20кВ, которая принадлежит электроснабжающей организации и имеет свое устройство защиты, обычно характеризуемое независимыми от времени кривыми срабатывания с двумя ступенями, следующие значения для устройства защиты электроснабжающей организации могут быть приняты при 20 кВ:

Максимальная токовая защита		
Функции защит	51 (первая ступень)	50 (вторая ступень)
Время отключения поврежденной цепи	< 0.5 с	< 0.25 с
Значения токовых уставок	< 72 А	< 400 А
Максимальный ток нулевой последовательности		
Функции защит	51 N (первая ступень)	
Время отключения поврежденной цепи	0.12 с	
Значения токовых уставок	4 А	



Серия проектировщика

Трансформатор:

Вторым элементом, влияющим на параметры электроустановки, среди всех на стороне НН является трансформатор мощностью 800 кВА, имеющий следующие значения токов обмоток:

- Ток первичной обмотки (сторона 20 кВ):

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМТП}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 20 \times 1000} = 23.1 \text{ A}$$

- Ток вторичной обмотки (сторона 400 В):

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМТП}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}} = \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = 1155 \text{ A}$$

По упрощенным формулам (например, если принять мощность короткого замыкания сети СН на стороне нагрузки бесконечной), которые дают результаты, приемлемые, как первое приближение и которые полезны для того, чтобы оценить интенсивность токов, реально возможных в электроустановках, и выбрать устройства защиты, рассчитаем токи коротких замыканий:

- ток трехфазного короткого замыкания на вторичной стороне (400 В)

$$I_{2\text{к3ф}} = \frac{S_{\text{НОМТП}}}{U_{\text{к\%}}} \times 100 \times \frac{1}{\sqrt{3} \times U_{2\text{НОМ}}} = \frac{800 \times 1000}{5} \times 100 \times \frac{1}{\sqrt{3} \times 400} = 23 \text{ кА}$$

Этому току трехфазного короткого замыкания, выраженному как действующее значение периодической составляющей, соответствует также и коэффициент мощности короткого замыкания $\cos \varphi_{\text{к}} = 0.35$ и ударное значение равное 43.6 кА.

- ток трехфазного короткого замыкания, приведенный к стороне СН, вызванный повреждением на стороне НН

$$I_{1\text{к3ф}} = \frac{S_{\text{НОМТП}}}{U_{\text{к\%}}} \times 100 \times \frac{1}{\sqrt{3} \times U_{1\text{НОМ}}} = \frac{800 \times 1000}{5} \times 100 \times \frac{1}{\sqrt{3} \times 20 \times 1000} = 462 \text{ A}$$

или можно рассчитать по следующей формуле:

$$I_{1\text{к3ф}} = \frac{I_{2\text{к3ф}} \cdot U_{2\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = \frac{23000}{20000} \cdot 400 = 460 \text{ A}$$

Функционирование трансформатора можно представить через кривую намагничивания и через способность выдерживать короткое замыкание, рассматриваемую с тепловой точки зрения.

Кривая намагничивания трансформатора может быть получена по формуле:

$$I_{\text{уд}} = \frac{K_i \cdot I_{1\text{НОМТП}}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{уд}}}}, \text{ для более подробной информации см. прил. А.}$$

Способность выдерживать короткое замыкание, рассматриваемая с тепловой точки зрения, может быть выражена, как показано в Стандарте МЭК 60076-5, через способность выдерживать ток короткого замыкания в течение 2 секунд короткого замыкания самого трансформатора.

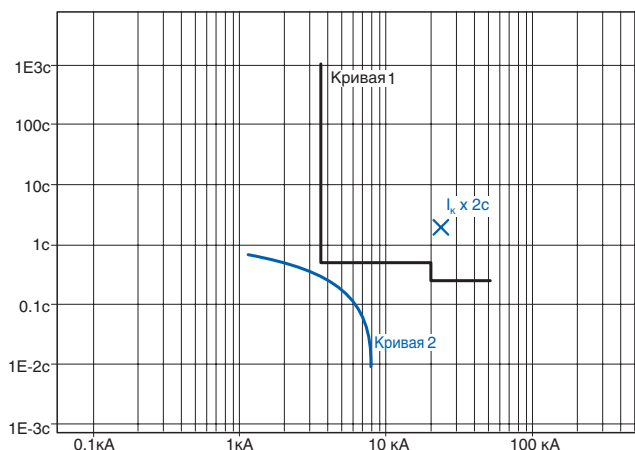
Рис. 3

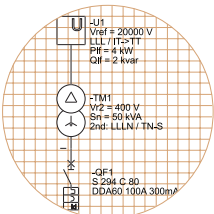
На рис. 3 показаны следующие кривые времятоковых характеристик:

Кривая 1: кривая срабатывания устройства защиты СН;

Кривая 2: характеристика электрических параметров трансформатора, описанного выше.

Все кривые представлены в соответствии с напряжением 400 В стороны НН; как следствие, значения токов, относящихся к напряжению 20 кВ стороны СН, должны быть умножены на коэффициент трансформации 20000 В/400 В.





Серия проектировщика

Статическая нагрузка L

- номинальный ток нагрузки:

$$I_{\text{НОМЛ}} = \frac{P_{\text{НОМЛ}} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\text{НОМ}} \times \cos \varphi} = \frac{300 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.8} = 541 \text{ A}$$

Двигательная нагрузка M

- номинальный ток двигателя:

$$I_{\text{НОМДВ}} = \frac{P_{\text{НОМДВ}} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\text{НОМ}} \times \eta \times \cos \varphi} = \frac{90 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.8} = 160 \text{ A}$$

- ток короткого замыкания двигателя:

$$I_{\text{кДВ}} = 4 \times I_{\text{НОМДВ}} = 4 \times 160 = 640 \text{ A}$$

Принимая во внимание значимость и ограниченную продолжительность данного явления, ток короткого замыкания, рассчитанный без учета вклада двигателя, должен рассматриваться, как ток короткого замыкания на шине.

Изучение координации и селективности защит СН и НН, находящихся в компетенции пользователя, можно начать с анализа характеристик и кривых срабатывания, установленных электроснабжающей организацией (кривая 1). Данная информация, как уже было сказано, обычно представляется в контрактном соглашении и определяет верхнюю границу настроек устройства СН потребителя по отношению к стороне питания.

По отношению к стороне нагрузки предел настроек защит СН потребителя определяется формой волны тока намагничивания трансформатора (кривая 2).

Рассматривая установку потребителя, имеющую устройство защиты СН, если соединительный кабель имеет такую длину, что трансформатор находится в том же помещении, то устройства защиты СН могут выполнять функции защиты от максимального тока (51) и защиту от максимального тока нулевой последовательности (51 N).

Устройство защиты СН потребителя (СН_{потр})

Защита от сверхтока на стороне СН потребителя обычно имеет два порога срабатывания:

- первый при малых токах может быть идентифицирован как защита от перегрузки и обозначается символом I>;
- второй при больших токах может быть идентифицирован как защита от короткого замыкания и обозначается символом I>>.

Уставки по времени и по току для каждого порога должны устанавливаться ниже характеристики устройства электроснабжающей организации; также важно не выставить слишком низкие уставки, в результате чего можно получить пересечение с кривой намагничивания трансформатора и срабатывание устройства во время введения трансформатора в работу. Также важно следить за тем, чтобы оставалось пространство для размещения кривых срабатывания устройства НН.

Конечно, это означает, что устройство СН_{потр} будет селективно с вышестоящим устройством электроснабжающей

организации и нижестоящим общим устройством НН, гарантируя также выполнение необходимых функций.

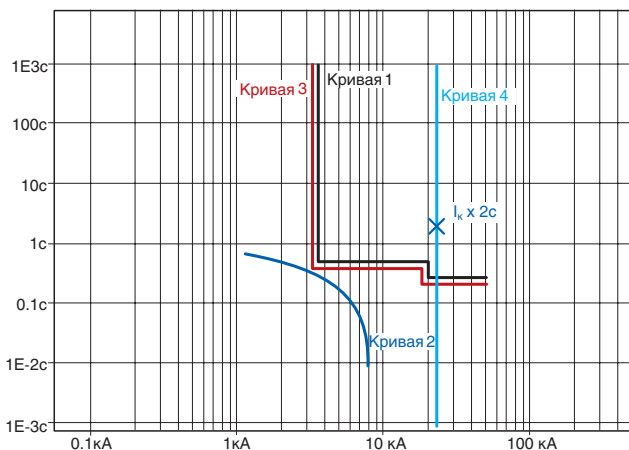
В общем, к двум вышеупомянутым пороговым значениям срабатывания для устройства СН_{потр} можно отнести следующие защитные функции:

- защита от перегрузки трансформатора, которая не является крайне необходимой, если она уже предусмотрена на стороне НН или обеспечивается другими устройствами, такими как, например, термометрическое оборудование, контролирующее температуру внутри трансформатора с помощью термодатчиков;
- защита от короткого замыкания на вторичной стороне трансформатора на стороне питания автоматического выключателя НН;
- защита от короткого замыкания на стороне СН на участке, находящемся в компетенции потребителя, с мгновенным срабатыванием;
- защита от перегрузки кабеля, соединяющего точку ввода в помещении ввода и защитное устройство СН_{потр}.

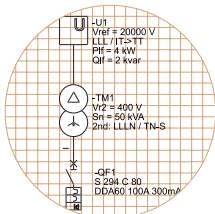
Пытаясь выполнить описанные выше условия, приведем пример значений уставок устройства СН_{потр}. Выбранные значения могут быть следующими и образовывать кривую 3, представленную на диаграмме рисунка 4.

порог срабатывания для низких токов I>
65 A – 0.4сек, приведен к напряжению 20 кВ,
что соответствует $65 \times 20000 / 400 = 3250 \text{ A}$ на стороне НН
порог срабатывания для больших токов I>>
360 A – 0.2сек, приведен к напряжению 20 кВ,
что соответствует $360 \times 20000 / 400 = 18 \text{ kA}$ на стороне НН

Рис. 4



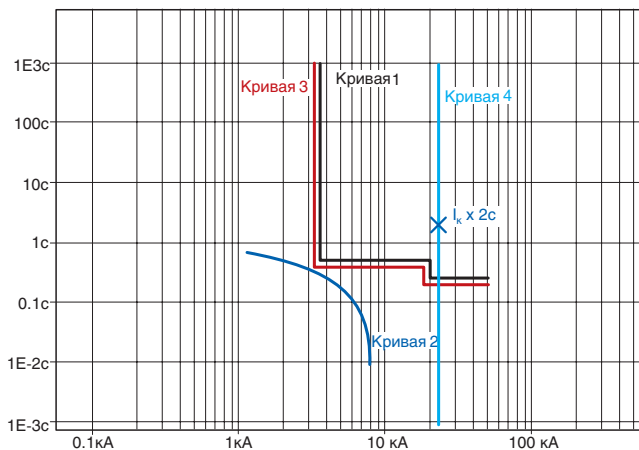
Если сопоставить кривые защитных устройств с соответствующими токами короткого замыкания, то



Серия проектировщика

получим диаграмму, представленную на рис. 5, где кривая 4 отражает значение тока короткого замыкания на стороне НН, воздействующего на устройства СН.

