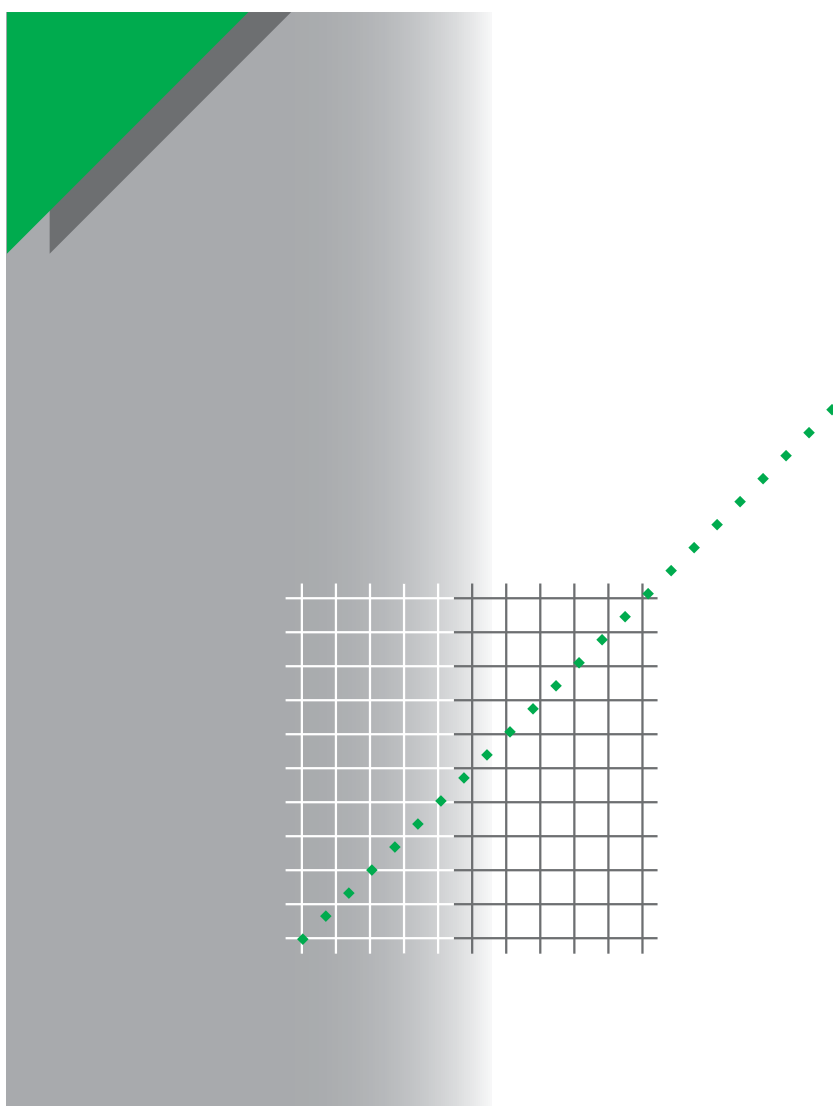


Выпуск № 13

**Защита трансформаторов
подстанций среднего и низкого
напряжения (МТ/ВТ)**



Компания Schneider Electric приступила к выпуску «Технической коллекции Schneider Electric» на русском языке.

***Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции Schneider Electric и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.*

*В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации Schneider Electric.*

***Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.*

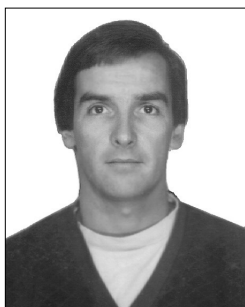
***Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.*

*В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.*

***Валерий Саженов,**
Технический директор
ЗАО «Шнейдер Электрик»,
Кандидат технических наук*

Выпуск № 13

Защита трансформаторов подстанций среднего и низкого напряжения (МТ/ВТ)



Дидье ФЮЛЬШИРОН

В 1980 году окончил Высшую электротехническую школу, в 1981 году поступил на работу в технический отдел компании Merlin Gerin, в испытательную лабораторию больших разрывных мощностей. В настоящее время работает в отделе по направлению "Среднее напряжение", занимается экспертизой, разработкой рекомендаций по технологическим требованиям и вопросами стандартизации в области коммунального электроснабжения.

Терминология

Переходный ток

Значение симметричного трехфазного тока, при котором предохранитель и выключатель обмениваются функцией отключения (в блоке выключатель-предохранители) (МЭК 420).

Ток пересечения

Значение тока, соответствующее пересечению времятоковых характеристик двух устройств защиты при максимальном токе (VEI – Международный электротехнический словарь 441-17-16).

DGPT:

Устройство, которое используется в герметичных залитых трансформаторах и обеспечивает функции контроля газовыделения, давления и температуры.

Рост потребления

Техническая и/или временная неодинаковость потребителей одной сети, которая позволяет установить максимальную требуемую мощность значительно меньше максимальной мощности отдельных потребителей.

Срезанная волна

Часть волны перенапряжения, главным образом, грозового перенапряжения, которая продолжает распространяться за пределами разряда в воздушном промежутке (разрядник или перекрытие изолятора). Очень быстрый срез импульса, вызванный дуговым разрядом, оказывает серьезное воздействие на некоторое оборудование.

Защита трансформаторов подстанций среднего и низкого напряжения (МТ/ВТ)

Выбор защиты трансформаторов среднего/низкого напряжения (МТ/ВТ) может показаться простым, так как зачастую он основывается на традициях и практике разработчиков электрических сетей и даже политике, продиктованной технико-экономическими условиями. В действительности выбор следует делать в зависимости от технологии трансформаторов, типа нагрузки, на которую они подают питание, и, прежде всего, от внешнего воздействия на трансформаторы.

В настоящей Технической тетради дается описание нагрузок, которым подвергаются трансформаторы при эксплуатации, последствия действия этих нагрузок и представлены различные защиты, которые могут быть использованы. Данное описание, неизбежно, носит упрощенный характер в силу множества критериев и решений. Тем не менее, специалист-электротехник должен найти в данном материале основные сведения, необходимые для того, чтобы сделать правильный выбор.

Содержание

1. Введение	1.1. Трансформаторы среднего/низкого напряжения (МТ/ВТ) и схема организации защиты	стр. 4
	1.2. Обзор различных типов трансформаторов, их устройства и технологии использования	стр. 5
2. Нагрузки при эксплуатации и виды повреждений	2.1. Включение под напряжение и отключение напряжения	стр. 7
	2.2. Внешние перенапряжения	стр. 7
	2.3. Перегрузки	стр. 9
	2.4. Короткое замыкание в сети низкого напряжения (ВТ)	стр. 10
	2.5. Развитие внутренних повреждений	стр. 10
	2.6. Повреждения, связанные с технологией	стр. 13
3. Защита от перенапряжений	3.1. Общие положения	стр. 14
	3.2. Искровые и грозовые разрядники	стр. 14
4. Защита от перегрузок	4.1. Защита путем измерения тока	стр. 16
	4.2. Защита путем измерения температуры	стр. 17
5. Защита предохранителями среднего напряжения (МТ) и при помощи блоков выключатель-предохранители	5.1. Характеристики предохранителей среднего напряжения (МТ)	стр. 18
	5.2. Допуски на предохранители	стр. 19
	5.3. Использование блока выключатель-предохранители	стр. 21
6. Защита с помощью выключателей среднего напряжения (МТ), соединенных с механизмами отключения	6.1. Критерии выбора кривой отключения	стр. 22
	6.2. Преимущества земляной защиты	стр. 24
	6.3. Автономная защита: плавкие вставки TFL и реле	стр. 24
	6.4. Защита с использованием вспомогательного источника питания: GRPT, температурные датчики и реле	стр. 25
7. Заключение		стр. 27
Приложение 1. Правила выбора предохранителя для защиты трансформатора		стр. 29
Приложение 2. Расчет переходного тока и тока переключения для блока выключатель-предохранители		стр. 30
Библиография		стр. 32
Логическая блок-схема ситуаций, критериев и решений		

1. Введение

1.1. Трансформаторы среднего/низкого напряжения (МТ/ВТ) и схема организации защиты

Назначение трансформаторов

В распределительных сетях трансформаторы обеспечивают следующее:

- минимизацию тепловых потерь энергии (эффект Джоуля – Ленца); повышение напряжения на коэффициент 10 вызывает уменьшение этих потерь на коэффициент 100 ($P_{\text{потери}} = R \cdot P_{\text{потребляемая}} / U^2$);
 - минимизацию падения напряжения, резистивного (R) и реактивного (X) при заданной передаваемой мощности ($U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ($\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi$);
 - возможно, обеспечение гальванического разделения сетей одного и того же напряжения (предел свойства, изменение режима работы нейтрали и т.д.).
- Несмотря на редкие случаи непроизвольного отключения электроснабжения, тем не менее, есть необходимость «управлять» трансформаторами в нормальных условиях эксплуатации, например:
- для восстановления конфигурации сети;
 - для проведения технического обслуживания или в целях безопасности;
 - чтобы отреагировать на пиковую нагрузку;
 - чтобы запустить или остановить процесс.

Эти операции выполняются с помощью нагруженного или не нагруженного трансформатора, и это может существенно изменить режим работы и результирующие переходные электрические процессы. Трансформаторы для распределительной сети являются пассивными устройствами, обладающими очень высокой надежностью, долговечность которых составляет несколько десятков лет. На распределительном пункте в Норвегии был зарегистрирован годовой коэффициент повреждений 0,09 % (9 на 10 000) с учетом всех причин отказов для 5000 трансформаторов в течение четырех лет. Для подземных кабельных сетей наблюдаемый процент повреждений всегда составляет меньше 0,2 %; для некоторых воздушных сетей он может возрасти до 0,5 %. Часто необходимость замены сетей определяется по критериям их морального износа – развития уровня мощности или напряжения. Повреждения при эксплуатации случаются очень редко, но, тем не менее, для обеспечения безопасности оборудования и людей, а также бесперебойности работы необходимо использовать защиту.

Нагрузки на трансформатор

Трансформаторы подвергаются воздействию многочисленных внешних электрических сил, как со стороны источника питания, так и со стороны потребителя. Последствия возможного повреждения могут быть очень тяжелыми и привести к нарушению в работе, а также к потерям при эксплуатации. Таким образом, с одной стороны, трансформаторы должны иметь защиту от вредных внешних воздействий и, с другой стороны, должны быть отделены от сети в случае внутреннего повреждения.

Термин «защита трансформаторов» очень часто ассоциируется с понятием отключения от сети, даже тогда, когда трансформатор уже поврежден, в результате чего объединяются предупредительные мероприятия (защита от перенапряжений, повреждения со стороны потребителя, от

перегрузок, тепловая защита) и меры по устранению повреждений трансформатора.

Схема защиты

Разработчик электрической сети должен определять мероприятия, которые проводятся для каждого трансформатора в соответствии с критериями бесперебойности и качества работы, капитальных затрат и эксплуатационных расходов, безопасности оборудования и персонала, а также уровня допустимого риска. Принятые решения всегда являются компромиссным вариантом, составленным по этим разным показателям, и очень важно, чтобы были четко обозначены преимущества и недостатки этих решений. Например, один и тот же оператор на распределительном пункте может выбирать совершенно разные схемы для различных участков сети, городской и сельской, поскольку показатели единичной мощности, затрат, последствий в случае аварии различаются. Высокая надежность трансформаторов является определяющим фактором при выборе оборудования для распределительных пунктов относительно удельных затрат на устройства защиты, которые могут использоваться вместе с трансформаторами. Так, например, благодаря их большой надежности не требуется защита трансформаторов, как технического средства, но достаточно ограничить последствия повреждения. Некоторые обычно используемые варианты защиты, применение которых, впрочем, не носит систематический характер, следующие:

- исключительно «целевая» защита для «предотвращения риска возникновения взрыва и обеспечения работы сети среднего напряжения (МТ)», используемая для трансформаторов, подсоединенных к распределительной сети общего пользования;
- контроль температуры трансформаторов промышленных установок или оборудования сектора сферы услуг, в которых могут использоваться схемы разгрузки;
- отсутствие контроля при перегрузке работы трансформаторов распределительных сетей общего пользования; избыток мощности для потребителей делает возможность перегрузки маловероятной, и, тем не менее, разгрузка может быть предусмотрена только в случае возникновения повреждения. Если трансформатор подает питание на однородную группу потребителей, требуется организовать защиту от перегрузки, так как больше нет избытка мощности.

Поскольку выбор из этих различных вариантов всегда является компромиссом между техническо-экономическими показателями и политической направленностью в деятельности той или иной компании, не представляется возможным предложить какое-либо универсальное решение. Поэтому после краткого обзора работы трансформаторов и их характеристик, мы рассмотрим воздействие сил и нагрузки, которым подвергаются трансформаторы, и различные способы их защиты. Как бы то ни было, схему защиты составляет разработчик сети, в зависимости от варианта использования.

1.2. Обзор различных типов трансформаторов, их устройства и технологии использования

Устройство трансформатора (трансформатор с жидким диэлектриком или сухой) обуславливает некоторые характеристики, использование защит и на выбор возможного места установки.

Сведения об электрических и тепловых характеристиках трансформаторов необходимы, чтобы понимать, каково состояние трансформаторов и какова устойчивость к нагрузкам при эксплуатации или в случае возникновения повреждения.

Типы трансформаторов

■ Трансформаторы с жидким диэлектриком, как правило, бывают полностью заполненные. Эти трансформаторы хорошо подходят для следующих видов использования:

- подстанции без диспетчерского контроля (техническое обслуживание не проводится);
 - в тяжелых условиях окружающей среды, если имеется соответствующее покрытие бака (защита рабочих частей трансформатора);
 - при циклическом потреблении (хорошая тепловая инерция).
- С другой стороны, присутствие диэлектрика создает следующие риски:

- загрязнение грунтовых вод (в случае утечки диэлектрика), в связи с чем, в некоторых случаях требуется предусмотреть резервуар для сбора жидкости;
- пожар (см. рис. 1), из-за чего запрещается использовать трансформаторы данного типа в некоторых зданиях. Эти риски оговариваются в различных нормативных актах и стандартах, касающихся условий установки или ограничения использования трансформаторов.

■ «Сухие» трансформаторы больше подходят для следующих видов использования:

- помещения, где ведется контроль условий окружающей среды: запыленность, влажность, температура и т.д.; необходимо проводить периодическую чистку, обеспыливание трансформаторов;
- дома, в частности, высотные здания; эти трансформаторы пригодны для данного вида применения, так как могут обладать хорошей огнестойкостью (например, класс F1 в соответствии со стандартом NF C 52-726) и соответствовать критериям нетоксичности дыма.

Характеристики трансформаторов

Различные номинальные значения определены стандартом МЭК 76 (силовой трансформатор). Некоторые электрические характеристики требуется определить, чтобы знать устойчивость к нагрузкам при эксплуатации и в случае возникновения повреждения, эти характеристики также нужны для выбора схемы и настройки защиты.

■ Номинальное напряжение первичной обмотки (U_f) В соответствии со стандартом МЭК 71 (координация изоляции) выбирается напряжение изоляции и значение устойчивости к импульсам грозового перенапряжения (см. рис. 2).

■ Напряжение короткого замыкания (U_{cc})

Используя данную характеристику, можно вычислить ток, потребляемый первичной обмоткой в случае короткого замыкания на выводах вторичной обмотки, если пренебречь полным сопротивлением источника:

$$I_{cc} = \frac{100 I_n}{U_{cc} \%}$$

- Резервуары для сбора жидкости
- Промежутки или экраны для предотвращения распространения пожара
- Устройство для обеспечения спонтанного тушения
- Устройство автоматического отключения в случае выделения газа
- Устройство автоматического отключения в случае повышения температуры
- Устройство отключения и автоматического тушения при обнаружении очага пожара
- Автоматическое закрывание огнестойких дверей

Рис. 1. Средства защиты от пожара при использовании трансформаторов с жидким диэлектриком

Уровень изоляции	17,5	24	36
в соответствии со стандартом МЭК 71			
Максимальное напряжение оборудования	17,5	24	36
Чувствительность к промышленной частоте в течение 1 мин	38	50	70
Устойчивость к импульсам грозового перенапряжения	75 или 95	95, 125 или 145	145 или 170
Рабочее напряжение сети	12 - 17,5	17,5 - 24	24 - 36

Примечание. Устойчивость к коммутационным импульсам не указана при значениях меньше 245 кВ.

Рис. 2. Стандартные уровни изоляции (кВ).

Номинальная мощность S_n , кВА	U_{cc} в соответствии со стандартом	
	МЭК 76	H426.S1 (Европа)
$S_n < 50$	4 %	не указано
$50 < S_n < 630$	4 %	4 %
$630 < S_n < 1250$	5 %	6 %
$1250 < S_n < 2500$	6,25 %	6 %

Рис. 3. Стандартные значения напряжения короткого замыкания трансформаторов для распределительных сетей.

С помощью данной характеристики можно также определить полное сопротивление трансформатора, что необходимо для вычисления тока короткого замыкания, если это повреждение возникает в распределительной сети низкого напряжения (ВТ):

$$Z = \frac{U_{cc} \% U_f}{100 I_n}$$

Напряжение короткого замыкания нормировано в зависимости от мощности трансформатора и составляет 4 – 6 % для трансформаторов среднего/низкого напряжения (МТ/ВТ) (см. рис. 3).

■ Пусковой ток

В особо неблагоприятных условиях (ненагруженный трансформатор, значительный остаточный поток и включение при нулевом напряжении при первом полупериоде тока того же знака, что и остаточный поток) происходит очень сильное насыщение магнитопровода, при этом обмотка охватывает до трех раз номинальный поток магнитопровода. В результате этого насыщения

кажущаяся индуктивность катушки существенно уменьшается, и режим ее функционирования становится сходным с работой катушки без магнитопровода (увеличение потока рассеяния): таким образом, результирующий ток в обмотке может достигать очень больших пиковых значений, до десяти раз превышающих максимальный номинальный ток, при этом форма волны тока очень деформируется из-за явления насыщения (см. рис. 4).

Эти явления включения демпфируются постоянной времени конкретного типа трансформатора, обусловленной его магнитными характеристиками и потоком утечки. Постоянная времени составляет порядка нескольких сотен миллисекунд для трансформаторов распределительных сетей (ниже представлена таблица цифровых значений).

Необходимо знать пусковой ток, чтобы выбрать и/или осуществить регулировку устройств защиты от короткого замыкания, установленных на первичной обмотке трансформатора.

■ Тепловая инерция трансформатора
Эта характеристика зависит от типа трансформатора (сухой или с жидким диэлектриком) и от его мощности. Данную характеристику следует учитывать при выборе защиты от перегрузки.

Для получения более подробной информации о трансформаторах (устройство, характеристики, применение) рекомендуем ознакомиться с соответствующей Технической тетрадью.

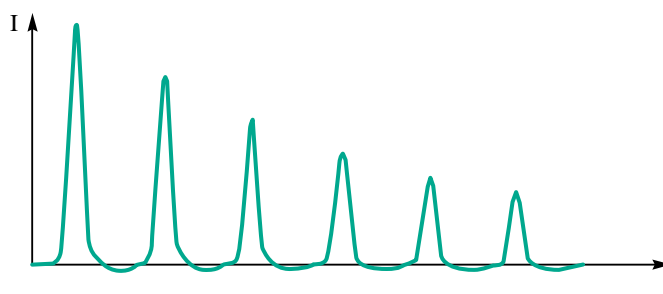


Рис. 4. Характеристика изменения пускового тока в зависимости от асимметричного насыщения.

2. Нагрузки при эксплуатации и виды повреждений

2.1. Включение под напряжение и отключение напряжения

«Коммутационные операции», выполняемые трансформатором для распределительных сетей, ограничиваются включением под напряжение и отключением напряжения. В сети коммунального электроснабжения эти операции являются исключительными и в действительности не соответствуют оперативным коммутационным операциям. Тем не менее, трансформаторы включаются и отключаются при срабатывании выключателей сети со стороны источника питания, в том числе во время циклов АПВ. Быстрое повторное включение может вызвать включение под напряжение при сильном остаточном потоке, в результате чего возникает особенно большой пусковой ток.

При применении оборудования в промышленности или в сфере услуг одни и те же коммутационные операции могут выполняться систематически, например, для запуска-остановки технологических процессов или для отключения-включения объектов. Когда осуществляется контроль нагрузки, подсоединенной к трансформатору, можно выбирать включение под нагрузкой или без нагрузки.

Поскольку демпфирование пускового тока связано с магнитными характеристиками трансформатора (в основном, с потерями на гистерезис), наличие нагрузки мало влияет на режим работы. Включение под напряжение осуществляется, главным образом, при подключенной нагрузке. Если эти нагрузки представляют собой переходные процессы, то должно учитываться общее состояние оборудования. Например, в случае использования блока двигатель-трансформатор переходный ток трансформатора накладывается на пусковой ток двигателя, но продолжительность прохождения тока разная, и необходимо произвести расчет полного сопротивления трансформатора, чтобы ограничить толчок тока во время пуска. Подобные хорошо известные случаи должны быть предметом отдельного исследования. Они не соответствуют видам применения «для распределительной сети».

Наличие пускового тока делает необходимым использовать устройства контроля (соответствующие реле и датчики тока, предохранители и т.д.) с выдержкой времени, чтобы не допустить несвоевременного срабатывания оборудования. Этот вопрос рассматривается в соответствующих разделах документа.

2.2. Внешние перенапряжения

Причина возникновения и интенсивность

Трансформаторы распределительных сетей подвергаются воздействию переходных перенапряжений, возникающих в сетях, к которым они подсоединены. Эти перенапряжения происходят либо в результате ударов молнии, прямых или наведенных на сети среднего или низкого напряжения (см. Техническую тетрадь № 168. Разряд молнии и электрические установки среднего напряжения), либо в результате передачи на уровне среднего напряжения коммутационных перенапряжений, возникших в сети со стороны источника питания.

В случае отключения выключателями, расположенными непосредственно выше по цепи, перенапряжения могут создаваться блоком трансформатор – выключатель – цепь питания, в результате чего возникает диэлектрическая нагрузка трансформатора. Эта нагрузка вызывает преждевременное старение оборудования или даже является причиной повреждения изоляции между витками или замыкания на корпус. Наиболее критический

режим создается при отключении ненагруженных трансформаторов коммутационными устройствами, способными отключать ток высокой частоты, например, вакуумными выключателями.

Таким образом, следует с осторожностью подходить к использованию таких устройств для выполнения оперативных коммутационных операций.

Критериями определения интенсивности перенапряжений, воздействующих на трансформаторы, являются, разумеется, пиковые значения, но также и скорость изменения напряжения (фронт импульса или срез импульса в случае возникновения возбуждения в непосредственной близости, «срезанная волна»), которое приводит к неравномерному распределению нагрузки в обмотках и вызывает, таким образом, превышение устойчивости между витками, даже если пиковое значение на выводах первичной обмотки не больше допустимых значений (см. рис. 5).

Риск воздействия перенапряжений

Риск воздействия перенапряжений на какой-либо конкретный трансформатор связан с условиями окружающей среды, когда должны учитываться следующие критерии:

- питание среднего напряжения по воздушной сети или подземной кабельной сети;
- возможное использование, определение размеров и условия установки ограничителей перенапряжения (разрядники);
- длина и характер соединений между сетью и трансформатором;
- тип устройств и режим выполнения коммутационных операций;
- качество заземлителей и схемы заземления на уровне подстанции;
- сеть низкого напряжения, воздушная или кабельная;
- заземление сети низкого напряжения и, при необходимости, ее соединение с заземлителем подстанции.

В стандартах, касающихся определения уровня изоляции, оговариваются не все нагрузки, действующие на трансформаторы, поскольку не все явления, происходящие в сети, например, переходные процессы с крутым фронтом импульса, учитываются.

На практике, оценка риска возникновения нагрузки по-прежнему носит слишком общий характер, так как задачи применения трансформаторов среднего/низкого напряжения не являются основанием для подробного

исследования вопроса координации изоляции. Кроме того, будет разумным для разработчика сети исключить необходимость указывать особые характеристики, из-за которых может потребоваться специальное изготовление. Таким образом, он может ограничиться выбором между стандартными уровнями изоляции (см. рис. 2).

Повреждение изоляции

- Внутренние повреждения, вызванные перенапряжениями, следующие:
 - повреждение изоляции между витками одной и той же обмотки (наиболее распространенный случай);
 - повреждение изоляции между обмотками;
 - повреждение изоляции между обмоткой под нагрузкой и наиболее близко расположенной токопроводящей частью (магнитопровод или бак).

Ниже дается описание состояния оборудования в случае возникновения этих трех категорий повреждений.

- Внешняя изоляция залитых трансформаторов рассчитывается с запасом, и не наблюдается повреждения внешней изоляции этих трансформаторов, за исключением некоторых случаев с трансформаторами для воздушных сетей, используемых в особо загрязненных зонах. Как было указано выше, в сухих трансформаторах может происходить повреждение внешней изоляции в случае загрязнения изолирующих поверхностей.

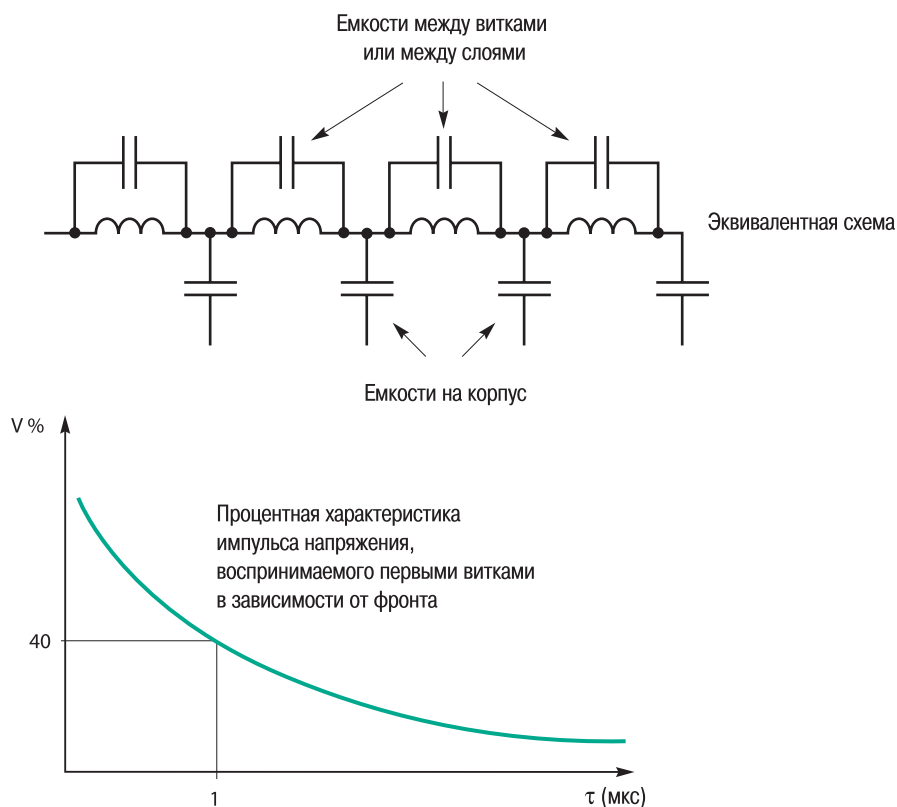


Рис. 5. Емкости и нагрузки, распределенные по обмотке.

2.3. Перегрузки

Общие положения

Допустимый нагрев различных частей трансформатора с учетом предельных значений нагрева в соответствии со стандартами, установленных на основе расчетной долговечности в зависимости от старения изоляционных материалов, характеризует работу в продолжительном режиме.

Ток, превышающий номинальное значение, соответствует работе при перегрузке. Сохраняющееся состояние перегрузки вызывает перегрев в некоторых частях трансформатора (в зависимости от конструкции) и, в случае повышенной температуры окружающей среды, превышение допустимых значений температуры. Различие между нагревом и значениями температуры большое, что позволяет четко оценить критичность некоторых состояний перегрузки. Так, например, перегрузка, связанная с использованием электрического отопления в зимний период в регионах с холодным климатом, не будет иметь те же последствия, что и перегрузка такого же уровня, вызванная использованием кондиционеров в летний период в странах с теплым климатом.

Тем не менее, в аномальных или исключительных условиях эксплуатации допускается выйти за рамки ограничений в ущерб сохранению долговечности оборудования. Это может быть предпочтительным решением по сравнению с перерывом в электроснабжении из-за кратковременного превышения мощности.

Допустимые критерии перегрузки, такие как температура окружающей среды, работа с циклической нагрузкой и т.д., рассматриваются в технической тетради по трансформаторам для распределительных сетей. Перегрузка часто носит переходный характер, и тепловое равновесие не обеспечивается; тепловая инерция трансформатора, которая бывает значительной у «залитых» трансформаторов, позволяет выдерживать повышенные значения в соответствии с законом «обратно пропорциональным времени» (см. рис. 6).

Допустимый ток перегрузки различается по значению в зависимости от того, используется равновесный или неравновесный режим; простой контроль уставки тока по каждой фазе становится бесполезным.

Распределительная сеть общего пользования

В распределительных сетях общего пользования перегрузка, как правило, не влечет за собой отключение трансформатора, поскольку приоритет отдается краткосрочному сохранению бесперебойности работы. Кроме того, расчет параметров цепей низкого напряжения производится с запасом, и перегрузка трансформатора никогда не соответствует перегрузке проводов низкого напряжения. Если случаи перегрузки возникают слишком часто, эксплуатационники вынуждены заменить

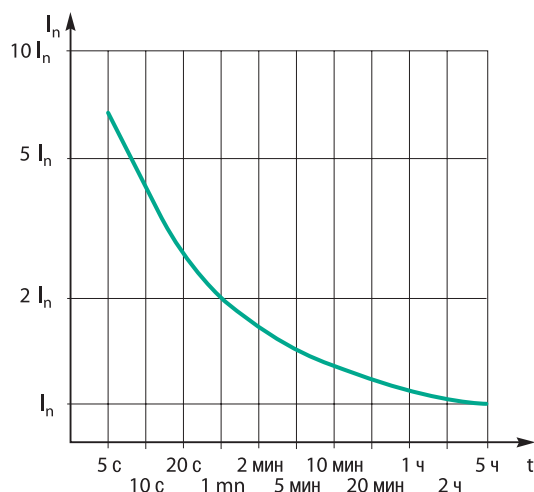


Рис. 6. Порядок величины емкости перегрузки «залитого» трансформатора.

трансформатор более мощным. На некоторых распределительных пунктах используют данные о максиметрах тока, чтобы иметь возможность контролировать изменение потребляемой пиковой мощности на каждом трансформаторе.

Промышленная распределительная сеть

На промышленной установке состояние перегрузки может быть кратковременным и связанным, например, с фазой пуска оборудования, либо может продлиться в случае быстрого увеличения нагрузок. На этих установках общее распределительное устройство низкого напряжения, которое находится ниже по цепи непосредственно за трансформатором, оборудовано выключателями, которые обеспечивают защиту от длительной перегрузки. Таким образом, управление осуществляется со стороны низкого напряжения либо путем разгрузки, используемой для комплексных установок, либо путем общего отключения, если никакое отключение ниже по цепи ранее не проводилось.