Рис. 5



Из расположения времятоковых кривых получается следующее:

- кривые срабатывания устройства электроснабжающей организации (кривая 1) и потребителя (кривая 3), не пересекаются на всем токовом диапазоне и соотносятся определенным образом с током короткого замыкания на стороне вторичной обмотки (кривая 4). Поэтому, если не учитывать разбросы характеристик, свойственные устройствам любого типа, то можно сказать, что в данном примере селективность между этими двумя устройствами обеспечивается. Если бы селективности не было, то оба устройства СН срабатывали бы одновременно, а выключатель СН электроснабжающей организации включился бы повторно и оставался бы во включенном состоянии, т.к. поврежденная цепь была бы отключена выключателем СН_{потр.}
- характеристики обоих выключателей СН не пересекаются с кривой намагничивания трансформатора.

Благодаря этим рассмотрениям, кривые защиты СН теперь могут быть выбраны должным образом, и можно затем продолжить выбор и настройку устройств НН.

Общее устройство защиты НН

По отношению к уже определенным значениям токов короткого замыкания ($I_{2к3ф} = 23$ кА, $I_{уд} = 43.6$ кА) и к значению номинального тока вторичной обмотки трансформатора ($I_{2ном} = 1155$ А) общий автоматический выключатель НН должен иметь:

- отключающую способность " I_{cu} ", приведенную к стороне НН, большую, чем действующее значение тока короткого замыкания на шине НН ($I_{cu} > I_{2к3ф}$);

- включающую способность " I_{cm} " выше, чем ударное значение тока короткого замыкания на шине НН ($I_{cm} > i_{уд}$);
- номинальный длительный ток " I_n ", подходящий для максимального тока электроустановки, и сопоставимый с номинальным током вторичной обмотки трансформатора;
- размер, который при правильных настройках гарантирует селективность с устройствами СН на стороне питания и с автоматическими выключателями на стороне нагрузки.

В соответствии с рассчитанными параметрами, можно выбрать автоматический выключатель в литом корпусе серии Tmax T7S1250 PR332-LSI In1250, с $I_{cu} = 50$ кА при 400 В и $I_{cm} = 105$ кА.

Защитное устройство для статической нагрузки L

Выбор данного устройства должен осуществляться с учетом:

- тока короткого замыкания в точке установки; т.к. ограничение вызванное кабелем пренебрежимо мало, можно пользоваться значением тока короткого замыкания на шине НН без учета кабеля. Поэтому $I_{2к3ф} = 23$ кА и I_{cu} должен быть $> I_{2к3ф}$;
- номинального длительного тока " I_n ", соответствующего максимальному току нагрузки;
- размера, который при правильных настройках обеспечивает защиту кабеля по следующим условиям:
 - от перегрузки $I_B \leq I_1 \leq I_{Z1}$;
 - от короткого замыкания $K^2 S^2 \geq I^2 t$.

Следуя этим условиям, выбираем автоматический выключатель в литом корпусе серии Tmax T5N630 PR221DS-LS/I In630.

Устройство защиты активной нагрузки M (двигатель)

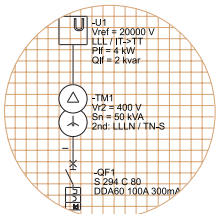
Чтобы выбрать устройство для пуска двигателя, требуется анализ различных факторов, поэтому ABB SACE предоставляет таблицы координации двигателей в соответствии с различными типами пуска.

В данном случае мы рассматриваем нормальный прямой пуск типа 2, и подставляя в таблицу 400 В 35 кА, выбираем следующие аппараты:

автоматический выключатель: T3N250 MA 200 I3=2400A
 контактор: A185
 тепловое реле: TA200DU200

На данном этапе после выбора автоматических выключателей для нагрузок рассмотрим автоматический выключатель наибольшего размера в целях проверки обеспечения селективности с главным автоматическим выключателем НН.

Используя таблицы координации при 400В (см. фрагмент, представленный в Таблице 4), для



Серия проектировщика

комбинации T7S1250 PR332-LSI In1250 — T5N 630 PR221DS-LS/In630 обеспечивается полная селективность (обозначается буквой "Т") вплоть до наименьшего значения отключающей способности среди этих двух выключателей, которая равна 36кА для T5N.

Таблица 4

		Сторона нагрузки		T6		T7			
		Исполнение		N,S,H,L		S,H,L			
Сторона питания		Расцепитель	I _u [A]	800		1250		1600	
				TM	EL	EL			
			I _n [A]	800	800	1000	1250	1600	
T5	N, S, H, L, V	TM	400	320	30	30	T	T	T
				400	30	30	T	T	T
			630	500		30	T	T	T
				630			T	T	T
		EL	400	320	30	30	T	T	T
				400	30	30	T	T	T
			630	630			T	T	T

После того, как размеры автоматических выключателей были определены, следует провести более детальное изучение, чтобы определить правильные настройки и найти подтверждение сделанного выбора.

Первым этапом является анализ настроек главного автоматического выключателя НН. Защитные уставки данных устройств обуславливаются следующими факторами:

- поведение кривой 3, предварительно определенной для автоматического выключателя $CH_{потр}$;
- защита трансформатора от перегрузки;
- обеспечение селективности с нижестоящими выключателями.

В частности, в соответствии с пунктом "б" должны выполняться следующие условия:

- время срабатывания, соответствующее току короткого замыкания меньше 2 секунд (тепловая способность трансформатора противостоять короткому замыканию);
- настройки защиты от перегрузки должны быть сделаны с учетом факта, предписываемого Стандартом МЭК 60947-2 (ГОСТ 50030.2) для автоматических выключателей, характеристики срабатывания которых в условиях перегрузки должны иметь следующие свойства:
 - из холодного выключатель не должен срабатывать за время не меньшее установленного времени (2 часа) при токе равном $1.05 \times I_1$ (где I_1 ток уставки защиты);
 - из горячего состояния выключатель должен срабатывать за время не большее установленного времени (2 часа) при токе равном $1.3 \times I_1$;

- для значений токов в диапазоне от 1.05 до 1.3 от I_1 поведение автоматических выключателей Стандартом не предписывается, даже если обычно срабатывание автоматического выключателя происходит в течение неопределенного времени.

В соответствии с таким поведением, которое принято Стандартом на изделия, если уставка защитного расцепителя имеет значение $I_1 = I_{2ном}$ трансформатора, то ситуация должна быть следующей:

- $I < 1.05 \times I_1$: несрабатывание гарантировано, при возможной перегрузке трансформатора в 5%;
- $1.05 \times I_1 < I < 1.3 \times I_1$: время срабатывания неопределенно, и в соответствии с наихудшим предположением, возможна 30% перегрузка трансформатора в течение 2 часов (хотя обычно автоматические выключатели срабатывают за гораздо меньшее время);
- $I > 1.3 \times I_1$: защита гарантируется в соответствии с кривыми срабатывания.

Что касается пункта "в", то для того, чтобы достичь предварительно определенного значения селективности необходимо, чтобы функция защиты от короткого замыкания с мгновенным срабатыванием I_3 была отключена.

Основываясь на этих рассуждениях, на рис. 6 представлена времятоковая диаграмма, показывающая, как кривые 5 и 3 являются селективными.

L (защита от перегрузки; уставка I_1 -t1):

$$I_1 = 0.925 \times I_n = 1156.25 \text{ A}$$

$$t_1 = 18 \text{ сек}$$

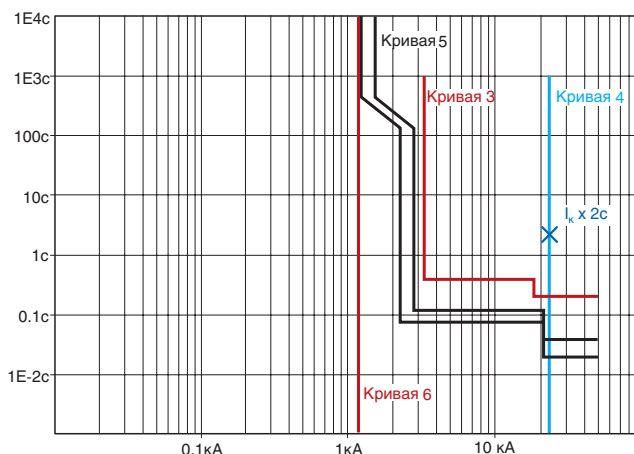
S (защита от короткого замыкания с задержкой; уставка I_2 -t2):

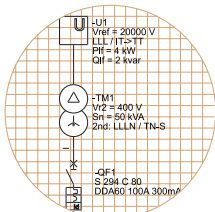
$$I_2 = 2 \times I_n = 2500 \text{ A}$$

$$t_2 = 0.1 \text{ сек}$$

I (мгновенная защита от короткого замыкания; уставка I_3): Выкл.

Рис. 6



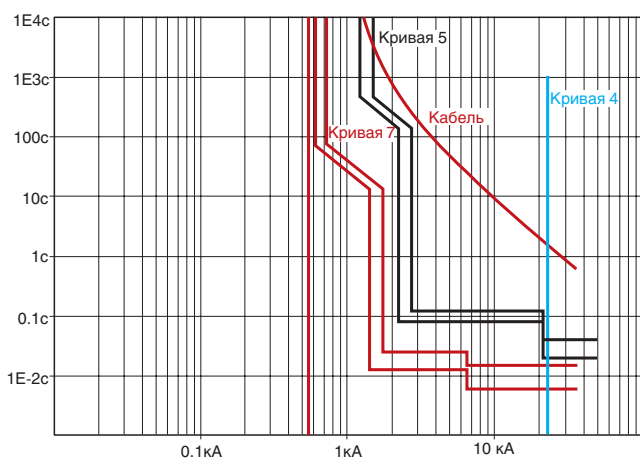


Серия проектировщика

Определив кривую срабатывания главного устройства защиты НН, проанализируем возможные уставки для автоматического выключателя статической нагрузки. Как уже говорилось, должна обеспечиваться защита соответствующего кабеля и не должно быть пересечений с кривой главного устройства НН.