Распределительная сеть сферы услуг

Что касается оборудования, используемого в секторе «сферы обслуживания», например, в офисных зданиях, торговых центрах и т.д., критерии бесперебойности работы имеют большое значение. Здесь нет каких-либо периодических нагрузок с одинаковым режимом пуска или работы. Разгрузка требуется в случае перегрузки трансформатора и может проводиться в ущерб каким-либо не приоритетным видам применения, например, отоплению или кондиционированию. Функция «загрузки» все чаще интегрируется в систему GTB (управление техническим обслуживанием здания).

2.4. Короткое замыкание в сети низкого напряжения

В случае возникновения повреждения ниже трансформатора полное сопротивление цепей низкого напряжения очень быстро приобретает решающее значение при вычислении тока короткого замыкания (см. Техническую тетрадь № 158. Вычисление тока короткого замыкания), и только повреждения, возникшие в непосредственной близости от трансформатора, оказывают на него существенное действие. Против этих повреждений используются либо соответствующие устройства защиты по низкому напряжению (предохранители или выключатели), либо защита по среднему напряжению, устанавливаемая выше трансформатора, в случае повреждения выше защит по низкому напряжению.

Следует напомнить, что трансформатор с напряжением короткого замыкания 5 % имеет ток короткого замыкания $20 I_n$, при том что источник мощности является бесконечным и полное сопротивление короткого замыкания в цепи низкого напряжения нулевое. Вариант бесконечного источника мощности часто реализуется на практике в распределительных сетях общего назначения, где единичная мощность трансформаторов для распределительных сетей низкая по сравнению с мощностью короткого замыкания в сети среднего напряжения. Этот вариант обычно не рассматривается в

отношении сетей промышленного сектора и сферы услуг, поскольку если не учитывать полное сопротивление источника, то будут возникать слишком большие проблемы при разработке участков сети низкого напряжения и организации соответствующей защиты. Для трансформатора, в случае повреждения в сети низкого напряжения в непосредственной близости от его выводов, создается тепловая нагрузка, обусловленная силой и продолжительностью повреждения, и механическая нагрузка, создаваемая действием электродинамической силы, прежде всего, в момент возникновения повреждения. Трансформаторы, главным образом, рассчитаны, чтобы выдерживать короткое замыкание на выводах (бесконечный источник энергии и сболченное контактное соединение), что соответствует более тяжелым условиям при возможном повреждении, чем все рассматриваемые варианты режима эксплуатации. Однако повторное возникновение повреждений может носить накопительный характер и, например, оказывать действие на обмотки и, вызвать, в частности, их преждевременное старение. Во всех случаях продолжительность действия повреждения должна быть ограничена защитой, в противном случае создается риск разрушения оборудования в результате теплового воздействия.

2.5. Развитие внутренних повреждений

Замыкание между витками обмотки

Замыкание между витками обмотки среднего напряжения является наиболее распространенным, а также наиболее трудно определяемым повреждением. Оно возникает в результате локального повреждения изоляции провода под действием тепловой нагрузки или механического напряжения диэлектрика. Сразу же возникает незначительное увеличение тока первичной обмотки в

результате изменения коэффициента трансформации, с одной стороны, и появления короткозамкнутого витка на соответствующей обмотке. Этот поврежденный виток функционирует как вторичная обмотка и пропускает ток, ограниченный только его собственным полным сопротивлением и сопротивлением в месте повреждения (см. рис. 7).

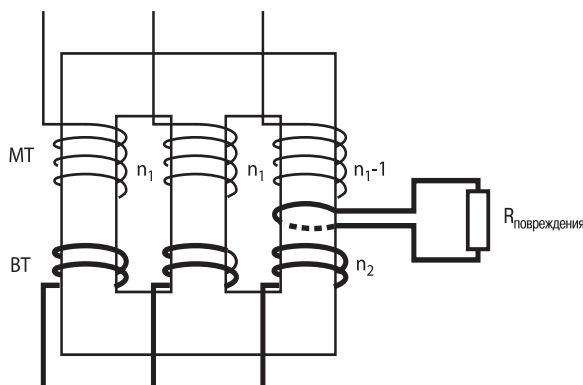


Рис. 7. Работа трансформатора с короткозамкнутым витком в первичной обмотке.

В зависимости от тока, который проходит через этот виток, развитие повреждения будет более быстрым или менее быстрым. В случае возникновения большого тока местный нагрев приведет к повреждению соседних витков, и замыкание будет быстро распространяться. Порядок величины соответствует примерно стократному значению номинального тока или составляет около 1 кА для первичной обмотки трансформатора 400 кВА - 20 кВ (CIREД 1991/1.14). Во всех случаях под воздействием локальной дуги происходит выделение газа, независимо от того, используется «залитый» или сухой трансформатор. Это газовыделение может вызвать значительное повышение давления, вплоть до пробоя элемента конструкции (бака или твердого диэлектрика).

Если повреждение вызывает слабый первичный ток, то явление может развиваться медленно и его бывает трудно обнаружить путем контроля тока питания. В ходе лабораторных испытаний залитых трансформаторов были зарегистрированы значения тока, от 1 до 6 раз кратные номинальному току, при значительном выделении газа и повреждении до 8 % витков первичных обмоток (CIREД 1991/1.14). Поэтому контроль газовыделения или давления может использоваться как дополнительная мера наряду с защитой, основанной на измерении тока.

Замыкание между обмотками

■ Обмотки трансформаторов среднего напряжения Замыкания между обмотками трансформаторов среднего напряжения происходят редко, но могут вызвать большой ток повреждения, вплоть до значений тока короткого замыкания сети в случае повреждения на выводах, характеризующиеся очень значительными проявлениями. Некоторые повреждения определенной локализации, например, замыкание между обмотками вблизи подсоединения нейтрали по схеме «звезда» сходны с замыканием между витками обмотки, так как напряжение в точках контактирования имеет не очень большую разницу.

■ Обмотки трансформаторов низкого напряжения Замыкание между обмотками низкого напряжения возникает в исключительных случаях, так как эти обмотки находятся ближе всего к магнитопроводу и окружены обмотками среднего напряжения. В случае если на одном и том же стержне магнитопровода смонтированы несколько обмоток низкого напряжения (например, соединение по схеме «зигзаг»), существует вероятность возникновения замыкания. Во всех случаях ток повреждения, по-прежнему, меньше тока короткого замыкания на выводах вторичных обмоток, но процесс развития повреждения может быть быстрым из-за наличия большой электрической дуги.

■ Обмотки среднего/низкого напряжения Замыкание между обмотками может также вызвать установление контакта между первичной и вторичной обмотками и появление опасного потенциала в сети низкого напряжения (см.: Техническая тетрадь № 172. Схемы заземления для сетей низкого напряжения). Риск для оборудования и персонала зависит от режима работы нейтрали в обеих сетях (см. рис. 8). В некоторых случаях применения для того, чтобы в первую очередь обеспечить надежность работы обмотки самого низкого напряжения, используется заземленный экран, установленный между первичными и вторичными обмотками, позволяющий исключить вероятность возникновения этого повреждения путем защиты от замыканий фазы на землю. В этом случае используются разные заземлители корпуса и нейтрали низкого напряжения, что позволяет избежать повышения потенциала сети низкого напряжения относительно земли.

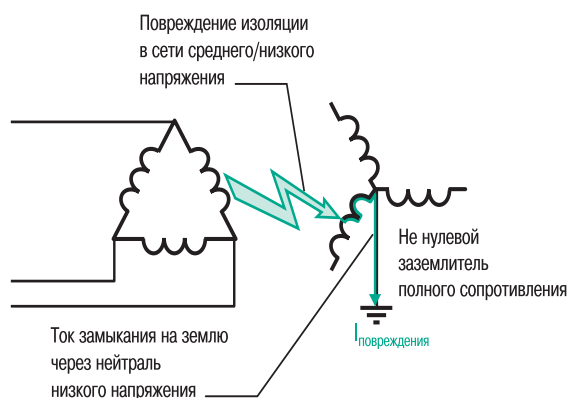


Рис. 8. Пример замыкания между первичной и вторичной обмотками.

Замыкание на корпус и влияние режима работы нейтрали

Замыкания между обмотками трансформатора среднего напряжения и корпусом чаще всего возникают из-за пробоя изоляции в результате перенапряжения. Однако такие замыкания также могут быть следствием механических повреждений или развитием электрического повреждения, как указано выше. Характеристики замыкания на корпус, а также возможности его обнаружения определяются способом заземления сети питания и местонахождением повреждения в трансформаторе (см. рис. 9).

■ В случае использования схемы с нераспределенной нейтралью среднего напряжения, заземленной через индуктивное сопротивление, вследствие повреждения возникает ток замыкания на землю, который зависит от полного сопротивления нейтрали и местонахождения повреждения на обмотке. Если ток повреждения очень слабый, то создается риск медленного повышения давления, как при замыкании между витками обмотки. Точное определение тока замыкания на землю является эффективным способом защиты от этого вида повреждений; однако, не всегда представляется возможным, технически и/или экономически, обеспечить такую защиту.

■ В сети с согласованной нейтралью (заземленной через катушку Петерсена) пробой изоляции «залитого» трансформатора будет носить характер повторяющегося повреждения с самогашением. Малое значение тока повреждения обеспечивает его спонтанное гашение в масле, и постепенное повторное возникновение напряжения, характерное для сети с согласованной

нейтралью, вызывает повторный пробой, который происходит через несколько сотен миллисекунд. Эти явления будут возникать все чаще, если наблюдается постепенное ухудшение работы оборудования в результате последовательных пробоев, вызывающих снижение электрической прочности.

■ В случае использования схемы с глухозаземленной и распределенной нейтралью (4-проводная сеть, северо-американский тип) присутствие тока нейтрали считается нормальным из-за наличия однофазных нагрузок, и появление повреждения будет увеличивать этот ток (в зависимости от полного сопротивления не короткозамкнутого участка обмотки). Таким образом, данная ситуация аналогична условиям короткого замыкания в автотрансформаторе. Ток повреждения будет всегда большим, и потребуются быстрое вмешательство, для предотвращения риска возникновения взрыва. Однако существует опасность того, что защиты сети не определяют этот ток, так как они настроены на ток нейтрали большой силы (до 40 % номинального тока линии). Поэтому должна срабатывать защита трансформатора.

Значительная часть замыканий происходит на корпус трансформатора, то есть на землю. Поэтому требуется обеспечить защиту от замыканий на землю. Поскольку в нормальном режиме ток замыкания на землю является нулевым (за исключением сетей с заземленной и распределенной нейтралью), такая защита может иметь низкую уставку, например, 10 % от номинального тока с выдержкой времени 100 мс, в случае использования трансформаторов тока, и значением в несколько ампер, в случае использования датчика тока нулевой последовательности.

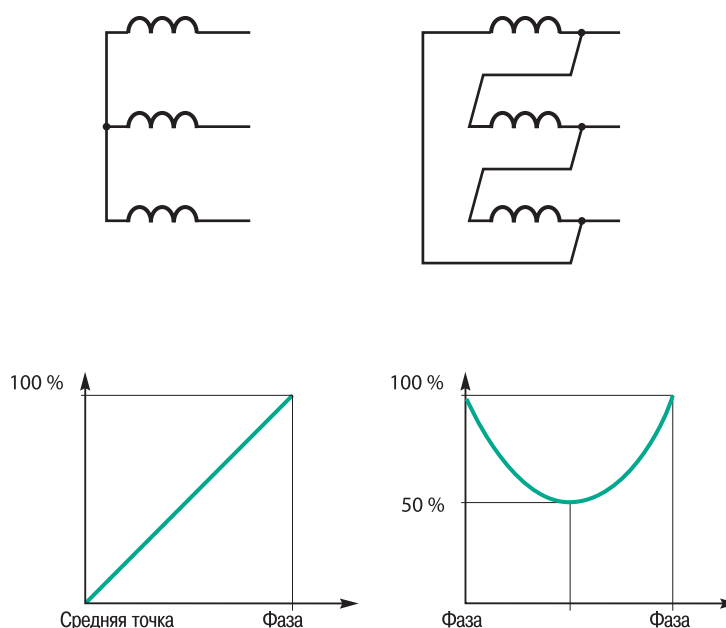


Рис. 9. Ток замыкания на корпус в зависимости от схемы соединения среднего напряжения и местонахождения повреждения.

2.6. Повреждения, связанные с технологией

Внутренние повреждения трансформаторов, в основном, являются следствием действия внешних нагрузок (перенапряжения, ток перегрузки). Выше были описаны различные виды повреждений и их возможные последствия.

Однако следует рассмотреть другие повреждения, которые могут возникнуть, в зависимости от технологии, используемой в конструкции трансформатора.

■ «Залитые» трансформаторы

□ Своевременно не обнаруженная утечка диэлектрика приведет к электрическому повреждению из-за нарушения изоляции выше обмоток. Такая утечка может возникнуть, например, в результате коррозии бака трансформатора или удара.

□ Загрязнение диэлектрика под воздействием частиц, выпускаемых из бака, магнитопровода или от изоляционных материалов, либо в результате попадания воды может также быть причиной ухудшения состояния диэлектрика.

Для трансформаторов распределительных сетей обычно не ведется контроль подобного вида загрязнения.

■ Трансформаторы с твердым диэлектриком

□ Ненормальные механические нагрузки (удары, усилия сжатия соединений и т.д.) могут вызвать растрескивание

электроизоляционного материала, в результате чего возможен пробой между витками обмотки или на соседние части корпуса.

□ Растрескивание диэлектрика может также быть следствием ненормальной эксплуатации трансформатора.

□ Недостатки формовки твердой изоляции могут быть причиной возникновения частичных разрядов, если в диэлектрике имеются пузырьки в местах с большим электрическим полем. В результате этого явления происходит внутреннее разрушение материала вплоть до возникновения серьезного повреждения.

□ Присутствие внешних загрязняющих веществ (пыль) на трансформаторах такого типа нарушает распределение механической напряженности диэлектрика по поверхности и может вызвать повреждение изоляции.

□ Расположение металлических частей на расстоянии меньше, чем указано изготовителем, может локально создать избыточную нагрузку на изоляцию.

На **рисунке 10** представлена сводная таблица эксплуатационных нагрузок и последствий их воздействия.

Нагрузка	Возможная причина возникновения	Наиболее вероятное повреждение	Первоначальные признаки
Перенапряжение	Ближний удар молнии Коммутационные операции в сети	Пробой между витками обмотки среднего напряжения Пробой между обмоткой и корпусом	Выделение газа или дыма Слабое увеличение фазного тока Ток замыкания на землю
Слабый ток перегрузки	Перегрузка Импедансное повреждение в сети низкого напряжения	Разрушение обмоток в местах наибольшего нагрева с замыканием накоротко витков	Выделение газа или дыма Слабое увеличение фазного тока
Большой ток перегрузки	Ближнее повреждение в сети низкого напряжения	Разрушение обмоток в местах наибольшего нагрева с замыканием накоротко витков и смещением катушек	Быстрое и случайное возникновение замыкания между обмотками
Старение	Кумулятивное действие предыдущих нагрузок	Пробой между витками обмотки среднего напряжения Возможное возникновение замыкания на землю	Выделение газа или дыма Слабое увеличение фазного тока Ток замыкания на землю

Примечание. Все виды повреждений, если они не устранены в их начальной фазе, могут явиться причиной общего повреждения различных обмоток и иметь серьезные последствия: разрыв бака и/или взрыв катушек, возможно, сопровождающийся пожаром.

Рис. 10. Сводная таблица эксплуатационных нагрузок и последствий их воздействия.