Основываясь на этих условиях, на рис. 7 представлена времятоковая диаграмма, из которой получается, что кривая кабеля лежит выше кривой 7 соответствующего автоматического выключателя и что не существует точек пересечения между кривыми двух устройств НН.

Рис. 7



По этой диаграмме настройки рассматриваемого выключателя следующие:

- L (защита от перегрузки; уставка I1-t1):
0.88xIn=554.4 A Кривая: 3сек
- S (защита от короткого замыкания с задержкой; уставка I2-t2):
отсутствует
- I (мгновенная защита от короткого замыкания; уставка I3):
2.5xIn=1575 A

Защиты от замыканий на землю

Рассмотрим принципы защиты от замыканий на землю. В случае если защита от замыкания на землю на нейтральной точке звезды трансформатора отсутствует, то защита от сверхтоков на стороне СН трансформатора также удовлетворяет требованиям защит от замыкания фазы на землю на вторичной стороне, как если бы это был общий автоматический выключатель НН.

Для обычных трансформаторов со схемой соединения $\Delta/Y_{\text{н}}$ при возникновении замыкания фазы на землю на стороне НН сразу за трансформатором, возникнет ток короткого замыкания на стороне СН в $\sqrt{3}$ раз меньший, чем рассчитанный ток трехфазного короткого замыкания.

Если повреждение возникает на стороне питания устройства защиты НН, то уставки защитного расцепителя должны иметь подходящие значения для того, чтобы сработало устройство СН_{потр} при возникновении такого повреждения.

В соответствии с этими условиями и при учете предварительно рассчитанного тока короткого замыкания можно определить ток замыкания на вторичной стороне, но воздействующий на автоматический выключатель СН:

$$I_{2\text{кФ-PE}} = \frac{I_{2\text{к}} \times 1000}{\sqrt{3}} = \frac{23 \times 1000}{\sqrt{3}} = 13.28 \text{ кА}$$

Так как первый порог устройства СН_{потр}, приведенный к напряжению 400 В, был установлен на 3250 А, то это означает, что защита будет срабатывать при замыкании фазного проводника на землю на стороне НН.

На стороне СН через коэффициент трансформации получим:

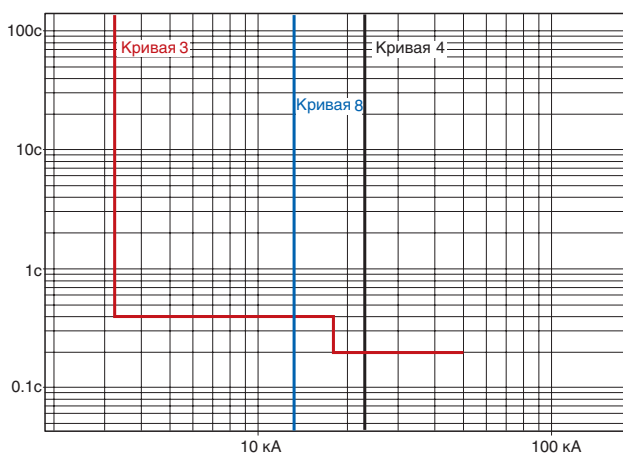
$$I_{1\text{кФ-PE}} = \frac{I_{2\text{кФ-PE}}}{K} = \frac{13280}{50} = 265.6 \text{ А}$$

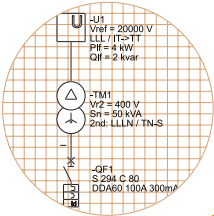
что должно сопоставляться с первым пороговым значением срабатывания автоматического выключателя СН, равным 65 А.

На рис. 8 представлена диаграмма, где:

кривая 4 – показывает величину тока трехфазного короткого замыкания на стороне НН;
кривая 8 – ток, приведенный к стороне НН, который воздействует на выключатель СН (значение кривой 4, деленное на $\sqrt{3}$);
кривая 3 – приведенная к стороне СН времятоковая характеристика автоматического выключателя СН_{потр}, из которой можно определить время срабатывания.

Рис. 8



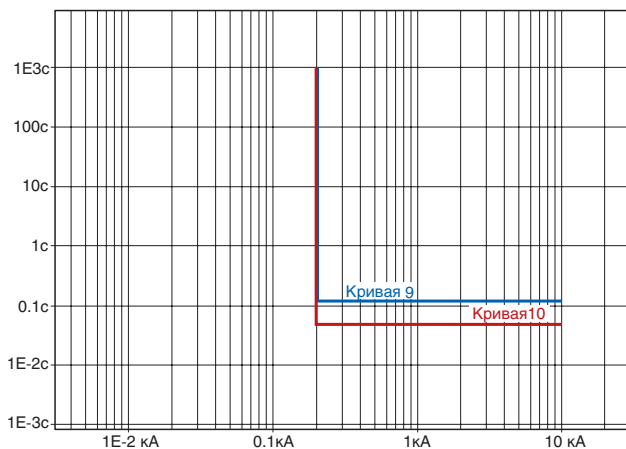


Серия проектировщика

Если присутствует защита нулевой последовательности, то ее порог срабатывания должен быть ниже порога функции 51N, определяемого электроснабжающей организацией и заявленного в соглашении на электрическое присоединение. Данное значение было установлено на 4 A 0.12 сек; поэтому характеристика устройства $CH_{\text{потр}}$ могла бы быть настроена на: 4 A 0.05 сек.

При таких настройках получим кривые, показанные на диаграмме рис. 9. Данная диаграмма соответствует напряжению 400 В. В частности, кривая 9 показывает пороговое значение срабатывания, установленное электроснабжающей организацией, а кривая 10 – порог срабатывания защиты нулевой последовательности.

Рис. 9

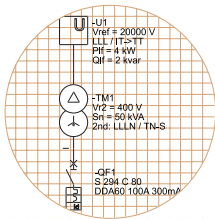


Очевидно, что такое поведение двух устройств защиты должно изучаться в соответствии с током замыкания на землю, заданным электроснабжающей организацией. Данная величина сильно зависит от того, скомпенсирована нейтраль или изолирована, но в любом случае она должна быть выше порога срабатывания, установленного электроснабжающей организацией.

Если режим нейтрали меняется, то необходимо перепроверить методы защиты, задействованные в линии для обнаружения однофазного тока замыкания на землю.

Для направленной защиты от замыкания на землю используются принципы изменения модуля и фазы электрических параметров (напряжение нулевой последовательности и ток), которые появляются при повреждении:

- ток нулевой последовательности, обнаруживается тороидальным трансформатором тока, измеряющим сумму трехфазных токов.
- первая обнаруживает повреждение в сети, работающей с заземленной нейтралью через сопротивление;
- вторая обнаруживает повреждение в сети, работающей при изолированной нейтрали (ситуация возможная в крайне небольшие периоды времени, например, во время обслуживания или возникновения повреждений).
- напряжение нулевой последовательности (напряжение между центральной точкой трансформатора звезды и землей), которое измеряется фазными трансформаторами напряжения с вторичными обмотками, соединенными в треугольник, в цепи которого измеряется сумма трехфазных напряжений;



Серия проектировщика

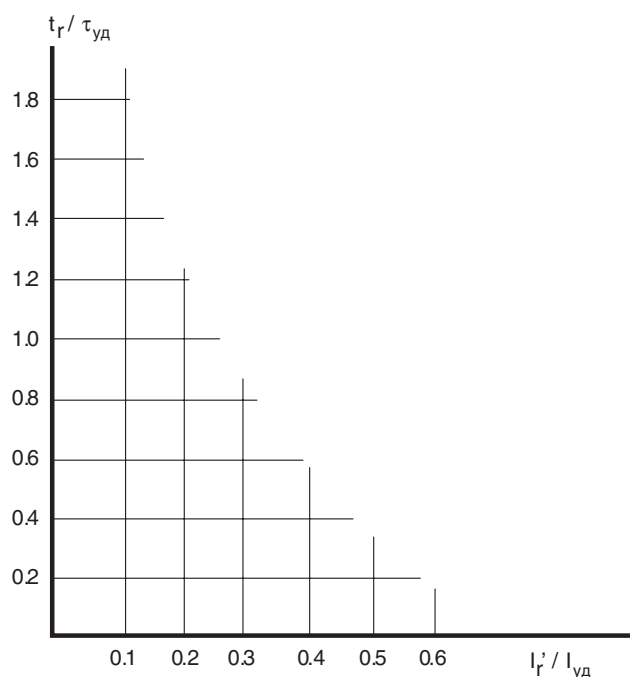
Приложение А

Расчет ударного тока трансформатора

Ниже приводятся некоторые правила оценки тока намагничивания трансформатора, который появляется при введении трансформатора в работу и который воздействует на устройство защиты на стороне СН. Для того, чтобы определить минимальные задержки по времени, необходимые для предотвращения нежелательных

срабатываний устройств защиты со стороны питания трансформатора, здесь приводится приблизительный метод, основанный на использовании таблиц 1 и 2, а также диаграммы на рис.1.

Рис. 1



Где:

$S_{\text{номТР}}$ номинальная мощность трансформаторов;

$i_{\text{рударн}}$ ударный ток трансформаторов;

$I_{1\text{номТР}}$ номинальный ток первичной обмотки трансформаторов;

$t_{\text{ударн}}$ постоянная времени ударного тока.

На диаграмме рис. 1 показана кривая, отделяющая области возможного срабатывания устройства защиты (слева от кривой) и гарантированного несрабатывания (справа от кривой).

t_r = уставка времени задержки;

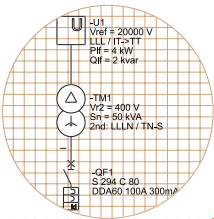
I_r' = порог срабатывания (приведенный к первичной обмотке).