3. Защита от перенапряжений

3.1. Общие положения

Трансформатор с односторонним питанием или расположенный в месте размыкания петли имеет при высокой частоте очень большое полное сопротивление, сравнимое с волновым сопротивлением кабеля или питающей линии. Поэтому при распространении волн этот трансформатор представляет собой место, почти полностью отражающее волны, и нагрузка на трансформатор может достигать на первоначальном этапе двукратного значения максимального напряжения падающей волны. Для обеспечения высокой эффективности защиты важно, чтобы

ограничивающие устройства устанавливались в непосредственной близости от трансформатора. Соответствующий порядок величин составляет порядка десятка метров. Условия установки, с учетом, в частности, длины соединений и значений заземлителей, в очень значительной степени определяют параметры защиты (см.: Техническая тетрадь № 151. Перенапряжения и координация изоляции. Техническая тетрадь № 168. Разряд молнии и электрические установки среднего напряжения).

3.2. Искровые и грозовые разрядники

Широко используются два способа защиты от перенапряжений: с помощью искровых и грозовых разрядников. Искровые разрядники являются наиболее дешевыми и наиболее простыми устройствами. Они применяются исключительно в воздушных сетях. Грозовые разрядники обеспечивают более эффективную защиту, но их использование требует значительно больше затрат.

Искровые разрядники

Искровой разрядник представляет собой простое устройство, состоящее из двух электродов, находящихся в воздухе. Ограничение напряжения на выводах осуществляется с помощью дугового разряда в воздушном промежутке. Данный режим работы имеет ряд недостатков:

- Большое рассеяние при дуговом разряде в зависимости от условий окружающей среды (влажность, запыленность, присутствие инородных тел и т.д.).
- Уровень защиты зависит от крутизны фронта перенапряжения. В действительности, воздух дает «задержку дугового разряда», в результате чего большое перенапряжение с очень крутым фронтом вызывает дуговой разряд при пиковом значении, значительно превышающем требуемый уровень защиты (см. рис. 11).
- При срабатывании искрового разрядника возникает ток замыкания на землю. Этот «сопровождающий» ток, сила которого зависит от режима заземления нейтрали сети, обычно не может спонтанно погаситься, в результате чего требуется защита со стороны источника питания. Автоматическое повторное включение, выполненное

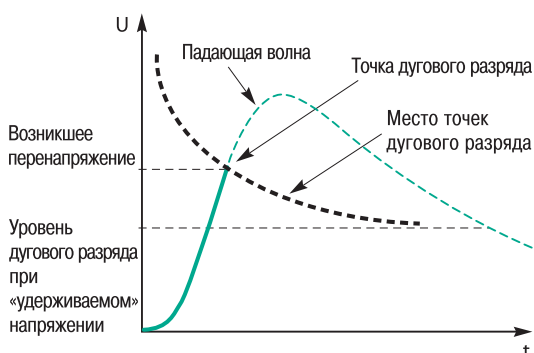


Рис. 11. Характеристики искрового разрядника с крутым фронтом; при увеличении характеристики dV/dt повышается возникшее перенапряжение.

за несколько сотен миллисекунд, позволяет восстановить электроснабжение. Такие устройства, как шунтирующие выключатели, используемые в сетях с резистивно-заземленной нейтралью, обеспечивают гашение дуги и устранение повреждения без отключения электроснабжения.

Грозовые разрядники

Грозовые разрядники позволяют устранить пагубное влияние этого явления, так как оказывают обратное действие. Они имеют большое нелинейное сопротивление при значительном уменьшении их внутреннего сопротивления ниже определенного значения напряжения на выводах. Эти устройства обладают лучшей эксплуатационной воспроизводимостью, чем искровые разрядники, и не дают «задержки дугового разряда».

Старые модели с использованием карбида кремния (SiC) не способны выдерживать в постоянном режиме рабочее напряжение, так как они имеют слишком большой ток нулевой последовательности и вызывают недопустимое выделение тепла. В результате они используются вместе с последовательно подсоединенным разрядником, который обеспечивает отключение тока нулевой последовательности и может выдерживать рабочее напряжение. Более поздние модели с использованием окиси цинка (ZnO) обладают более выраженной нелинейностью, что позволяет этим устройствам иметь ток утечки при рабочем напряжении порядка 10 мА. Таким образом, активные части могут постоянно находиться под напряжением. Большая нелинейность разрядников этого типа повышает также эффективность защиты при большом токе (см. рис. 12).

Грозовые разрядники с окисью цинка, применение которых расширяется, могут использоваться в воздушных сетях, в ячейках или в схемах расширения на арматуре разъёмных соединений. Таким образом, все варианты установки могут быть реализованы.

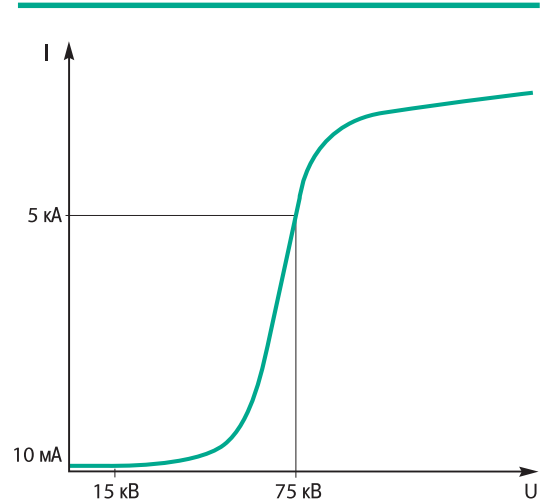


Рис. 12. Пример характеристики грозового разрядника с окисью цинка (ZnO), используемого в сети 20 кВ, с изоляцией 125 кВ «от грозового импульса».

4. Защита от перегрузок

4.1. Защита путем измерения тока

Защита от перегрузок должна иметь уставку 110 - 150 % от номинального тока и, желательно, обеспечивать срабатывание с зависимой выдержкой времени. Защита может устанавливаться либо со стороны сети среднего напряжения, либо со стороны сети низкого напряжения.

Чем меньше мощность трансформатора, тем больше адаптирована установка защиты со стороны низкого напряжения. И наоборот, чем больше мощность трансформатора, тем более обоснованным является размещение защиты со стороны сети среднего напряжения.

Защита по среднему напряжению

Защита от перегрузок со стороны среднего напряжения требуется, когда речь идет об использовании трансформаторов большой мощности с выключателем среднего напряжения, соединенными с защитами источника оперативного питания. Эти защиты могут иметь постоянную или зависимую выдержку времени. С помощью этих функций обеспечивается также защита от большого тока повреждения (при возможном повреждении в сети среднего напряжения). Во всех случаях должны соблюдаться требования селективности по отношению к функциям защиты по низкому напряжению.

Защита по низкому напряжению

Защита по низкому напряжению легко обеспечивается с помощью выключателя общего назначения для сети низкого напряжения. Этот тип устройств имеет кривую обратно зависимой выдержки времени (называемую тепловой или с большой выдержкой времени), которая обычно усиливает защиту трансформатора. В действительности постоянная времени и инерция, которые учитываются при определении этой кривой, являются характеристиками линий низкого напряжения, меньшими по значению, чем эти параметры для трансформатора.

Чтобы обеспечить защиту трансформатора, регулировки выключателя выполняются не в зависимости от теплостойкости проводов со стороны потребителя, что часто является привычной методикой для сетей низкого напряжения, но в зависимости от номинального тока трансформатора, установленного со стороны источника питания, который обычно меньше номинального значения тока проводов. Если этот выключатель общего назначения имеет выдержку времени, то для обеспечения временной селективности с помощью выключателей отходящих фидеров низкого напряжения селективность с возможной защитой по среднему напряжению может быть затруднительной. Данная тема рассматривается ниже в параграфах, посвященных организации защиты по среднему напряжению.

В случае использования подобной схемы защиты по низкому напряжению следует напомнить, что выбирается функция защиты трансформатора от перегрузок и коротких замыканий в сети низкого напряжения, а не защита от внутренних повреждений.

В распределительных сетях общего пользования обычно применяются предохранители на отходящих линиях низкого напряжения, если наблюдается, что ток повреждения в любой точке сети достаточно большой. Эти предохранители откалиброваны так, что срабатывают только при коротком замыкании между проводами сети низкого напряжения общего пользования и ни коим образом не защищают трансформатор от перегрузки. Таким образом, использование предохранителей, обеспечивающих быстрое действие при больших значениях тока повреждения, позволяет легко координировать функции защиты с возможной защитой по среднему напряжению.

Особый случай представляет собой воздушная распределительная сеть общего пользования низкого напряжения, имеющая большое полное сопротивление в результате значительной протяженности линий и использования неизолированных проводов. В такой сети могут возникать, удаленные от трансформатора, глухие замыкания между фазами или между фазой и землей, при этом ток остается слабым, например, порядка $2 - 3 I_n$ трансформатора. Такие условия возникновения повреждения представляют риск для людей, находящихся в районе возникновения повреждения, а также риск для трансформатора, если аварийная ситуация сохраняется. Обычные устройства защиты от короткого замыкания, например, предохранители не срабатывают при подобных повреждениях, и может потребоваться защита «от перегрузки» с помощью выключателя. Расцепители, соединенные с такими выключателями низкого напряжения, могут иметь функцию «тепловой защиты», допускающую однофазную перегрузку, если другие фазы имеют небольшую нагрузку и результирующая температура внутри трансформатора остается в допустимых пределах. Подобный вариант защиты годится исключительно для «залитых» трансформаторов, в которых жидкий диэлектрик обеспечивает теплообмен между различными конструктивными элементами.

Это решение особенно подходит для распределительной сети общего пользования, в которой трудно оптимизировать увеличение нагрузок, подсоединенных к одному трансформатору малой мощности. Подобная схема используется в выключателях, предназначенных для мачтовых трансформаторов, и позволяет, таким образом, исключить необоснованные отключения потребителей.

Выбранный метод заключается в том, чтобы вновь создать в расцепителе взаимодействие через теплообмен между тремя составляющими элементами измерения тока – обычно это сопротивления с положительным температурным коэффициентом – а также общую тепловую инерцию, характерную для инерции защищаемого трансформатора. Таким образом, при той же максимальной температуре в месте локального перегрева в трансформаторе ток отключения в постоянном несимметричном режиме может быть значительно больше, чем при защите в независимых фазах.

Кроме того, с учетом тепловой инерции обеспечивается лучшее использование трансформатора при временных перегрузках (см. рис. 13).

	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Предельный случай	0	0	2,15
Частый случай	0,8	0,8	1,6
Без тепловой защиты	1,2	1,2	1,2

Рис. 13. Тепловая защита. Различные возможные случаи работы в несимметричном режиме.

4.2. Защита путем измерения температуры

Контроль температуры обмоток является наиболее востребованной операцией, так как именно влияние температуры вызывает старение электроизоляционных материалов.

Однако, поскольку происходит нагрев участков и деталей, находящихся под напряжением, обычно измерение не может производиться непосредственно в этих местах. Небольшая скорость изменения температуры при значениях тока в области возникновения перегрузки, обусловленная тепловой инерцией трансформатора, позволяет считать, что измерения остаются показательными.

В случае быстрого повышения температуры обмоток обычно определяется свертток.

Для «залитых» трансформаторов обычно осуществляется контроль температуры масла. В действительности жидкий диэлектрик оказывает охлаждающее действие на обмотки и влияет на поддержание однородной температуры внутри трансформатора. Это измерение температуры можно выполнять с помощью термостата, способного в автономном режиме выдавать данные на выходной контакт.

При необходимости, могут быть использованы две уставки, чтобы определить уровень аварийной сигнализации, например, с последующей разгрузкой или принудительным охлаждением и уровень отключения. Такая функция предусмотрена в устройствах типа DGPT2, описание которых представлено ниже в настоящем документе.

Для сухих трансформаторов в защитной оболочке необходимо выполнять многократные измерения, так как в случае возникновения несимметрии температура обмоток может очень сильно отличаться. Кроме того, термостаты, активные части которых имеют достаточно большие габариты, не очень подходят для данного вида измерений. Изготовители предлагают оснастить трансформатор платиновыми зондами, как некоторые двигатели для сетей среднего напряжения. Обычно каждая обмотка оборудуется двумя датчиками типа зонд, чтобы непосредственно контролировать места наибольшего нагрева. Эти датчики подключаются к электронным устройствам обработки данных, которые могут выдавать несколько уставок, используемых либо для разгрузки, либо для общего отключения.

5. Защита предохранителями среднего напряжения и при помощи блоков выключатель-предохранители

В соответствии с эксплуатационными – выполнение коммутационных операций, замена предохранителей, секционирование – предохранители устанавливаются ниже коммутационного устройства. Часто используется блок выключатель-предохранители. В этом случае предохранители устанавливаются в выключатель, при этом не

обязательно существует связь между срабатыванием предохранителей и работой выключателя. Если используемый предохранитель имеет боек, обеспечивающий отключение выключателя в случае плавления плавкого элемента предохранителя, такое устройство называется «блок выключатель-предохранители»

5.1. Характеристики предохранителей среднего напряжения

Общие положения

Предохранители представляют собой устройства защиты, очень широко используемые для трансформаторов распределительных сетей, главным образом, благодаря простоте их устройства и ограниченной стоимости соответствующего материала. Однако ограничения в их технологическом исполнении создают определенные недостатки или являются причиной несовершенства, из-за чего защита предохранителями рассматривается как относительно примитивный метод.

Характеристиками предохранителей является их номинальный ток, то есть допустимое максимальное значение тока, который выдерживает предохранитель в постоянном режиме при наружной установке, и времятоковая характеристика. Номинальный ток зависит от критериев нагрева в постоянном режиме контактных поверхностей и изолирующих оболочек. Он не соответствует току перегорания. Всегда имеется зона значений тока между номинальным током и началом времятоковой характеристики. Ток, значения которого находятся в этой зоне, вызывает недопустимый нагрев, в результате чего происходит постепенное повреждение предохранителя и окружающего его оборудования. Некоторые предохранители имеют устройства, чувствительные к изменениям температуры, предназначенные для отключения выключателя, если он используется в блоке с предохранителем.

Классификация предохранителей среднего напряжения

Предохранители подразделяются на две больших группы: стреляющие предохранители и ограничивающие предохранители. Стреляющие предохранители широко используются в воздушных распределительных сетях северо-американского типа, в горной местности, часто обеспечивая автоматическое разделение энергосистемы. Однако, в силу того, что предохранители этого типа не являются ограничивающими, имеют лимитированную отключающую способность и, прежде всего, в силу того, что они оказывают воздействие на окружающую среду,

находят все меньшее применение. В связи с этим далее в настоящем документе рассматриваются только ограничивающие предохранители, указанные в стандарте МЭК 282.

- Среди предохранителей этого типа наиболее широко применяются предохранители категории «резервный» (или «соединенный»). Они имеют минимальный ток отключения (I_3 в соответствии со стандартами), превышающий их минимальный ток перегорания.

- Предохранители категории «общего назначения» (или «общего применения») представляют собой устройства, имеющие такой минимальный ток отключения, что соответствующее время плавления плавкого элемента превышает один час.

- Предохранители категории «весь диапазон» (или «полное отключение») гарантируют отключение при всех значениях тока, вызывающего плавление плавкого элемента, вплоть до значений отключающей способности при коротком замыкании. Эти предохранители, как правило, являются более дорогостоящими, чем устройства категории «резервный», что ограничивает их применение. Кроме того, они также могут перегреваться и, таким образом, не способны обеспечить все варианты защиты.