Таблица 1: Масляный трансформатор

$S_{\text{номТР}}$ [кВА]	$K_i = \frac{I_{\text{уд}}}{I_{1\text{номТР}}}$	$\tau_{\text{уд}}$ [сек]
50	15	0.10
100	14	0.15
160	12	0.20
250	12	0.22
400	12	0.25
630	11	0.30
1000	10	0.35
1600	9	0.40
2000	8	0.45

Таблица 2: Трансформатор с литой изоляцией

$S_{\text{номТР}}$ [кВА]	$K_i = \frac{I_{\text{уд}}}{I_{1\text{номТР}}}$	$\tau_{\text{уд}}$ [сек]
200	10.5	0.15
250	10.5	0.18
315	10	0.2
400-500	10	0.25
630	10	0.26
800-1000	10	0.3
1250	10	0.35
1600	10	0.4
2000	9.5	0.4



Серия проектировщика

Пример:

Рассмотрим пример с масляным трансформатором, номинальная мощность которого $S_{\text{номТР}} = 630$ кВА и номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1\text{ном}} = 10$ кВ. В результате расчета получим номинальный ток первичной обмотки трансформатора $I_{1\text{номТР}} = 36.4$ А.

Учитывая номинальную мощность $S_{\text{номТР}}$ трансформатора, по таблице 1 получим значения $k_i = 11$ и $\tau_{\text{уд}} = 0.30$ сек.

Используя k_i , найдем максимальное значение ударного тока $I_{\text{уд}} = 36.4 \cdot 11 = 400$ А

Если принять порог срабатывания защиты $I_r' = 40$ А, то получим:

$$\frac{I_r'}{I_{\text{уд}}} = \frac{40}{400} = 0.1$$

а в соответствии с кривой на рис. 1 найдем:

$$\frac{t_r}{\tau_{\text{уд}}} = 1.82$$

в результате рассчитаем $t_r = 1.82 \cdot 0.30 = 0.546$ сек, что означает минимальную временную задержку устройства защиты СН, чтобы избежать нежелательных срабатываний.

Учет явления тока намагничивания должен осуществляться также и для трансформаторов НН/НН, но в данном случае рассматриваются защитные характеристики выключателя НН.

Применяя ниже следующую формулу, можно проследить кривую изменения тока намагничивания во времени и ее взаимодействие с автоматическим выключателем НН:

$$I_{\text{уд}} = \frac{k_i \cdot I_{1\text{номТР}}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{уд}}}}$$

Если электрические величины, представленные в формуле,

не указаны производителем, то они могут быть взяты из представленных таблиц.

Различные параметры имеют одинаковые значения.

Рассмотрим трансформатор НН/НН и соответствующий выключатель НН на стороне питания.

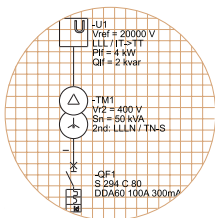
По уже заданным параметрам, которые определяются номинальной мощностью трансформатора, по данной формуле найдем кривую намагничивания, показанную на диаграмме рис. 2.

На той же диаграмме показана кривая срабатывания автоматического выключателя на стороне питания трансформатора.

Смысл диаграммы – показать, что характеристики магнитной защиты (функции “L” и “I”) не должны пересекаться с кривой намагничивания, и как характеристика защитной функции “L” должна располагаться относительно номинального тока первичной обмотки трансформатора.

Рис. 2





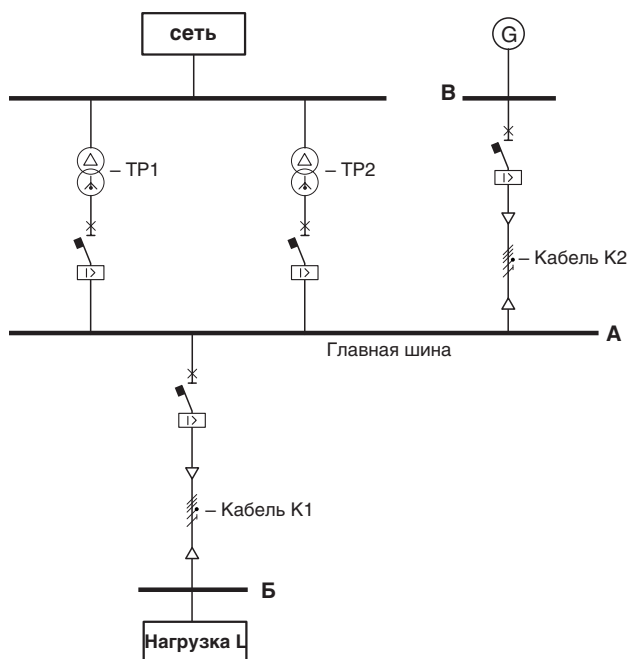
Серия проектировщика

Приложение Б

Пример расчета тока короткого замыкания

Изучение токов короткого замыкания является одной из классических проблем, с которой сталкиваются инженеры-проектировщики. Знание значений этих токов является необходимым для правильного выбора линий и трансформаторов, но прежде всего защитных устройств. Если нет необходимости в точном анализе, учитывающем электромагнитные и электромеханические переходные процессы, то изучение токов короткого замыкания является довольно несложной задачей с концептуальной точки зрения, так как оно основывается на нескольких принципах, которые, однако, необходимо понимать и правильно использовать. Но такое изучение может быть более сложным с расчетной точки зрения, например, если сеть имеет уникальные параметры, если сеть кольцевая, или если иметь дело с несимметричными повреждениями. Здесь приводится пример расчета токов короткого замыкания с использованием сначала точного метода, основанного на теории симметричных составляющих, а затем с использованием менее точного метода, называемого "методом мощностей".

Рис. 1



Данные электроустановки

Ниже приводятся заданные электрические данные элементов цепи:

Питающая сеть (сеть)

$V_{1НОМ} = 20 \text{ кВ}$	номинальное напряжение
$f = 50 \text{ Гц}$	номинальная частота
$S_k = 750 \text{ МВА}$	мощность короткого замыкания сети
$\cos\varphi_k = 0.2$	коэффициент мощности в условиях короткого замыкания

Трансформаторы TP1-TP2

$V_{1НОМ} = 20 \text{ кВ}$	номинальное напряжение
$V_{2НОМ} = 400 \text{ В}$	номинальное напряжение
$S_{НОМ} = 1600 \text{ кВА}$	номинальная мощность
$V_{K\%} = 6 \%$	падение напряжения в процентах при коротком замыкании
$p_{K\%} = 1 \%$	номинальные потери в процентах

Генератор G

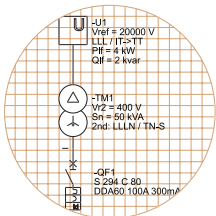
$V_{2НОМ} = 400 \text{ В}$	номинальное напряжение
$S_{НОМ} = 1250 \text{ кВА}$	номинальная полная мощность
$\cos\varphi_{НОМ}$	номинальный коэффициент мощности
$x''_{d\%} = 14 \%$	сверхпереходное реактивное сопротивление в процентах, продольная ось
$x''_{q\%} = 20 \%$	сверхпереходное реактивное сопротивление в процентах, поперечная ось
$x'_{d\%} = 50 \%$	синхронное переходное реактивное сопротивление в процентах
$x_{d\%} = 500 \%$	синхронное реактивное сопротивление в процентах
$x_{2\%} = 17 \%$	реактивное сопротивление обратной последовательности при коротком замыкании в процентах
$x_{0\%} = 9 \%$	реактивное сопротивление нулевой последовательности в процентах
$T''_d = 40 \text{ мс}$	сверхпереходная постоянная времени
$T'_d = 600 \text{ мс}$	переходная постоянная времени
$T_a = 60 \text{ мс}$	постоянная времени статора (якоря) (т.е. ее однонаправленная составляющая)

Кабель C1

Длина $L = 50 \text{ м}$	
Сечение: $3 \times (2 \times 185) + 3 \times (2 \times 95) + G185$	
$R_{F1} = 2.477 \text{ мОм}$	активное сопротивление фазы
$X_{F1} = 1.850 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление фазы
$R_{n1} = 4.825 \text{ мОм}$	активное сопротивление нейтрали
$X_{n1} = 1.875 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление нейтрали
$R_{PE1} = 4.656 \text{ мОм}$	активное сопротивление защитного проводника PE
$X_{PE1} = 1.850 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление защитного проводника PE

Кабель C2

Длина $L = 15 \text{ м}$	
Сечение: $3 \times (2 \times 500) + 3 \times (2 \times 300) + G500$	
$R_{F2} = 0.2745 \text{ мОм}$	активное сопротивление фазы
$X_{F2} = 1.162 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление фазы
$R_{n2} = 0.451 \text{ мОм}$	активное сопротивление нейтрали
$X_{n2} = 1.177 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление нейтрали
$R_{PE2} = 0.517 \text{ мОм}$	активное сопротивление защитного проводника PE
$X_{PE2} = 1.162 \text{ мОм}$	реактивное сопротивление защитного проводника PE



Серия проектировщика

Б1 Метод симметричных составляющих

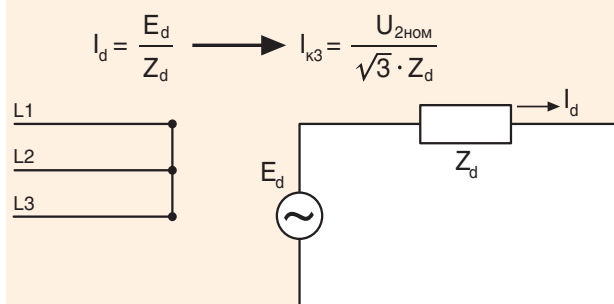
Данный метод основан на принципе того, что любой набор трех векторов может быть вычислен, как три набора векторов:

- сбалансированный набор прямой последовательности, образованный тремя векторами, равными по величине, сдвинутыми друг относительно друга на 120° и имеющими такую же последовательность фаз, что и начальная система;
- сбалансированный набор обратной последовательности, образованный тремя векторами, равными по величине, сдвинутыми друг относительно друга на 120° и имеющими обратную последовательность фаз, относительно начальной системы;
- нулевая последовательность, образованная тремя векторами, равными по величине и совпадающими по фазе.

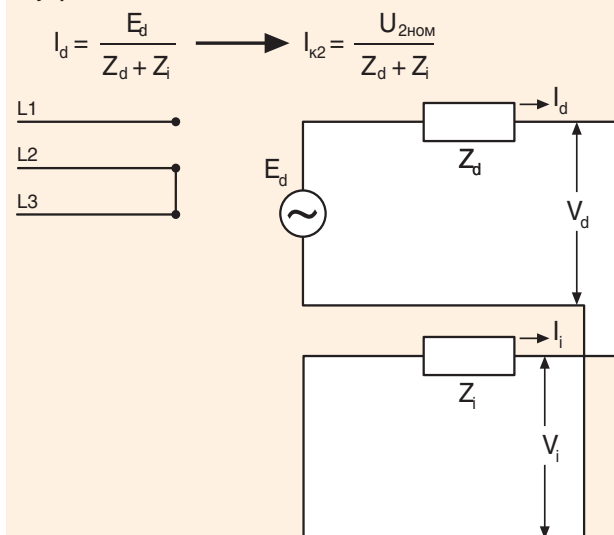
Основываясь на этом принципе, общая несимметрия и несбалансированность трехфазной системы может быть снижена путем раздельного изучения эквивалентных трехфазных систем, которые относятся соответственно к положительной, отрицательной и нулевой последовательностям.

Последовательность сопротивлений может быть найдена

Трехфазное замыкание



Двухфазное замыкание



путем замены компонентов сети эквивалентными цепями для этой последовательности. Что касается прямой и отрицательной последовательностей, эквивалентные цепи практически не отличаются при отсутствии роторных машин. Если же такие машины присутствуют (асинхронные двигатели и синхронные генераторы), то эквивалентные сопротивления положительной и отрицательной последовательностей значительно отличаются. Сопротивления нулевой последовательности также сильно отличаются от предыдущих и зависят от состояния нейтрали.

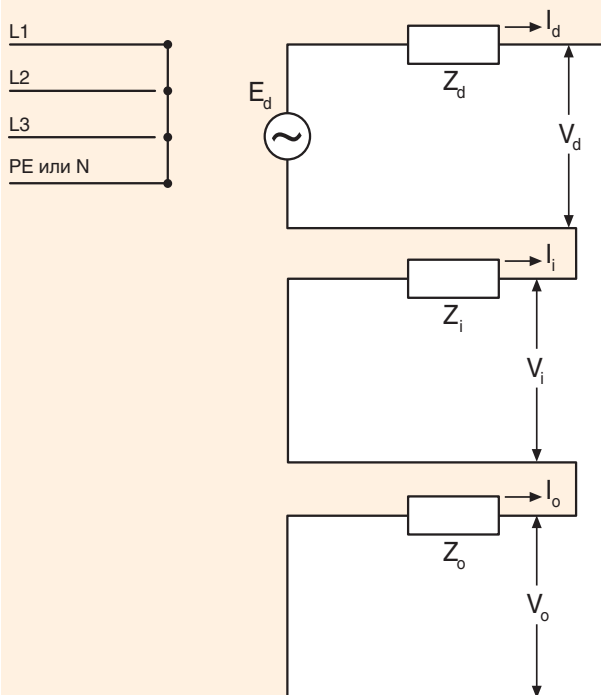
Не вдаваясь в подробности теоретической обработки, ниже мы показываем, как цепи прямой, обратной и нулевой последовательностей представляют трехфазное, двухфазное замыкания, а также замыкание на землю и соответствующие формулы для расчета токов замыкания. Данная схематизация может быть полезной для понимания расчета.

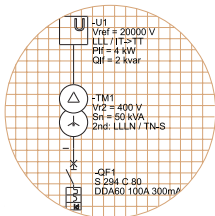
Замыкание на землю

$$I_d = \frac{E_d}{(Z_d + Z_i + Z_0)} \longrightarrow I_{k1(F-PE)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2НОМ}}{Z_d + Z_i + Z_0(F-PE)}$$

Однофазное замыкание

$$I_d = \frac{E_d}{(Z_d + Z_i + Z_0)} \longrightarrow I_{k1(F-N)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2НОМ}}{Z_d + Z_i + Z_0(F-N)}$$





Серия проектировщика

Типология схемы, представленная одной линией на диаграмме рис. 1, может являться важной промышленной установкой, в которой для упрощения рассматривается единственный отходящий кабель. Принимается во внимание только статическая нагрузка, и не учитывается также пренебрежимо малый вклад двигателей в ток короткого замыкания (выполняется условие $\sum I_{номдв} \leq I_k / 100$, предписываемое Стандартом МЭК 60909, где $I_{номдв}$ – номинальный ток различных двигателей, а I_k – начальное значение тока короткого замыкания на шине без учета вклада двигателей).

Значения полных сопротивлений цепей последовательности для расчета токов повреждений могут быть получены из представленных выше данных. Смысл индексов следующий:

- d составляющая прямой последовательности;
- i составляющая обратной последовательности;
- o составляющая нулевой последовательности.

Питающая сеть

Параметрами прямой и обратной последовательностей сопротивлений сети, приведенными к напряжению 400 В, являются:

$$Z_{дсети} = Z_{исети} = \frac{U_{2ном}^2}{S_k} = 2.133 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$R_{дсети} = R_{исети} = Z_{дсети} \cdot \cos \varphi_k = 4.266 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$X_{дсети} = X_{исети} = X_{дсети} \cdot \sin \varphi_k = 2.090 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Сопротивление нулевой последовательности сети не учитывается, так как обмотки трансформатор, соединенные в треугольник не пропускают нулевой последовательности.

Трансформаторы TP1-TP2

Рассматриваются трансформаторы классического типа треугольник/звезда с заземленной нейтралью ($\Delta/Y_{\text{зем}}$), которые позволяют получить на стороне НН распределительную систему типа TN-S.

Значения сопротивлений всех (o-d-i) будут одинаковы:

$$Z_{дТР} = Z_{иТР} = Z_{oТР} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_{2ном}^2}{S_{ном}} = 0.006 \text{ Ом}$$

$$R_{ТР} = \frac{p_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_{2ном}^2}{S_{ном}} = 0.001 \text{ Ом}$$

$$X_{ТР} = \sqrt{Z_{дТР}^2 - R_{дТР}^2} = 5.916 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Генератор G

В данном примере учитывается только сверхпереходное значение реактивного сопротивления, определяющее максимальное значение тока короткого замыкания для генератора.

Действительная часть выражения сопротивления последовательностей o-d-i:

$$R_G = \frac{X_d'}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_a} = 9.507 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Мнимая часть выражения сопротивления прямой последовательности:

$$X_d' = \frac{x_d' \%}{100} \cdot \frac{U_{2ном}^2}{S_{ном}} = 0.018 \text{ Ом}$$

Мнимая часть выражения сопротивления обратной последовательности:

$$X_2 = \frac{x_2 \%}{100} \cdot \frac{U_{2ном}^2}{S_{ном}} = 0.022$$

где x_2 – параметр генератора, указываемый производителем. Также мнимая часть обратной последовательности может быть вычислена, как среднее арифметическое значение сверхпереходных реактивных сопротивлений продольной и поперечной осей:

$$X_i = \frac{X_d' + X_q'}{2}$$

Мнимая часть выражения сопротивления нулевой последовательности:

$$X_o = \frac{x_o \%}{100} \cdot \frac{U_{2ном}^2}{S_{ном}} = 0.0115 \text{ Ом}$$

Поэтому:

$$Z_{dG} = R_G + i \cdot X_d' \quad Z_{iG} = R_G + i \cdot X_2 \quad Z_{oG} = R_G + i \cdot X_o$$

Кабели K1-K2

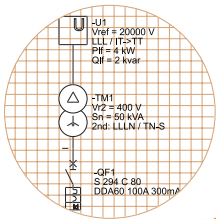
$$Z_{дC..} = Z_{иC..} = R_{\Phi} + i \cdot X_{\Phi}$$

$Z_{o(\Phi-N)C..} = (R_{\Phi} + 3 \cdot R_{N..}) + i \cdot (X_{\Phi} + 3 \cdot X_{N..})$
сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на нейтраль

$Z_{o(\Phi-PE)C..} = (R_{\Phi} + 3 \cdot R_{PE..}) + i \cdot (X_{\Phi} + 3 \cdot X_{PE..})$
сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на PE

Определив все значения сопротивлений последовательностей различных компонентов установки, можно провести анализ различных случаев повреждений.

В соответствии со схемой рис.1, рассчитаем значения токов повреждений в трех обозначенных точках А-Б-В в случае возникновения различных типов повреждений.



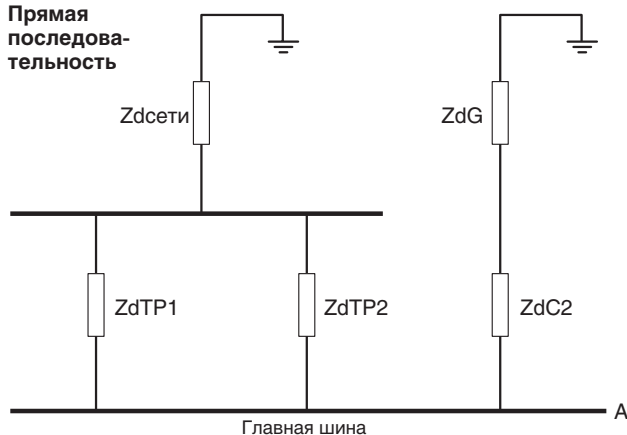
Серия проектировщика

Также в соответствии со схемой рис. 1 цепи последовательностей сопротивлений, соединенных последовательно и параллельно, изображены так, как если бы наблюдатель находился бы в точке повреждения и смотрел в сторону источника питания.

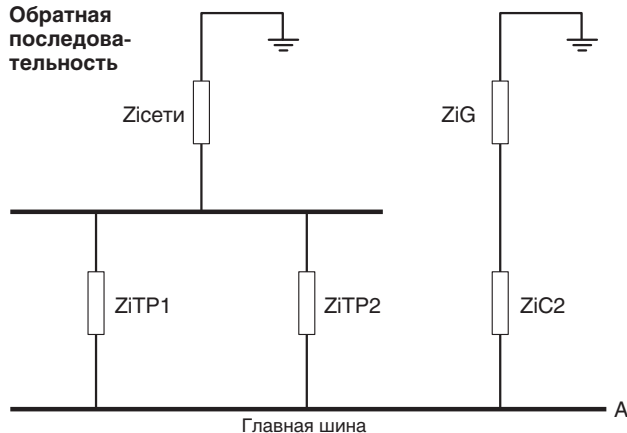
Повреждение в точке А

Основываясь на этих рассмотрениях, можно изобразить следующие схемы последовательностей при повреждении в точке А.