Кривые характеристик предохранителей демонстрируют следующее:

- минимальный ток плавления плавкого элемента в 2 – 5 раз превышает значение номинального тока в зависимости от типа предохранителя;

- время срабатывания в очень большой степени зависит от тока и может существенно изменяться (допуск на отклонение значения тока составляет $\pm 10\%$). Точная форма кривой зависит от типа предохранителя и от его конструкции. Время срабатывания очень мало при больших значениях тока, в 20 раз превышающих номинальный ток (см. рис. 14).

Критерии выбора

Способность ограничивающих предохранителей срабатывать за время порядка нескольких миллисекунд при большом токе составляет их основное преимущество, кроме их стоимости. Эта характеристика позволяет предохранителям обеспечивать ограничивающее действие тока, которое очень востребовано на установках с большим током короткого замыкания. В действительности, разработчик может делать расчет проводов и элементов электрической цепи со стороны потребителя с учетом этого ограничивающего действия и, таким образом, использовать значения стойкости к току повреждения значительно меньше тока короткого замыкания сети. Это ограничение позволяет также уменьшить разрушающее действие серьезного повреждения.

Правила выбора предохранителей, предлагаемые производителями и обусловленные характеристиками каждого типа предохранителей, основываются на следующих критериях:

- рабочее напряжение трансформатора;
 - пусковой ток;
 - в целом допустимая возможность временной перегрузки трансформатора;
 - необходимость устранения за достаточно короткое время ближнего повреждения в сети низкого напряжения (выше устройств защиты низкого напряжения);
 - соблюдение принципа селективности в отношении защит по низкому напряжению (см. рис. 15).
- Эти критерии указаны в Приложении 1.

Необходимость учитывать все эти критерии, а также величину тока короткого замыкания в сети среднего напряжения, условия установки и возможное обеспечение селективности делает процесс подбора соответствующего типа предохранителей достаточно сложным. В результате на некоторых установках используются предохранители, которые не обеспечивают должным образом функцию защиты, для которой они были выбраны. Это может привести либо к случайному перегоранию предохранителя при включении напряжения, либо к отсутствию защиты из-за рассогласования характеристик.

5.2. Допуски на предохранители

Меры предосторожности при обращении с предохранителями

Конструкция предохранителей – провода или металлические ленты, параллельно соединенные в песке – имеет определенную механическую хрупкость, что необходимо учитывать при манипуляциях или транспортировке оборудования. Часто наблюдались случаи повреждения предохранителей из-за разрыва одного или нескольких проводов при отсутствии какого-либо электрического воздействия. Использование поврежденного предохранителя эквивалентно применению устройства с ненормально низкой

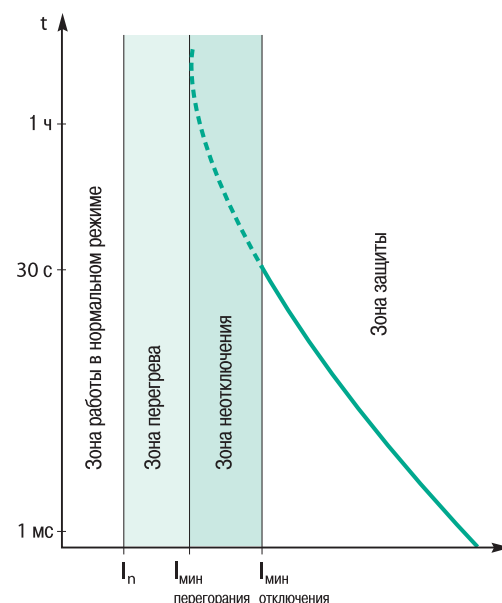


Рис. 14. Типовая характеристика «соединенного» предохранителя.

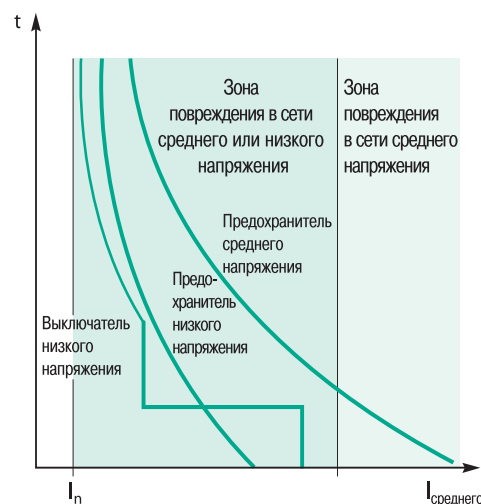


Рис. 15. Селективность между предохранителями среднего напряжения и защитами низкого напряжения.

номинальной характеристикой и быстро приводит к лавинному повышению температуры. Такое явление может иметь катастрофические последствия для коммутационной аппаратуры и, соответственно, для установки в целом. Во избежание подобного рода аварий эксплуатационный персонал может проводить измерение сопротивления непосредственно перед установкой, чтобы убедиться, что предохранители по своим характеристикам отвечают техническим требованиям и, соответственно, не произошло разрыва проводов.

Запрещенные рабочие точки

- «Запретная» зона «резервных» предохранителей расположена между номинальными значениями тока и минимальным током отключения. В этой зоне последовательно наблюдаются два состояния:
 - в пределах между номинальным током и минимальным током плавления в результате перегрева может быть повреждена оболочка предохранителя и его окружение внутри коммутационного оборудования;
 - в пределах между минимальным током плавления и минимальным током отключения возникает дуга, которая не гасится и является причиной быстрого возникновения серьезного повреждения в сети среднего напряжения, если никакое другое устройство защиты не срабатывает.

В связи с этим следует с осторожностью подходить к использованию этих предохранителей и применять их только там, где возникновение тока, имеющего значение в пределах этой критической зоны, невозможно. Если подобная аварийная ситуация может произойти, следует использовать предохранитель в блоке с выключателем. Этот вариант рассматривается ниже. В таблице выбора МЭК 787 защиты трансформаторов предохранителями указаны эти различные критерии.

- Предохранители «полного диапазона» не имеют минимального тока отключения. Таким образом, их «запретная» зона ограничивается значениями тока в пределах между номинальным током и минимальным током перегорания предохранителя. Эта зона является проблематичной только в случае возникновения квазипостоянных явлений, которые могут вызвать разрушительное тепловое воздействие. Порядок величины продолжительности действия составляет час.
- При защите трансформаторов следует учитывать, что повреждения очень часто носят характер развивающегося короткого замыкания из-за присутствия слабых токов. Этот тип повреждения может оказать действие на защиту в виде токовой нагрузки, очень медленно возрастающей и превышающей номинальный ток. Подобное развитие процесса в цепи, защищаемой предохранителями, независимо от их типа, может рассматриваться как опасное, поскольку предохранитель будет систематически попадать в его критическую зону. При небольшой скорости развития повреждения в трансформаторе возможен, в итоге, отказ коммутационного аппарата из-за лавинного теплового эффекта или неотключения предохранителем.

Например, трансформатор 400 кВА под напряжением 11 кВ защищен «резервными» предохранителями, рассчитанными на номинальный ток 40 А в соответствии с таблицей выбора предохранителей, представленной изготовителем, в то время как номинальный ток трансформатора составляет 21 А. Соответствующая времятоковая характеристика такого предохранителя показывает минимальный ток перегорания примерно 100 А при минимальном токе отключения примерно 130 А. В случае замыкания между витками первичной обмотки возникает большая вероятность того, что предохранитель будет под опасным действием тока, когда минимальный ток отключения будет примерно в 6 раз превышать номинальный ток трансформатора.

Однофазный режим

Если предположить, что перегорает один предохранитель, то трансформатор получает питание по двум оставшимся фазам. В зависимости от соединения трансформаторов под действием нагрузок низкого напряжения будут наблюдаться другие условия. В случае соединения по схеме треугольник-звезда в двух фазах низкого напряжения из трех будет пониженное напряжение, и фазовый сдвиг больше не будет соблюдаться. Такие условия, главным образом, вредны для трехфазных двигателей, а также для однофазных двигателей, подсоединенных к фазам с пониженным напряжением. Пониженное напряжение может также быть причиной нарушения нормальной работы другого оборудования, например, реле или разрядных ламп. Таким образом, разделение одной фазы чаще всего соответствует режиму, переход в который не следует допускать и который может рассматриваться как более опасный, чем отключение электроснабжения.

Трансформаторы, соединенные параллельно

В случае использования трансформаторов, соединенных параллельно, необходимо обеспечить их защиту с помощью общего устройства. Это позволяет избежать восстановления питания после повреждения трансформатора через низковольтное соединение (см. рис. 16).

Если необходимо обеспечить эту защиту с помощью предохранителей, то в соответствии с вышеизложенными критериями расчета предохранители подбираются по результирующему току обоих трансформаторов. В связи с этим значения минимального тока перегорания и отключения увеличиваются примерно на коэффициент 2 по сравнению с вариантом защиты предохранителями одного трансформатора. При этом степень защиты от внутреннего повреждения одного из двух трансформаторов значительно снижается. Вследствие этого возрастает риск возникновения критических условий перегрева или плавления предохранителей на уровне ниже значений I_3 . Таким образом, не рекомендуется использовать защиту предохранителями для подобных вариантов применения оборудования.

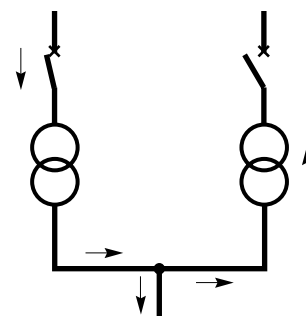


Рис. 16. Прохождение тока после отключения защиты по среднему напряжению в случае возникновения замыкания первичной обмотки.

5.3. Использование блока выключатель-предохранители

Преимущества использования

Случайное перегорание предохранителя по причине старения или действия переходных процессов является основной причиной возникновения режима работы при отсутствии одной фазы среднего напряжения.

Однофазное разделение устраняется за счет использования блока выключатель-предохранители, в котором предохранители имеют боек. В этом устройстве первый предохранитель срабатывает и своим бойком воздействует на механизм выключателя, тем самым, вызывая его отключение. Таким образом, отключение питания осуществляется по трем фазам независимо от причины перегорания предохранителя.

Этот режим работы позволяет также производить отключение выключателем токов повреждения с низкими значениями, расположенными в запретной зоне предохранителя (между значениями минимального тока перегорания и минимального тока отключения I_3). В результате исключается риск, связанный с возможностью неотключения предохранителем.

Напротив, в силу того, что выключатель в блоке выключатель-предохранители не обладает отключающей способностью при повреждении вплоть до значений тока короткого замыкания, выбор пары выключатель-предохранители должен осуществляться в соответствии с правилами согласования. Эти правила направлены на то, чтобы полностью обеспечить отключающую способность выключателя. Они изложены в документе МЭК 420.

С помощью блока выключатель-предохранители осуществляется разделение аварийных ситуаций:

- ток большой силы подавляется предохранителями, когда используется их отключающая способность и ограничивающее действие;
- более слабый ток подавляется выключателем, срабатывающим под действием бойка предохранителя или в результате какого-либо внешнего воздействия.

Недостатки использования

Среди параметров, которые учитываются при выборе пары выключатель-предохранители, рассматривается способность выключателя отключать ток «переноса». Значение тока переноса определяется как значение трехфазного тока, при котором предохранители и выключатель выполняют функцию отключения: при значениях непосредственно меньше этих ток на первом полюсе, который производит отключение, прерывается предохранителем, и ток на двух других полюсах прерывается выключателем; при значениях больше этих ток во всех трех фазах прерывается предохранителями. Расчет тока переноса указан в Приложении 2.

Все расчеты и испытания, проводимые с целью оценки этих условий использования, основываются на предположении, что полное сопротивление в месте повреждения является постоянным. Такая ситуация не является обязательной, так как ток повреждения, будучи развивающимся, может увеличиваться.

Позиционирование тока перехода должно также обеспечивать срабатывание предохранителей в случае возникновения повреждения, вызывающего тяжелые переходные процессы восстановления. Это, например, относится к замыканию на выводах низкого напряжения трансформатора. Некоторые случаи замыканий в сетях низкого напряжения только между двумя фазами могут, в зависимости от соединения трансформатора, явиться причиной создания критических условий, не обеспеченных защитой в соответствии со стандартом МЭК 420.

Ограничения

Выбор предохранителя в блоке выключатель-предохранители для защиты трансформатора должен осуществляться по значительному количеству критериев. Изготовители выключателей предоставляют список предохранителей, используемых в блоках их производства (марка, тип и номинал) для каждого вида применения. В случае несоблюдения этих рекомендаций защита может оказаться ненадежной или не будет обеспечена безопасность в зависимости от ситуаций и возможных повреждений. Основные правила указаны в Приложении 1. Но только соблюдение этих правил не может гарантировать защиту во всех случаях возможных повреждений.

Почти для всех предохранителей всегда существует зона перегрева, и использование блока выключатель-предохранители не обеспечивает никаких средств защиты от разрушающего теплового воздействия, если ток удерживается в этой зоне. Именно поэтому некоторые изготовители предлагают к использованию предохранители, снабженные встроенным температурным датчиком, который, в случае возникновения перегрева, позволяет отключать боек и, соответственно, весь блок.

Возможности дополнительной защиты

Блок выключатель-предохранители может использоваться для обеспечения дополнительной защиты, например, функции защиты от замыканий на землю, контроля давления или температуры.

Во всех случаях с помощью выдержки времени необходимо гарантировать соответствие значению тока переключения блока выключатель-предохранители.

Ток переключения определяется как значение тока, соответствующее точке пересечения времятоковых характеристик двух устройств максимальной токовой защиты (Международный электротехнический словарь VЕI 441-17-16), то есть как значение тока для точки пересечения кривых предохранителей, с одной стороны, и устройства дополнительной защиты, с другой стороны (МЭК 420) (см. Приложение 2).

В заключение следует отметить, что защита с помощью блока выключатель-предохранители относительно сложна и может представлять определенный риск. Поэтому разработчик электрической установки вправе выбрать защиту с помощью выключателя, с которой легче объединить какие-либо высокоэффективные функции.

6. Защита с помощью выключателей среднего напряжения, соединенных с механизмами отключения

Главным преимуществом использования выключателей является то, что они не создают критического тока — выключатель способен отключать любой ток меньше значения его отключающей способности — и дают широкий выбор эксплуатационных критериев. Предлагаемые технические решения зачастую бывают более дорогостоящими при использовании выключателей,

чем при использовании предохранителей, выключателей с плавкими предохранителями или блоков выключатель-предохранители. Однако в некоторых вариантах исполнения, например, в компактных устройствах типа Ring Main Unit удельные затраты на использование выключателей являются сходными с затратами на применение предохранителей.

6.1. Критерии выбора кривой отключения

Общие положения

Максимальная токовая защита срабатывает, если значение тока превышает значение, установленное за определенный промежуток времени. Наиболее широко используются функции защиты «с зависимой выдержкой времени», когда время отключения зависит от величины проходящего тока. В действительности они позволяют сочетать возможность установления большой выдержки времени в зонах слабого тока (перегрузка или «раннее» внутреннее повреждение) и обеспечение быстрого срабатывания в случае серьезного повреждения. Времятоковая характеристика реле также обеспечивает неотключение при возникновении переходных процессов, например, пускового тока.

В соответствии с международным стандартом (МЭК 255) предлагается несколько кривых отключения, которые дают преимущество выбора выключателей среднего напряжения.

Изготовители предлагают другие кривые отключения, лучше адаптированные к защите трансформаторов для распределительных сетей.

Селективность

Селективность заключается в отключении только защитой, расположенной ближе всего к месту повреждения, чтобы отключить минимальную часть установки или минимальный участок сети. В конкретном случае использования защиты трансформатора среднего/низкого напряжения осуществляется селективность в отношении выключателя среднего напряжения со стороны источника питания и, при необходимости, в отношении устройств защиты по низкому напряжению со стороны потребителя. В распределительных сетях общего пользования выключатель, установленный непосредственно выше устройства защиты трансформатора, является выключателем отходящей линии подстанции высокого/среднего напряжения или отводом; его параметры защиты обычно устанавливаются на значительно более высокие значения, и селективность обеспечивается без дополнительной нагрузки.