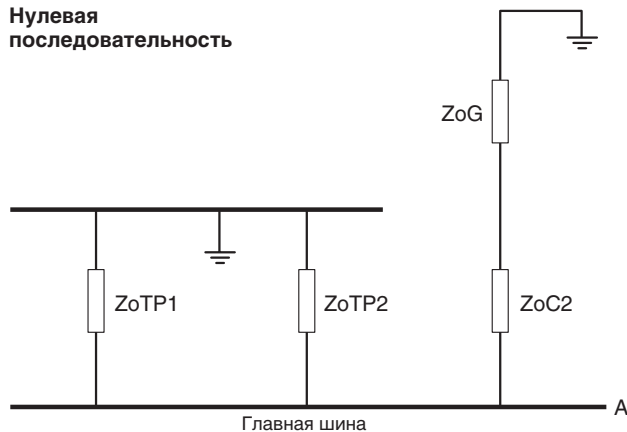
Прямая последовательность



Обратная последовательность



Нулевая последовательность



Изобразив цепи трех последовательностей, можно рассчитать токи различных типов коротких замыканий.

Трехфазное замыкание

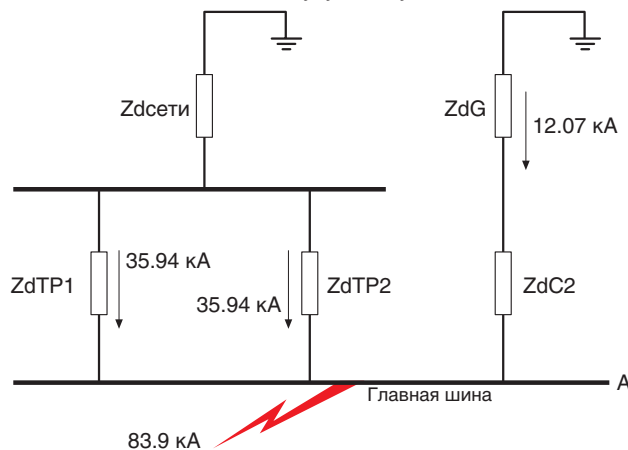
Так как трехфазное замыкание является симметричным замыканием, то нужно учитывать только цепь прямой последовательности, вычисляя ток по приведенным формулам. Поэтому эквивалентное сопротивление цепи прямой последовательности:

$$Z_{дзкв.А} = ((Z_{дTP1} \parallel Z_{дTP2}) + Z_{дсети}) \parallel (Z_{дГ} + Z_{дC2}) = 4.237 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0027 \text{ Ом}$$

[“||” означает параллельное соединение] и трехфазный ток короткого замыкания будет выражаться формулой:

$$I_{к3А} = \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3} \cdot Z_{дзкв.А}} = 83.9 \cdot 10^3 \angle -81.15^\circ \text{ А}$$

Используя правило деления токов, можно найти вклад от каждой электрической машины (генератор или трансформаторы) в ток короткого замыкания на главной шине. В частности, вклады будут следующие:



Двухфазное замыкание

В данном случае в повреждении задействованы две фазы из трех; теперь необходимо получить не только сопротивление прямой, но и обратной последовательности для точки А, как показано в формуле тока повреждения.

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

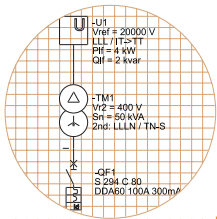
$$Z_{дзкв.А} = ((Z_{дTP1} \parallel Z_{дTP2}) + Z_{дсети}) \parallel (Z_{дГ} + Z_{дC2}) = 4.237 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0027 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{изкв.А} = ((Z_{iTP1} \parallel Z_{iTP2}) + Z_{iсети}) \parallel (Z_{iГ} + Z_{iC2}) = 4.367 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0028 \text{ Ом}$$

Теперь получим значение тока двухфазного короткого замыкания:

$$I_{к2А} = \frac{U_{2ном}}{Z_{дзкв.А} + Z_{изкв.А}} = 71.77 \cdot 10^3 \angle -81.12^\circ \text{ А}$$



Серия проектировщика

Однофазное замыкание

Что касается однофазного замыкания, то необходимо различать следующие виды:

- однофазное замыкание на землю, где ток возвращается по защитному проводнику, имеющемуся в распределительной сети типа TN-S;
- замыкание фазы на нейтраль, где ток возвращается по нейтральному проводнику.

Как показано в формулах по расчету тока повреждения, необходимо учитывать влияние трех последовательностей. Отметим, что нулевая последовательность принципиально отличается от других последовательностей, так как она сильно зависит от типа соединения обмоток трансформатора. Кроме того, значения сопротивлений нулевой последовательности кабелей зависит от типа однофазного замыкания (Ф-N или Ф-PE).

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$Z_{дэв.А} = ((Z_{дTP1} \parallel Z_{дTP2}) + Z_{дсети}) \parallel (Z_{IG} + Z_{дC2}) = 4.237 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0027 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{эв.А} = ((Z_{дTP1} \parallel Z_{дTP2}) + Z_{дсети}) \parallel (Z_{IG} + Z_{дC2}) = 4.367 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0028 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на нейтраль:

$$Z_{0(F-N)эв.А} = ((Z_{0TP1} \parallel Z_{0TP2}) \parallel (Z_{0G} + Z_{0(F-N)C2})) = 4.189 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0025 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на землю:

$$Z_{0(F-PE)эв.А} = ((Z_{0TP1} \parallel Z_{0TP2}) \parallel (Z_{0G} + Z_{0(F-PE)C2})) = 4.237 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0025 \text{ Ом}$$

Найдем ток замыкания фазы на нейтраль:

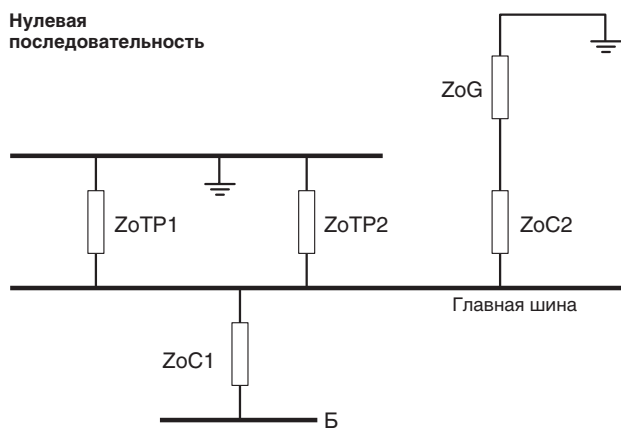
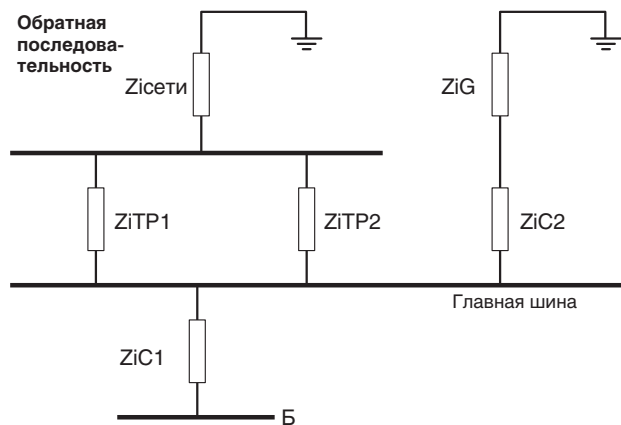
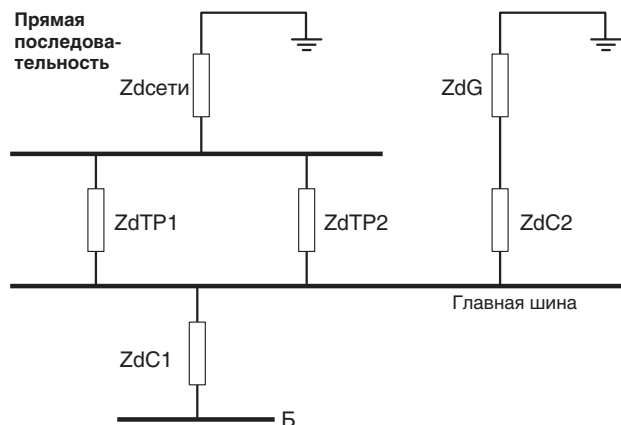
$$I_{к1(F-N)А} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2ном}}{Z_{дэв.А} + Z_{эв.А} + Z_{0(F-N)эв.А}} = 85.43 \cdot 10^3 \angle -80.92^\circ \text{ А}$$

Найдем ток замыкания фазы на землю:

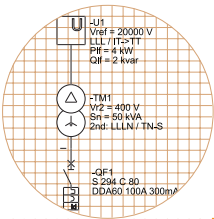
$$I_{к1(F-PE)А} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2ном}}{Z_{дэв.А} + Z_{эв.А} + Z_{0(F-PE)эв.А}} = 85.43 \cdot 10^3 \angle -80.89^\circ \text{ А}$$

Повреждение в точке Б

Подобно описанному способу для точки А изобразим три последовательности сопротивлений, если смотреть из точки Б. Очевидно, что в данном случае кабель К1 также рассматривается в цепях последовательностей.



По аналогии с повреждением в точке А рассчитаем эквивалентные значения сопротивлений и токов повреждений различных типов.



Серия проектировщика

Трехфазное замыкание

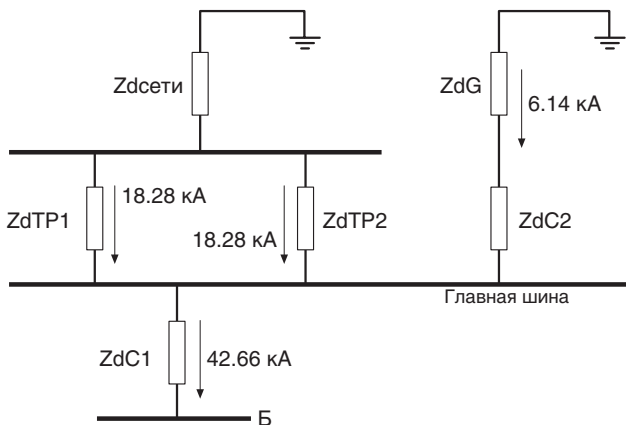
Эквивалентное сопротивление цепи, соответствующей прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.В}} = ((Z_{\text{дТП1}} \parallel Z_{\text{дТП2}}) + Z_{\text{дсети}}) \parallel (Z_{\text{дГ}} + Z_{\text{дС2}}) + Z_{\text{дС1}} = 0.003 + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Затем ток трехфазного короткого замыкания будет равен:

$$I_{\text{кЗВ}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{дзкв.В}}} = 42.66 \cdot 10^3 \angle -57.59^\circ \text{ А}$$

Вклады распределяются следующим образом:



Двухфазное замыкание

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.В}} = ((Z_{\text{дТП1}} \parallel Z_{\text{дТП2}}) + Z_{\text{дсети}}) \parallel (Z_{\text{дГ}} + Z_{\text{дС2}}) + Z_{\text{дС1}} = 0.003 + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{\text{зкв.В}} = ((Z_{\text{дТП1}} \parallel Z_{\text{дТП2}}) + Z_{\text{дсети}}) \parallel (Z_{\text{дГ}} + Z_{\text{дС2}}) + Z_{\text{дС1}} = 0.003 + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Теперь получим значение тока двухфазного короткого замыкания:

$$I_{\text{к2В}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.В}} + Z_{\text{зкв.В}}} = 36.73 \cdot 10^3 \angle -57.72^\circ \text{ А}$$

Однофазное замыкание

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.В}} = ((Z_{\text{дТП1}} \parallel Z_{\text{дТП2}}) + Z_{\text{дсети}}) \parallel (Z_{\text{дГ}} + Z_{\text{дС2}}) + Z_{\text{дС1}} = 0.003 + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{\text{зкв.В}} = ((Z_{\text{дТП1}} \parallel Z_{\text{дТП2}}) + Z_{\text{дсети}}) \parallel (Z_{\text{дГ}} + Z_{\text{дС2}}) + Z_{\text{дС1}} = 0.003 + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на нейтраль:

$$Z_{\text{0(F-N)зкв.В}} = ((Z_{\text{0ТП1}} \parallel Z_{\text{0ТП2}}) + Z_{\text{0сети}}) \parallel (Z_{\text{0Г}} + Z_{\text{0(F-N)С2}}) + Z_{\text{0(F-N)С1}} = 0.017 + i \cdot 0.010 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на землю:

$$Z_{\text{0(F-PE)зкв.В}} = ((Z_{\text{0ТП1}} \parallel Z_{\text{0ТП2}}) + Z_{\text{0сети}}) \parallel (Z_{\text{0Г}} + Z_{\text{0(F-PE)С2}}) + Z_{\text{0(F-PE)С1}} = 0.017 + i \cdot 0.010 \text{ Ом}$$

Найдем ток замыкания фазы на нейтраль:

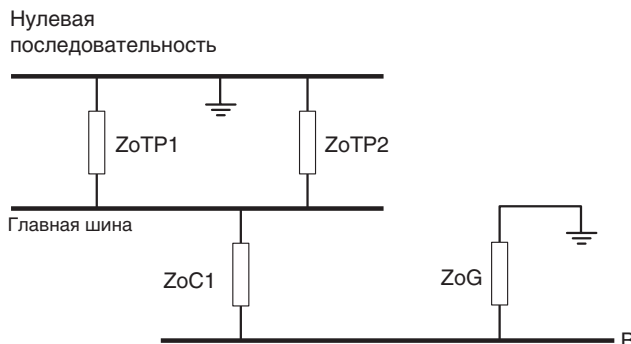
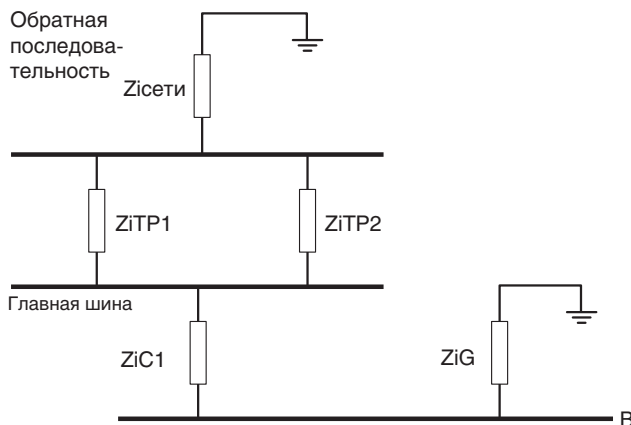
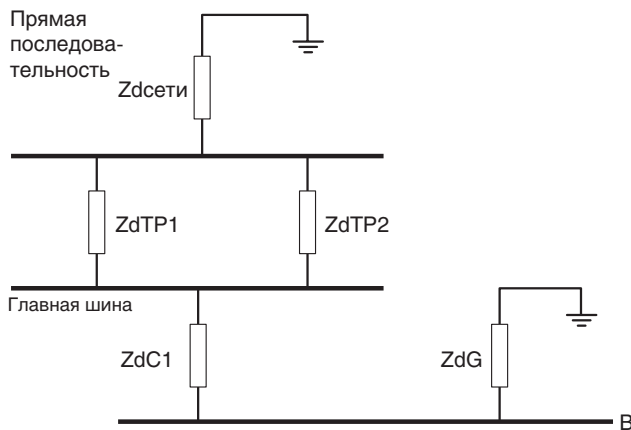
$$I_{\text{к1(F-N)В}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.В}} + Z_{\text{зкв.В}} + Z_{\text{0(F-N)зкв.В}}} = 23.02 \cdot 10^3 \angle -39.60^\circ \text{ А}$$

тогда как ток замыкания фазы на землю равен:

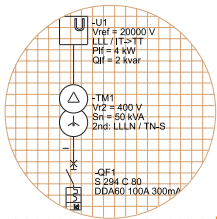
$$I_{\text{к1(F-PE)В}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.В}} + Z_{\text{зкв.В}} + Z_{\text{0(F-PE)зкв.В}}} = 23.35 \cdot 10^3 \angle -40.09^\circ \text{ А}$$

Повреждение в точке В

Рассматривая повреждение в точке В, мы рассматриваем случай, когда повреждение возникает внезапно на стороне нагрузки трансформатора. В соответствии с предыдущими пунктами изобразим три последовательности, рассматривая их из точки В.



По аналогии с предыдущими случаями рассчитаем эквивалентные значения сопротивлений и токов повреждений различных типов.



Серия проектировщика

Трёхфазное замыкание

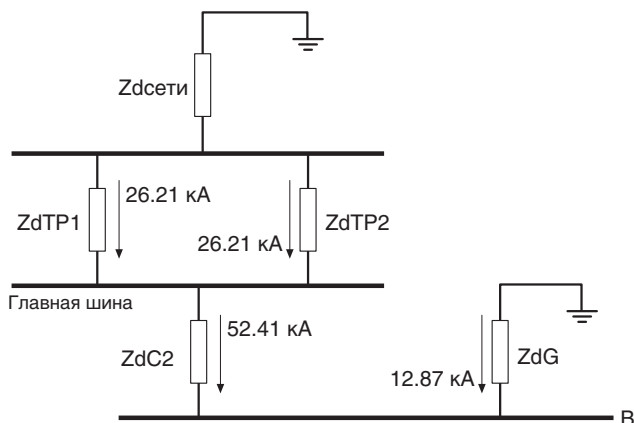
Эквивалентное сопротивление цепи, соответствующей прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.Б}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{дсети}} + Z_{\text{дС2}}) \parallel (Z_{\text{дГ}}) = 5.653 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0035 \text{ Ом}$$

Затем ток трёхфазного короткого замыкания будет равен:

$$I_{\text{к3Д}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{дзкв.Д}}} = 65.19 \cdot 10^3 \angle -80.82^\circ \text{ А}$$

Вклады распределяются следующим образом:



Двухфазное замыкание

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{дсети}} + Z_{\text{дС2}}) \parallel (Z_{\text{дГ}}) = 5.653 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0035 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{\text{изкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{исети}} + Z_{\text{иС2}}) \parallel (Z_{\text{иГ}}) = 5.94 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0036 \text{ Ом}$$

Теперь получим значение тока двухфазного короткого замыкания:

$$I_{\text{к2Д}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.Д}} + Z_{\text{изкв.Д}}} = 55.46 \cdot 10^3 \angle -80.75^\circ \text{ А}$$

Однофазное замыкание

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности:

$$Z_{\text{дзкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{дсети}} + Z_{\text{дС2}}) \parallel (Z_{\text{дГ}}) = 5.653 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0035 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности:

$$Z_{\text{изкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{исети}} + Z_{\text{иС2}}) \parallel (Z_{\text{иГ}}) = 5.94 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0036 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на нейтраль:

$$Z_{\text{о(Ф-Н)зкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{о(Ф-Н)С2}}) \parallel (Z_{\text{оГ}}) = 9.127 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности при замыкании фазы на землю:

$$Z_{\text{о(Ф-ПЕ)зкв.Д}} = ((Z_{\text{ТП1}} \parallel Z_{\text{ТП2}}) + Z_{\text{о(Ф-ПЕ)С2}}) \parallel (Z_{\text{оГ}}) = 9.85 \cdot 10^{-4} + i \cdot 0.0046 \text{ Ом}$$

Найдем ток замыкания фазы на нейтраль:

$$I_{\text{к1(Ф-Н)Д}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.Д}} + Z_{\text{изкв.Д}} + Z_{\text{о(Ф-Н)зкв.Д}}} = 58.03 \cdot 10^3 \angle -80.01^\circ \text{ А}$$

тогда как ток замыкания фазы на землю равен:

$$I_{\text{к1(Ф-ПЕ)Д}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{2НОМ}}}{Z_{\text{дзкв.Д}} + Z_{\text{изкв.Д}} + Z_{\text{о(Ф-ПЕ)зкв.Д}}} = 57.99 \cdot 10^3 \angle -79.66^\circ \text{ А}$$

В2 Метод мощностей

Данный метод позволяет быстро, но приблизительно вычислить ток трёхфазного короткого замыкания. Для этого необходимо рассчитать мощности короткого замыкания различных элементов, образующих цепь (трансформаторы-генераторы-кабели), а затем определить суммарную мощность короткого замыкания в точке, где необходимо найти ток повреждения.

Потоки мощностей в элементах, соединённых параллельно, можно представить формулой для сопротивлений, соединённых последовательно, тогда как потоки мощностей элементов соединённых последовательно, рассчитываются по формуле для параллельно соединённых сопротивлений. Рассмотрим пример расчета проанализированной сети.

Можно увидеть, что для такого же типа повреждений (трехфазные короткие замыкания в точках А – Б – В) этот “приблизительный” метод дает практически такой же результат, что и метод симметричных составляющих.