Селективность в отношении устройств, расположенных со стороны потребителя, требуется и легко выполняется в случае, когда несколько устройств защиты по низкому напряжению соединены параллельно. Если используется

общий выключатель низкого напряжения, то потеря селективности не изменяет той ситуации, когда все потребители низкого напряжения оказываются отключенными. Выключатель среднего напряжения и общая защита по низкому напряжению могут рассматриваться как устройства одного уровня селективности. В действительности нормативными и договорными документами, заключенными между поставщиком и потребителем низкого напряжения, устанавливается, что стороны только в редких случаях имеют доступ к обоим выключателям. На частных подстанциях среднего напряжения и когда используемое оборудование это позволяет, применение логической селективности между выключателем среднего напряжения и общим устройством защиты по низкому напряжению дает возможность значительно упростить процесс защиты (см.: Техническая тетрадь 2. Защита сетей с помощью системы логической селективности).

Пример

На рисунке 17 показаны уровни тока повреждения на подстанции. Можно сделать вывод, что уровень короткого замыкания в сети низкого напряжения быстро изменяется

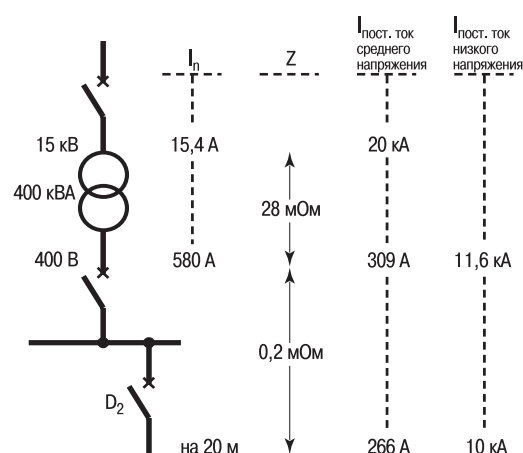


Рис. 17. Значения полного сопротивления и тока повреждения. Пример для подстанции.

только в зависимости от полного сопротивления проводов.

Если предположить, что выключатель D_2 не является ограничивающим и имеет настройку на 5 мОм трансформатора (установлен в 15–30 метрах от провода низкого напряжения), то ток повреждения, который может установиться непосредственно на его нижних выводах, будет примерно в 16 раз больше номинального тока трансформатора. В этом случае необходимо проверить, обеспечивается ли селективность при этом значении тока. Наиболее быстрая стандартная кривая (чрезвычайно обратно зависимая характеристика), параметрированная, чтобы получить 20 мс при $20 I_n$, обеспечивает время отключения, равное 31 мс. Селективность осуществляется, если выключатель D_2 устранил повреждение, как минимум, за 15 мс, чтобы учесть время запоминания реле среднего напряжения. В случае использования сложных установок в промышленных распределительных сетях возможно, чтобы непосредственно выключатель D_2 имел выдержку времени при больших значениях тока повреждения. При этом потребуются, чтобы реле среднего напряжения работало в режиме, когда обеспечивается временная селективность при значениях тока повреждения до $16 I_n$ (см. рис. 18), или использовать логическую селективность. В распределительных сетях общего пользования никогда не применяются каскадные выключатели, если полное сопротивление между ними недостаточно большое, чтобы обеспечить селективность по току.

Практические решения

Уставки, используемые для реле, только в очень редких случаях точно соответствуют номинальному току защищаемого трансформатора, что вызывает необходимость смещать кривую отключения защитой в сторону больших значений тока. В результате требуется расширять пределы селективности. Поэтому изготовители могут предложить кривые отключения, отличающиеся от стандартных кривых, позволяющие лучше адаптировать защиту к эксплуатационным требованиям для трансформаторов.

Устройство защиты трансформатора среднего напряжения должно отвечать следующим требованиям:

- всегда срабатывать быстрее, чем устройство защиты по среднему напряжению, расположенное непосредственно выше по цепи;
- срабатывать максимально быстро при значениях тока больше тока короткого замыкания по низкому напряжению ($20 - 25 I_n$ трансформатора в зависимости от Z_{cc});
- пропускать пики включения (см. рис. 19);
- обеспечивать контроль зоны перегрузки или установленной эксплуатационниками области выше зоны перегрузки.

Именно это определяет разработку кривой отключения, как показано на рисунке 20, используемой в некоторых встроенных устройствах защиты группы Schneider. Можно отметить, что такая кривая отключения обеспечивает селективность в случае использования предохранителей для сетей низкого напряжения, которые всегда позволяют очень быстро устранить повреждение

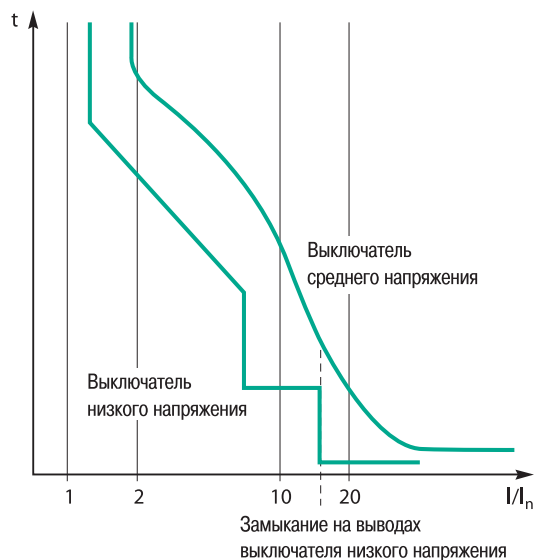


Рис. 18. Согласование с характеристикой выключателя низкого напряжения путем смещения настроек. Защита от перегрузки по низкому напряжению. Ухудшение эффективности защиты от внутренних повреждений.

P, кВА	$I_{\max.}/I_n$	Постоянная времени, мс
50	15	100
100	14	150
160	12	200
250	12	220
400	12	250
630	11	300
800	10	300
1000	10	350
1250	9	350
1600	9	400
2000	8	450

Рис. 19. Значения пускового тока относительно значений номинального тока (максимум) для «залитых» трансформаторов.

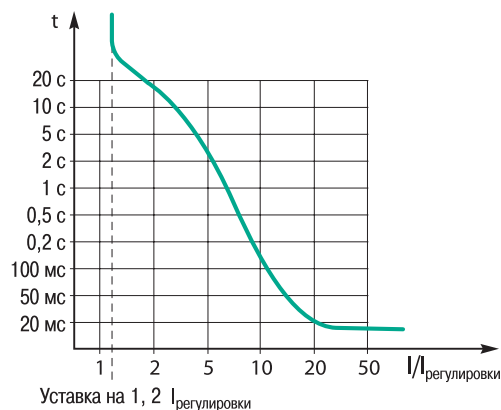


Рис. 20. Кривая отключения реле защиты трансформатора.

(в течение примерно нескольких миллисекунд) при значениях тока повреждения, близких к значениям

тока короткого замыкания в сети низкого напряжения (см. рис. 21).

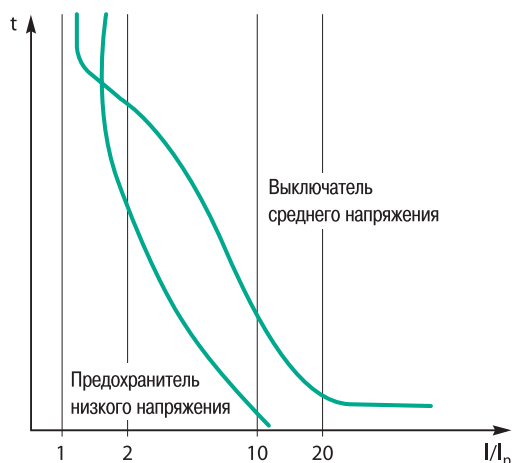


Рис. 21. Обеспечение защиты от перегрузки и от внутренних повреждений с помощью выключателя среднего напряжения.

6.2. Преимущества земляной защиты

Состояние, наблюдаемое при внутреннем замыкании на корпус, зависит от режима заземления нейтрали сети среднего напряжения. Определение тока нулевой последовательности может применяться для обнаружения всех или части замыканий на корпус. Кроме того, определение тока нулевой последовательности позволяет также обнаружить замыкания между первичной и вторичной обмотками, что соответствует замыканиям на землю, обнаруженным на участке сети со стороны источника питания. Такая защита используется для трансформатора распределительной сети, за пределами сети с глухозаземленной и распределенной нейтралью.

Уставка срабатывания защиты должна быть, по возможности, самой низкой; в действительности имеются определенные ограничения:

- защита не должна реагировать на «нормальный» ток нулевой последовательности. На самом деле, при некоторых условиях эксплуатации сети в результате несимметрии фазных напряжений — относительно земли — может возникнуть ток нулевой последовательности, который не является нулевым при прохождении через емкости относительно земли трансформатора и используемых соединительных кабелей;

Даже если нет аварийной ситуации, на любом участке сети имеется «естественный» емкостный небаланс, создающий ток нулевой последовательности;

- защита может быть ограничена в результате погрешностей измерительных трансформаторов при суммировании трех измерений фазного тока.

Технологические ограничения, существующие для датчиков и устройств защиты, вызывают необходимость устанавливать порог обнаружения, как правило, больше 10 % от значения номинального тока, чтобы предотвратить несвоевременное отключение при возникновении переходных процессов или короткого замыкания.

В некоторых случаях может рассматриваться вариант защиты «корпус-бак», когда должна быть возможность изолировать трансформатор от земли. Однако при этом варианте защиты возникают трудности, связанные с установкой трансформаторов и расположением их на расстоянии от устройств защиты.

Такая защита почти никогда не используется для трансформаторов распределительных сетей.

6.3. Автономная защита: плавкие вставки TFL и реле

Во многих ситуациях, в частности, в распределительных сетях общего пользования или же на малогабаритных установках не всегда бывает возможным использовать какой-либо вспомогательный источник для обеспечения защиты. В действительности, непосредственное использование низкого напряжения от трансформатора не позволяет просто организовать защиту от всех возможных повреждений, а применение вспомогательного источника вызвало бы необходимость дополнительных затрат на установку и технического обслуживания в неприемлемом

объеме. Существуют несколько типов защитных устройств, используемых без вспомогательного источника, и к этой категории относятся предохранители.

Когда речь о необходимости отключить выключатель, используются три категории устройств:

- реле прямого действия, в которых контролируемый ток вызывает срабатывание механизма отпускания в результате теплового или магнитного воздействия, без

участия трансформатора тока. К этой категории относятся многочисленные выключатели низкого напряжения, но реле прямого действия применяются также для выключателей среднего напряжения. Однако, эти устройства используются все реже в силу их примитивности, посредственной точности и ограниченных возможностей регулировки.

■ В Англии широко применяются предохранители с плавкими вставками типа «Time Fuse Links» (см. рис. 22). В нормальном режиме катушка коротко замыкается предохранителем низкого напряжения, который, соответственно, определяет параметры защиты. В случае возникновения повреждения плавкая вставка предохранителя плавится, и ток вторичной обмотки трансформатора тока приводит в действие катушку. Этот примитивный принцип простой и эффективный. Однако при его применении требуются сменные предохранители, и выбор характеристик ограничен, в пределах кривых перегорания предохранителей. Защита от замыканий на землю может осуществляться с помощью катушки, помещенной в общий провод трансформаторов тока. Поскольку ток в этой ветви обычно является нулевым, нет предохранителя, соединенного параллельно с катушкой.

■ Электронные реле с самоблокировкой, в которых энергия, необходимая для работы электроники и отключения выключателя, берется с вторичной обмотки датчиков. Эти реле соединены с низкоэнергетическими расцепителями, главным образом, с магнитной защелкой,

с возвратом в исходное положение с помощью механизма самого выключателя. Эти реле часто используются вместе с датчиками, специально разработанными для этого вида применения, более компактными и более дешевыми, чем стандартные трансформаторы тока. Составленная таким образом цепочка защиты может быть интегрирована в конкретный выключатель, что обеспечивает общее решение проблемы и открывает значительно более широкие возможности по сравнению с использованием реле прямого действия или предохранителей TFL.

Предлагаемые характеристики охватывают практически все варианты организации защиты, с возможностью использования стандартных кривых отключения или кривых, предлагаемых изготовителем, и с очень широким диапазоном настроек. Однако алгоритм работы защиты имеет ограничения по нижним уставкам в силу дефицита располагаемой энергии при слабом токе среднего напряжения, за исключением случаев использования крупногабаритных датчиков, стоимость которых была бы крайне высока. На настоящий момент (1998 г.) предельные условия автономной работы составляют примерно 10 ампер. Могут использоваться меньшие значения уставок защиты от замыкания на землю, но защита будет срабатывать, только если ток нагрузки – фазный ток – будет больше предельных условий автономной работы.

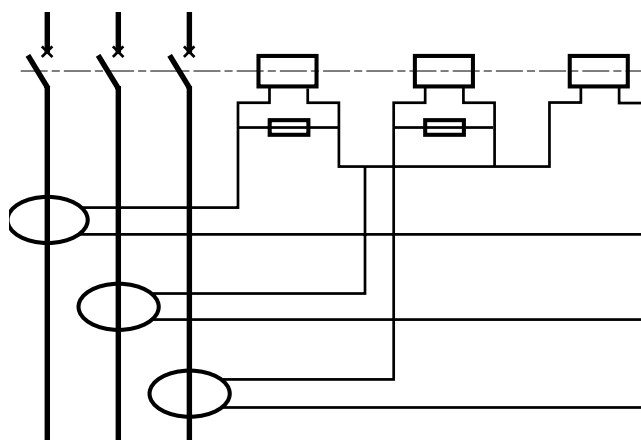


Рис. 22. Схема монтажа для организации защиты предохранителями Time Fuse Links с двумя катушками «защита в фазах» и одной катушкой «защита от замыканий на землю».

6.4. Защита с использованием вспомогательного источника питания: GRPT, температурные датчики и реле

Когда для обеспечения всех или части функций защиты применяется вспомогательный источник питания, можно использовать другие данные, а не только результаты измерений электрических величин. Если защита от коротких замыканий обеспечивается с помощью автономного устройства, для выполнения этих функций можно подавать низкое напряжение от защищаемого трансформатора.

Для защиты от повреждений, не вызывающих значительного сверхтока, и для защиты от перегрузки применяются два широко распространенных вида устройств: GRPT и температурные датчики.

■ Устройство GRPT (контроль выделения газа, давления, температуры) используется в трансформаторах с жидким диэлектриком и в полностью залитых трансформаторах

и обеспечивает при питании от одного вспомогательного источника контроль этих параметров. Таким образом, данное устройство выполняет функцию реле давления, термостата, при необходимости, с двумя уставками, и поплавкового датчика, который реагирует на ненормальное выделение газа. Устройство GRPT применяется для полностью залитых трансформаторов. Устройство имеет несколько контактов для сигнализации о возможном возникновении различных событий (см. рис. 23). Функция контроля газовой выделению активируется также в виде предупредительной меры при случайной утечке жидкого диэлектрика.

Эти функции ограничиваются медленно происходящими процессами. Для защиты от быстро развивающихся повреждений, когда, соответственно, требуются устройства с быстродействием, по-прежнему применяется релейная техника на основе анализа электрических величин.