Если принять во внимание данные уже представленной электроустановки, можно рассчитать мощности короткого замыкания различных элементов установки:

Питающая сеть:

$$S_{\text{КСЕТИ}} = 750 \text{ МВА} - \text{дано};$$

Трансформаторы ТР1-ТР2

$$S_{\text{кТР1}} = \frac{S_{\text{НОМТР1}}}{U_{\text{к\%}}} \cdot 100 \quad S_{\text{кТР1}} = 26.67 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{кТР2}} = \frac{S_{\text{НОМТР2}}}{U_{\text{к\%}}} \cdot 100 \quad S_{\text{кТР2}} = 26.67 \text{ МВА}$$

Генератор G

$$S_{\text{кГ}} = \frac{S_{\text{НОМГ}}}{x_{\text{д}}^{\%}} \cdot 100 \quad S_{\text{кГ}} = 8.93 \text{ МВА}$$

Кабели К1-К2

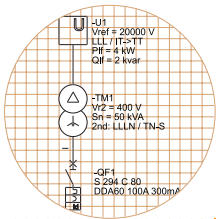
$$S_{\text{кС1}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}^2}{Z_{\text{FC1}}} \quad S_{\text{кС1}} = 51.75 \text{ МВА}$$

$$S_{\text{кС2}} = \frac{U_{\text{2НОМ}}^2}{Z_{\text{FC2}}} \quad S_{\text{кС2}} = 133.95 \text{ МВА}$$

Где

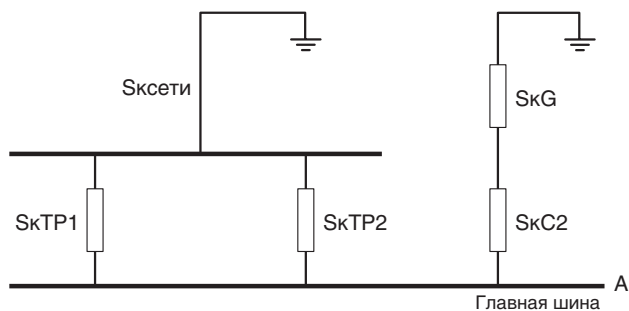
$$Z_{\text{FC1}} = \sqrt{(R_{\text{F1}}^2 + X_{\text{F1}}^2)} \quad Z_{\text{FC1}} = 0.0031 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{FC2}} = \sqrt{(R_{\text{F2}}^2 + X_{\text{F2}}^2)} \quad Z_{\text{FC2}} = 0.0012 \text{ Ом}$$



Серия проектировщика

При расчете повреждения в точке А, схема элементов, соответствующих мощностям короткого замыкания, выглядит следующим образом:

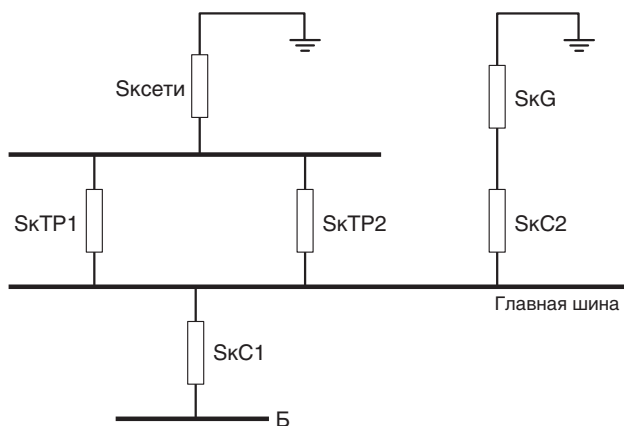


Учитывая параллельное и последовательное соединения элементов, получим выражение суммарной мощности:

$$S_{KTOT(A)} = ((S_{KTP1} + S_{KTP2}) // S_{Kсети}) + (S_{KG} // S_{KC2}) = 58.16 \text{ MVA}$$

$$I_{к3A} = \frac{S_{KTOT(A)}}{\sqrt{3} \cdot U_{2НОМ}} \text{ из которого получим } I_{к3A} = 83.95 \text{ кА}$$

При расчете повреждения в точке Б, схема элементов, соответствующих мощностям короткого замыкания, выглядит следующим образом:

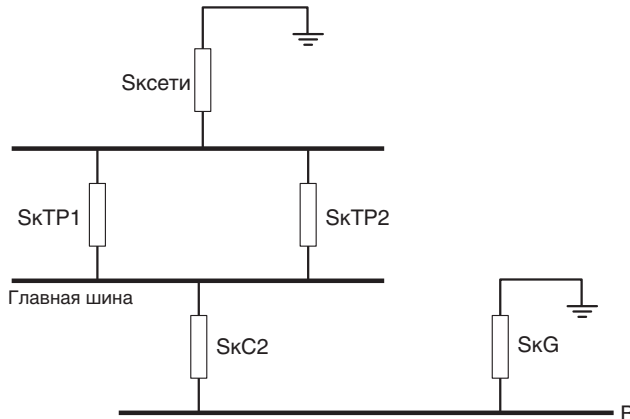


Учитывая параллельное и последовательное соединения элементов, получим выражение суммарной мощности:

$$S_{KTOT(B)} = (((S_{KTP1} + S_{KTP2}) // S_{Kсети}) + (S_{KG} // S_{KC2})) // S_{KC1} = 27.38 \text{ MVA}$$

$$I_{к3Б} = \frac{S_{KTOT(B)}}{\sqrt{3} \cdot U_{2НОМ}} \text{ из которого получим } I_{к3Б} = 39.52 \text{ кА}$$

При расчете повреждения в точке В, схема элементов, соответствующих мощностям короткого замыкания, выглядит следующим образом:



Учитывая параллельное и последовательное соединения элементов, получим выражение суммарной мощности:

$$S_{KTOT(B)} = (((S_{KTP1} + S_{KTP2}) // S_{Kсети}) // S_{KC2}) + S_{KG} = 45.23 \text{ MVA}$$

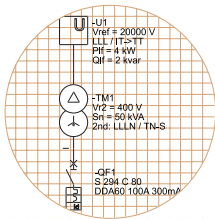
$$I_{к3В} = \frac{S_{KTOT(B)}}{\sqrt{3} \cdot U_{2НОМ}} \text{ из которого получим } I_{к3В} = 65.28 \text{ кА}$$

Выводы по полученным результатам

Из разобранного примера видно, что метод мощностей проще и требует меньше времени для расчета, но в результате можно получить результаты меньшей точности, чем при применении метода симметричных составляющих.

Наиболее заметным различием является рассчитанное повреждение в точке Б, где наличие кабеля К2, характеризуемого определенными величинами "L" и "R", обуславливает различное соотношение мнимой и действительной частей в выражениях по отношению к другим элементам, подчеркивая тем самым "приблизительный" характер метода мощностей.

Однако, эффект приближения не настолько велик, чтобы считать применение данного метода необоснованным, в частности, для использования в предварительных расчетах, как это часто и происходит.



Серия проектировщика

Глоссарий

$u_{к\%}$	напряжение короткого замыкания в процентах
$p_{к\%}$	мощность короткого замыкания в процентах
$U_{ном}$	номинальное напряжение
$S_{ном}$	номинальная мощность
$I_{ном}$	номинальный ток
$U_{1ном}$	номинальное напряжение первичной обмотки
$U_{2ном}$	номинальное напряжение вторичной обмотки
X''_d	сверхпереходное реактивное сопротивление, продольная ось
X'_d	переходное реактивное сопротивление, продольная ось
X_d	синхронное реактивное сопротивление, продольная ось
S_k	мощность короткого замыкания
I_k	ток короткого замыкания
$I_{уд}$	ударный ток
Z_k	полное сопротивление короткого замыкания
X_k	активное сопротивление короткого замыкания
R_k	реактивное сопротивление короткого замыкания
$Z...$	полное сопротивление элемента
$R...$	активное сопротивление элемента
$X...$	реактивное сопротивление элемента
i_n	периодическая составляющая тока короткого замыкания
i_a	аперiodическая составляющая тока короткого замыкания
η	коэффициент полезного действия
$\cos\varphi$	коэффициент мощности
$a\ b$	полярное представление: "a" модуль; "b" угол сдвига фазы
$a+ib$	представление в прямоугольных координатах: "a" – действительная часть и "b" – мнимая часть

Индексы:

...L	общая статическая нагрузка
...TP	трансформатор
...G	генератор
...ДВ	двигатель
...ном	номинальный
...C	кабель
...сети	питающая сеть
...п	нейтраль
... F	фаза
... PE	защитный проводник
...1Ф-PE	замыкание фазы на землю
...1Ф-п	замыкание фазы на нейтраль
...2	двухфазный
...3	трехфазный
...НН	низкое напряжение
...СН	среднее напряжение
...к	в условиях короткого замыкания



ADVLOC08020MAN07ARU

ООО “АББ Индустри и Стройтехника”

117861, Москва,
ул. Обручева, 30/1
Тел.: +7 (495) 960 2200
Факс: +7 (495) 960 2220

193029, Санкт-Петербург,
Б. Смоленский пр., 6
Тел.: +7 (812) 326 9915
Факс: +7 (812) 326 9916

394006, Воронеж,
ул. Свободы, 73
Тел.: +7 (4732) 393 160
Факс: +7 (4732) 393 170

620066, Екатеринбург,
ул. Бархотская, 1, оф. 212
Тел.: +7 (343) 369 0000
Факс: +7 (343) 369 0069

664050, Иркутск,
ул. Байкальская, 291
Тел.: +7 (3952) 563 458
Факс: +7 (3952) 563 459

443010, Самара,
ул. Красноармейская, 1
Тел.: +7 (846) 269 8047
Факс: +7 (846) 269 8046

344002, Ростов-на-Дону,
ул. Пушкинская, 72а
Тел.: +7 (863) 255 9751
Факс: +7 (863) 255 9751

630007, Новосибирск,
Серебренниковская ул., 14/1
Тел.: +7 (383) 211 9270
Факс: +7 (383) 211 9270

www.abb.ru
ruibs@ru.abb.com

420021, Казань,
ул. Парижской Коммуны, 26
Тел.: +7 (843) 292 3971
Факс: +7 (843) 292 3921

603093, Нижний Новгород,
ул. Родионова, 23
Тел.: +7 (8312) 619 102
Факс: +7 (8312) 619 164