■ Датчики температуры, обычно применяемые для сухих трансформаторов, выдают точные данные о внутренней тепловой нагрузке. Они используются вместе с электронными устройствами для обработки информации, с помощью которой можно осуществлять регулировку

различных уставок (аварийная сигнализация перегрузки, разгрузки, отключения). Эти данные используются системой контроля и управления для переключения окружающих выключателей.

Кроме того, вспомогательный источник питания обеспечивает доступ низким значениям уставок защиты в случае возникновения замыканий в фазах или на землю.

Когда реле с питанием от вспомогательного источника выполняет основные функции защиты (в том числе защиты от коротких замыканий), необходимо, чтобы реле имело резервное питание. Это условие обеспечивает способность контролировать все случаи возникновения повреждений, независимо от величины низкого напряжения во время аварийной ситуации. Необходимость иметь такой резервный источник питания, а также выполнение связанных с этим функций контроля и технического обслуживания, создают значительные трудности, которые ограничивают применение этих устройств на установках, уже оснащенных источником аварийного питания для других целей. Поэтому фактически такие реле используются только на подстанциях, обслуживающих промышленные предприятия или предприятия сферы услуг.

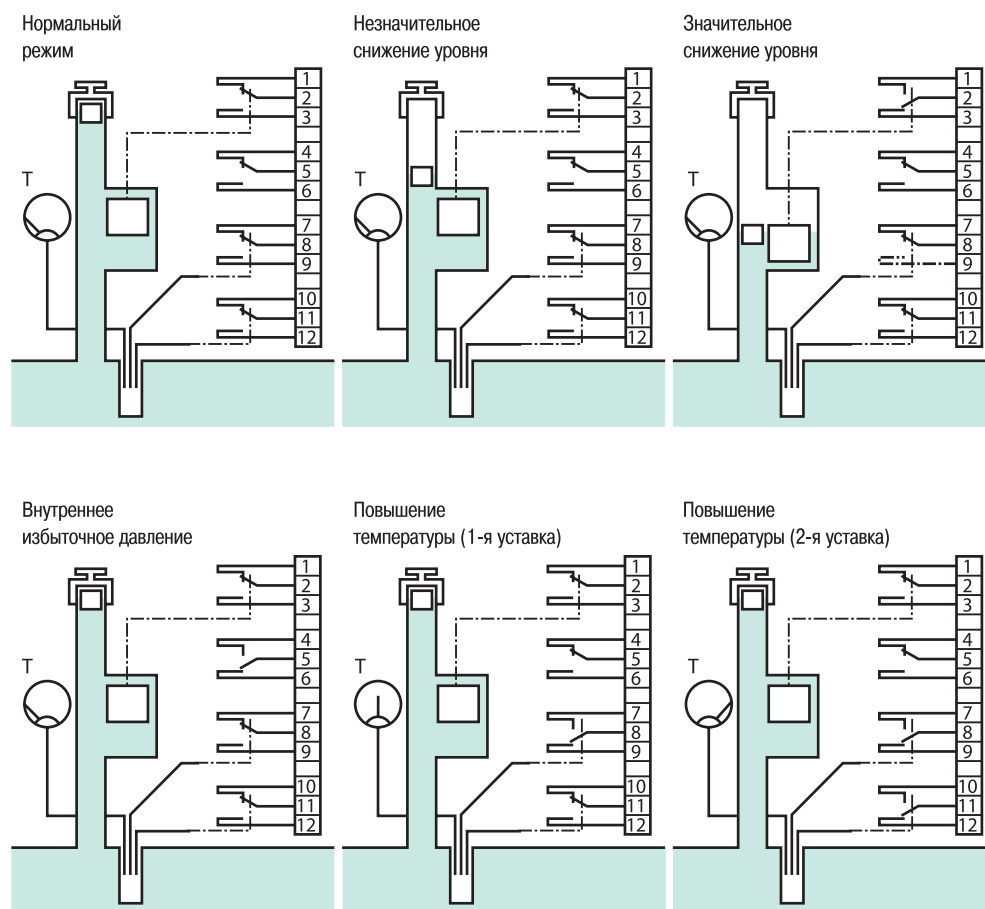


Рис. 23. Принцип работы устройства GRPT

7. Заключение

Выбор варианта защиты трансформаторов для распределительных сетей (среднего/низкого напряжения) является относительно сложной процедурой, так как для этого требуется учитывать большое количество параметров, и для обеспечения одного и того типа защиты можно использовать несколько технологических приемов.

Как правило, прежде всего, указываются характеристики трансформатора. Однако, помимо критериев, связанных с функциональными требованиями для трансформатора, например, рабочая мощность или рабочее напряжение, или связанных с условиями установки (наличие гармоник, риск перегрузки), пользователь должен определиться с выбором в отношении режима эксплуатации и схемы организации защиты:

- безопасность персонала и оборудования или внешние воздействия в случае возникновения повреждения;
- бесперебойность работы или долговечность оборудования;
- затраты на устранение возможных повреждений.

Поскольку требования к устройствам защиты, устанавливаемым ниже трансформатора, напрямую зависят от режима эксплуатации сети низкого напряжения и типа нагрузки, эти устройства обычно выбираются прежде, чем защиты, устанавливаемые выше по цепи.

В этот момент осуществляется выбор устройств защиты, используемых с трансформатором; далее требуется итеративная процедура, чтобы обеспечить согласованную работу всей системы: трансформатор, защита по низкому напряжению и защита по среднему напряжению (см. рис. 24).

Различные способы защиты представлены в виде сводной логической диаграммы на оборотной стороне обложки. На диаграмме показаны многочисленные взаимные зависимости между технологическими вариантами выбора и, тем самым, дается иллюстрация подхода на основе многих критериев, необходимых для определения

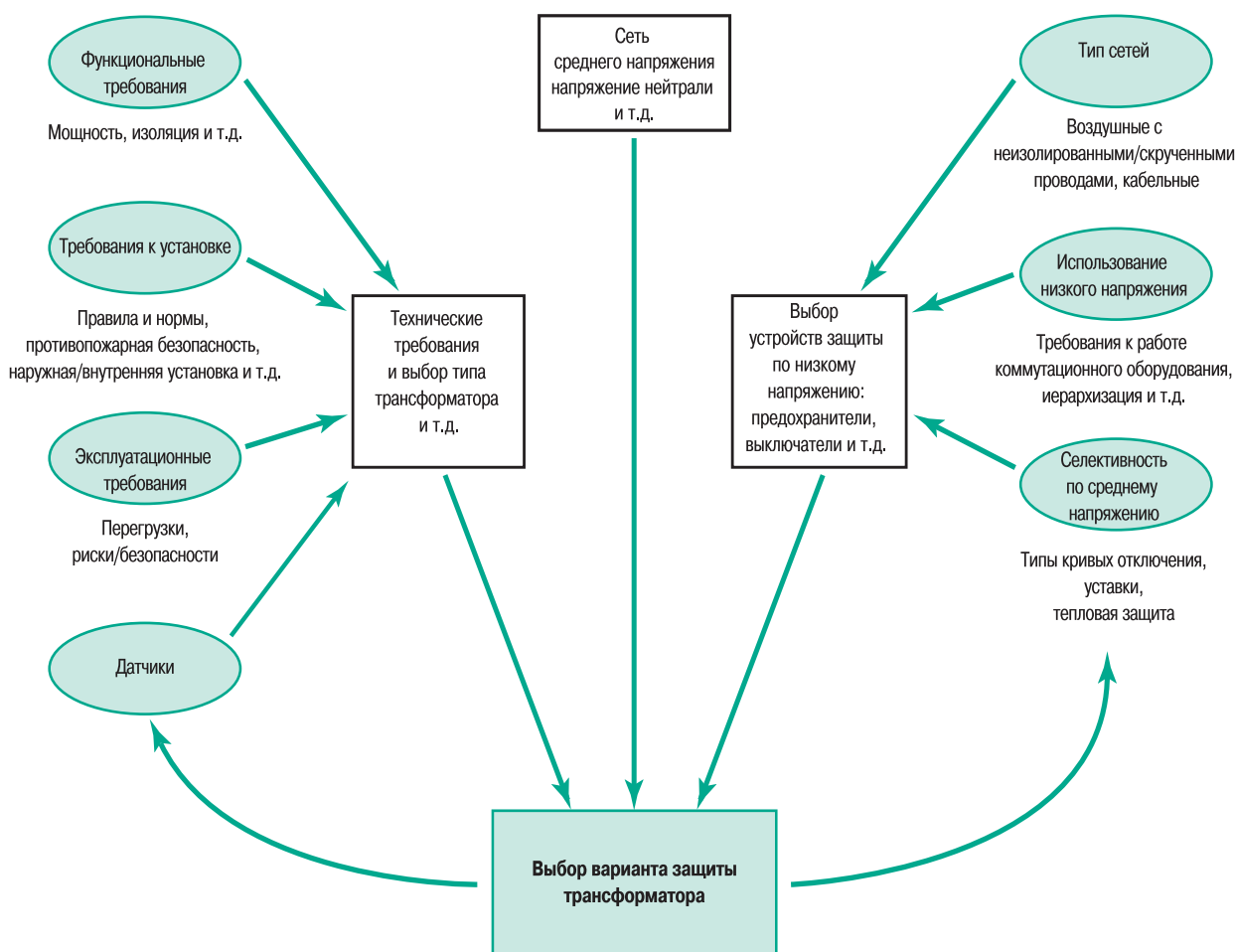


Рис. 24. Итеративная процедура выбора варианта защиты трансформатора.

варианта защиты. В таблице на рисунке 25 указаны используемые технические критерии выбора защиты. Эти данные демонстрируют то, что процедура выбора представляется достаточно сложной, и нет идеального или абсолютного решения.

В действительности, устройства защиты по среднему напряжению являются неотъемлемой частью распределительных щитов, и выбор может осуществляться по другим критериям. Например, при использовании комплектных или малогабаритных щитов, когда выбор часто делается по другим критериям, отличным от критериев выбора защиты трансформатора, таким как условия окружающей среды или возможность

усовершенствования, возникает необходимость поиска возможных решений на совершенно иной экономической основе. Так, при использовании предохранителей в малогабаритных коммутационных аппаратах требуется устанавливать их в герметичный корпус, что влечет за собой значительное удорожание оборудования. В случае применения этой технологии использование автоматического выключателя дает особенно конкурентноспособное решение. И напротив, комплектные коммутационные аппараты, в которых используются предохранители, являются более экономичными, чем оборудование с автоматическими выключателями.

Цель ⇒		Защита исправного трансформатора			Разделение поврежденного трансформатора		
	Условия ⇔	Перенапряжения в сети среднего напряжения	Перегрузки, удаленное повреждение в сети низкого напряжения	Ближнее повреждение в сети низкого напряжения	Внутреннее повреждение 1	Внутреннее повреждение 2	Серьезное повреждение в сети среднего напряжения
Устройство ↓	Риски ⇒	Внутреннее повреждение, тип 1 или 2	Нагрев, уменьшение долговечности	Термическая деструкция (несколько секунд)	Развитие процесса в сторону возникновения взрыва	Развитие процесса в сторону возникновения взрыва	Риск возникновения взрыва, пожара
Предохранитель низкого напряжения				☆☆☆☆			
Выключатель низкого напряжения			☆☆ (тепловая защита для «залитых» трансформаторов)	☆☆☆☆			
Искровые разрядники		☆☆					
Грозовые разрядники (znO)		☆☆☆☆					
Предохранители среднего напряжения			●	☆☆		●	☆☆☆☆
Блок предохранитель МЭК 420 -выключатель				☆☆	☆☆☆☆ (2)	☆☆☆☆ (3)	☆☆☆☆
Выключатель среднего напряжения	Реле с зависимой выдержкой времени		☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Контроль температуры	с помощью блока предохранитель -выключатель или автоматического выключателя		☆☆☆☆		☆☆		
Контроль давления	с помощью блока предохранитель -выключатель или автоматического выключателя (только для «залитых» трансформаторов)				☆☆☆☆ (1)	☆☆☆☆	

Повреждение типа 1: замыкание на корпус при значении тока меньше номинального.

Повреждение типа 2: повреждение, при котором создается ток, в 1 – 5 раз превышающий номинальный.

Серьезное повреждение в сети среднего напряжения: повреждение, при котором создается ток больше 5 I_n.

(1) : определение избыточного давления может использоваться для защиты от повреждений, вызывающих выделение газа, независимо от значения тока;

(2) : вместе с реле защиты от замыканий на землю;

(3) : при условии соответствующего согласования;

●: риск повреждения предохранителя в этих условиях.

Рис. 25. Сводная таблица различных вариантов и способов защиты трансформаторов.

Приложение 1. Правила выбора предохранителя для защиты трансформатора

В таблицах выбора, предлагаемых изготовителями предохранителей и выключателей, учитываются нижеизложенные правила в той части, которая к ним относится, а также указаны какие-либо особенности соответствующих коммутационных устройств (например, ограничения по предохранителям, изменяющие их режим охлаждения) (см. стандарт МЭК 787).

I_{nt} – номинальный ток трансформатора;
 I_{cc} низкого напряжения – ток первичной обмотки в случае возникновения короткого замыкания в сети низкого напряжения;
 I_{nf} – номинальный ток предохранителя;
 $I_c(t)$ – ток, вызывающий плавление плавкого элемента предохранителя за время t (времятоковая характеристика предохранителя);
 I_3 – минимальный ток отключения предохранителя;

Правила, позволяющие избежать случайного перегорания предохранителя

- Требование выдерживать рабочий ток (и возможные перегрузки)
 $1,4 I_{nt} < I_{nf}$
- Требование выдерживать пусковой ток
 $12 I_{nt} < I_f(0,1 \text{ с})$

Правило, позволяющее устранить серьезное повреждение в сети низкого напряжения

- Защита должна срабатывать, чтобы предотвратить разрушение трансформатора.
 $I_f(2 \text{ с}) < I_{cc}$ низкого напряжения

Правило, обеспечивающее надежную работу предохранителя вне блока предохранитель-выключатель

- Предохранитель не должен срабатывать в его критической зоне.
Обеспечить защиту дополнительным способом при следующих условиях: $I_{nf} < I < I_3$.

Правила координации для обеспечения надлежащей работы блока выключатель-предохранители

(см. стандарт МЭК 420)

t_s – минимальная продолжительность отключения блока под действием бойка предохранителя;
 t_d – продолжительность отключения блока под действием расцепителя;
 I_4 – номинальный переходный ток блока;
 I_5 – номинальный ток переключения блока.

- Выключатель не должен срабатывать при значениях больше его рабочих характеристик: переходный ток должен быть меньше номинального значения.
 $I_{\text{переходный}} < I_4$

Подробный расчет см. в Приложении 2.

- Выключатель не должен срабатывать при значениях больше его рабочих характеристик: переходный ток должен быть меньше тока, возникающего в случае замыкания на выводах низкого напряжения.

$I_{\text{переходный}} < I_{cc}$ низкого напряжения
(это правило не распространяется на все случаи повреждений, а относится только к возможным повреждениям в двух фазах со стороны сети низкого напряжения).

- Выключатель не должен срабатывать при значениях больше его рабочих характеристик: ток переключения должен быть меньше номинального значения.
 $1,065 I_f(t_d + 0,02 \text{ с}) < I_5$

Подробный расчет см. в Приложении 2.

Приложение 2. Расчет переходного тока и тока переключения для блока выключатель-предохранителя

Переходный ток

Для определения пределов функционирования блока выключатель-предохранителя поиск наиболее тяжелых условий эксплуатации приводит к рассмотрению следующих рабочих характеристик (см. рис. 26):

- под действием тока повреждения I_d первый предохранитель перегорает при условиях, соответствующих минимальному допустимому значению по времятоковой характеристике;
- два других предохранителя имеют максимальный допуск и с момента отключения первой фазы находятся под действием тока со значением, уменьшенным до $0,87 I_d$.

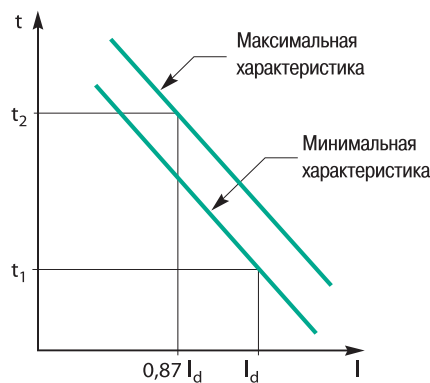


Рис. 26. Определение переходного тока.

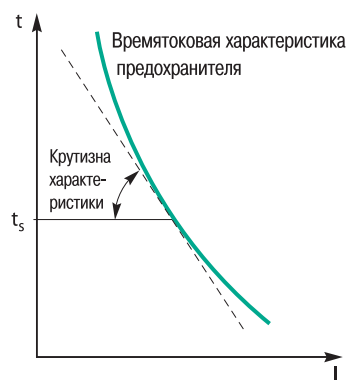


Рис. 27. Определение коэффициента с учетом крутизны времятоковой характеристики предохранителя.

В стандарте МЭК 420, в котором указаны требования к блокам выключатель-предохранители, дается подробный расчет, позволяющий сделать следующий вывод: переходный ток – это ток, соответствующий продолжительности плавления плавкого элемента предохранителя при минимальной характеристике, равной:

$$t_{it} = 0,87^b t_s / [(1,13)^b - 1]$$

где t_s – время отключения блока под действием бойка предохранителя, и при крутизне времятоковой характеристики предохранителя рядом с рассматриваемой точкой (см. рис. 27).

Как правило, необходим повторный расчет, выполняемый в несколько этапов, в силу изменения крутизны на протяжении всей характеристики. Для подобного расчета можно использовать значение t_s как исходную величину t_{it} (см. рис. 28).

Конструктивные параметры предохранителей могут изменяться от одной номинальной характеристики на другую в пределах одной и той же гаммы устройств. Например, для гаммы предохранителей FUSARC компании Merlin Gerin коэффициент b изменяется от 2,2 до 5,2.

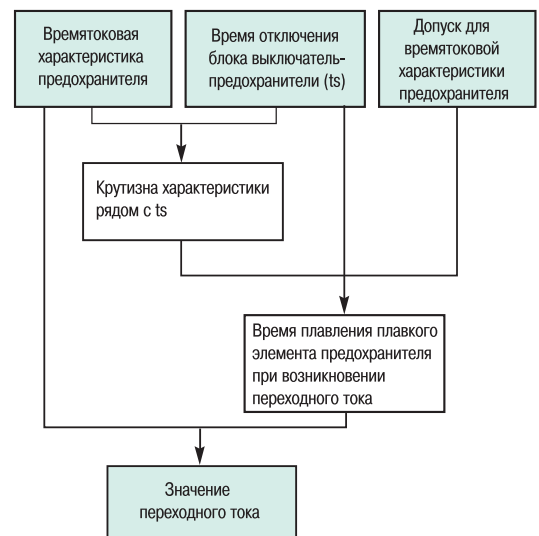


Рис. 28. Принцип установления переходного тока.

Переходный ток для любого предохранителя, используемого в блоке выключатель-предохранители, должен быть меньше номинального переходного тока этого блока.

Примеры цифрового расчета

Рассмотрим пример блока выключатель-предохранители с предохранителями на 80 А/24 кВ и временем отключения под действием бойка предохранителя 60 мс (t_s). Если используются предохранители SIBA, крутизна характеристики составляет $\alpha = 3,32$; получаем время плавления плавкого элемента предохранителя, равное:

$$t_{it} = 0,87^{3,32} \times 60 / (1,13^{3,32} - 1) = 75,5 \text{ мс}$$

либо, в соответствии с времятоковыми характеристиками предохранителей, $I_t = 850 \text{ А}$. Если используются предохранители компании Merlin Gerin, тем же способом определяем $\alpha = 3,34$.

Переходный ток определяется по времятоковой характеристике предохранителя, $I_t = 800 \text{ А}$. Таким образом, эти два предохранителя, используемые в блоке RM6, работают одинаково.

Теперь рассмотрим пример блока выключатель-предохранители с предохранителями на 125 А/12 кВ. Для предохранителей SIBA по времятоковой характеристике определяем коэффициент б, равный 3,1, или время плавления плавкого элемента предохранителя при переходном токе, которое составляет 85 мс. Таким образом, значение переходного тока равно 1300 А. Для предохранителей Merlin Gerin по времятоковым характеристикам определяем коэффициент б, равный 2,65, или время плавления плавкого элемента предохранителя, равное 108 мс. При этом переходный ток составляет только 870 А. В этом случае от выбора предохранителя, в значительной степени, зависит нагрузка на выключатель в блоке выключатель-предохранители, даже если обе эти величины допустимы.

Ток переключения

Номинальный ток переключения блока выключатель-предохранители (обозначенный как I_5) является максимальным допустимым током переключения. Изготовитель оборудования указывает время отключения t_d выключателя в блоке под действием расцепителя. Все предохранители, используемые в блоке выключатель-предохранители, должны обеспечивать номинальный ток переключения (см. рис. 29).

Наиболее тяжелые условия работы для данного предохранителя характеризуются следующим:

- происходит «мгновенное» срабатывание внешнего реле; в случае подобного мгновенного срабатывания в соответствии со стандартом рекомендуется использовать время реакции 20 мс. При этом результирующее время отключения будет временем отключения блока выключатель-предохранители под действием расцепителя (t_d), увеличенным на 20 мс;
- предохранитель находится в «холодном» состоянии и на максимуме его допусков (в соответствии со стандартом предусмотрен допуск для времятоковых характеристик предохранителя $\pm 10\%$ по току, что позволяет использовать значение двух типовых отклонений, то есть $\pm 6,5\%$).

Значения тока переключения определяются по времятоковой характеристике предохранителя для ниже указанных условий, если время плавления плавкого элемента предохранителя $t_d + 0,02 \text{ с}$.

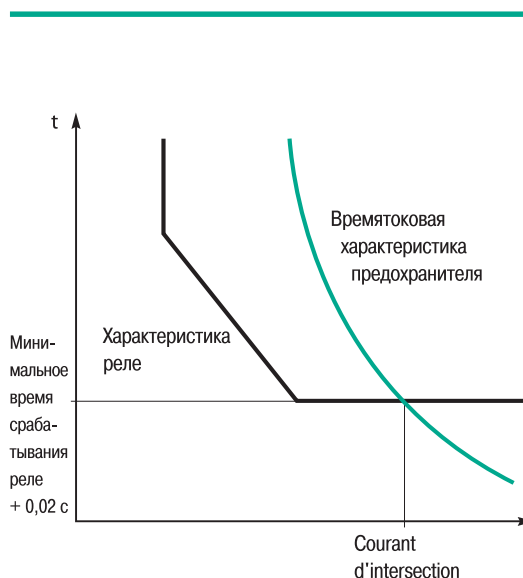


Fig. 29 : détermination du point d'intersection.

Библиография

Прочие публикации

- Тенденции в разработке методов защиты трансформаторов для распределительных сетей. Блоуэр / Клаус / Адамс, конференция МЭК, 90/04.
- Устойчивость трансформаторов к внутренним повреждениям. Ро / Леконт / Жибер, CIREД 89.
- Защита от повреждений в трансформаторах для распределительных сетей среднего/низкого напряжения. Бруггенманн / Даалдер / Хейнемейер / Блоуэр, CIREД 91.

Стандарты

- МЭК 71-1. Координация изоляции.
- МЭК 71-2. Координация изоляции. Руководство по использованию.
- МЭК 76. Силовые трансформаторы.
- МЭК 255. Реле защиты.
- МЭК 787. Руководство по выбору сменных элементов предохранителей высокого напряжения, предназначенных для цепей с трансформаторами.
- МЭК 420. Блоки выключатель-предохранители.
- NF C 52-726. Сухие силовые трансформаторы.

Технические Тетради Schneider

- Перенапряжения и координация изоляции. Техническая тетрадь № 151. Д. Фюльширон.
- Расчет тока короткого замыкания. Техническая тетрадь № 158. Б. Де Метц Нобла.
- Разряд молнии и электрические установки среднего напряжения. Техническая тетрадь № 168. Б. Де Метц Нобла.
- Схемы заземления в сетях низкого напряжения (режимы работы нейтрали). Техническая тетрадь № 172. Б. Лакруа и Р. Кальвас
- Трансформатора для распределительных сетей. Техническая тетрадь (в настоящее время готовится к публикации). М. Сакот.

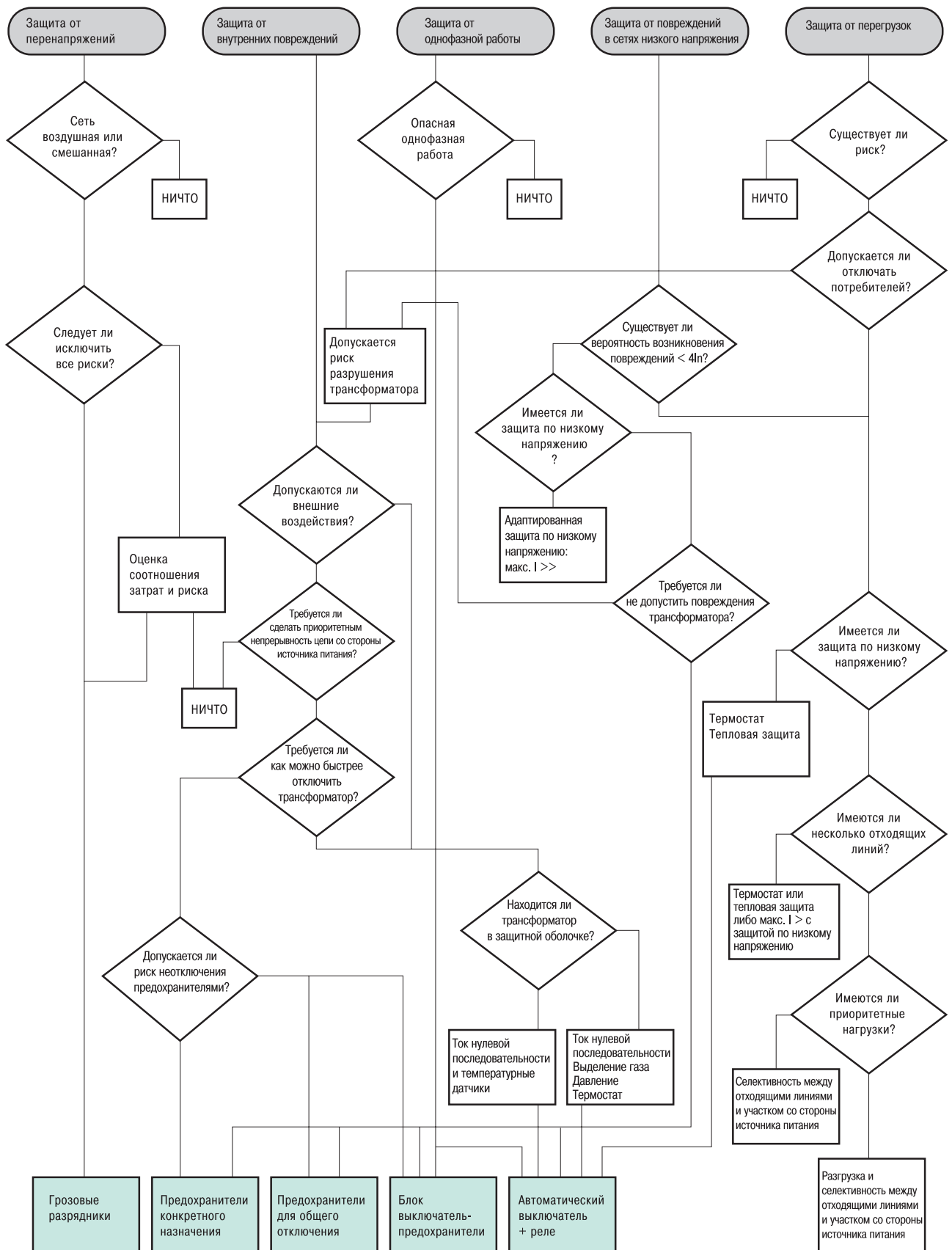


Рис. 30. Логическая диаграмма условий, критериев и решений.

Schneider Electric в странах СНГ

Азербайджан

Баку
AZ 1008, ул. Гарабах, 22
Тел.: (99412) 496 93 39
Факс: (99412) 496 22 97

Беларусь

Минск
220004, пр-т Победителей, 5, офис 502
Тел.: (37517) 203 75 50
Факс: (37517) 203 97 61

Казахстан

Алматы
050050, ул. Табачнозаводская, 20
Швейцарский Центр
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

Астана

ул. Бейбитшилик, 18
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402
Тел.: (7172) 91 06 69
Факс: (7172) 91 06 70

Атырау

060002, ул. Абая, 2-А
Бизнес-центр «Сугас - С», офис 407
Тел.: (7122) 32 31 91, 32 66 70
Факс: (7122) 32 37 54

Россия

Волгоград
400001, ул. Профсоюзная, 15/1, офис 12
Тел.: (8442) 93 08 41

Воронеж

394026, пр-т Труда, 65
Тел.: (4732) 39 06 00
Тел./факс: (4732) 39 06 01

Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38
Факс: (343) 349 40 27

Иркутск

664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312
Тел./факс: (3952) 29 00 07

Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7
Тел.: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

Калининград

236040, Гвардейский пр., 15
Тел.: (4012) 53 59 53
Факс: (4012) 57 60 79

Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268, офисы 316, 314
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302
Тел.: (3912) 56 80 95
Факс: (3912) 56 80 96

Москва

129281, ул. Енисейская, 37
Тел.: (495) 797 40 00
Факс: (495) 797 40 02

Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5
Тел.: (831) 278 97 25
Тел./факс: (831) 278 97 26

Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54
Тел./факс: (383) 227 62 53

Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11
Тел./факс: (343) 290 26 11 / 13 / 15

Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А
Тел.: (812) 320 64 64
Факс: (812) 320 64 63

Уфа

450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520
Тел.: (347) 279 98 29
Факс: (347) 279 98 30

Хабаровск

680011, ул. Металлистов, 10, офис 4
Тел.: (4212) 78 33 37
Факс: (4212) 78 33 38

Туркменистан

Ашгабат
744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»
Тел.: (99312) 45 49 40
Факс: (99312) 45 49 56

Узбекистан

Ташкент
100000, ул. Пушкина, 75
Тел.: (99871) 140 11 33
Факс: (99871) 140 11 99

Украина

Днепропетровск
49000, ул. Глинки, 17, 4 этаж
Тел.: (380567) 90 08 88
Факс: (380567) 90 09 99

Донецк

83023, ул. Лабутенко, 8
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

Киев

04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А
Корпус Б
Тел.: (38044) 490 62 10
Факс: (38044) 490 62 11

Львов

79000, ул. Грабовского, 11, к. 1, офис 304
Тел./факс: (380322) 97 46 14

Николаев

54030, ул. Никольская, 25
Бизнес-центр «Александровский», офис 5
Тел./факс: (380512) 48 95 98

Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213
Тел./факс: (38048) 728 65 55

Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11
Тел./факс: (380652) 44 38 26

Харьков

61070, ул. Ак. Проскуры, 1
Бизнес-центр «Telesens», офис 569
Тел.: (380577) 19 07 49
Факс: (380577) 19 07 79



ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)
(495) 797 32 32
Факс: (495) 797 40 02
ru.csc@ru.schneider-electric.com
www.schneider-electric.ru