

# Лекция 11

## Нагрев проводников и электрических аппаратов

1. Общие сведения о токах короткого замыкания.
2. Допустимые температуры нагрева.
3. Нагрев проводников и электрических аппаратов в продолжительных режимах и при коротких замыканиях.

## **Общие сведения о токах короткого замыкания.**

Короткое замыкание – это замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

В свою очередь замыкание – это всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землей.

На практике замыкания могут быть через дугу или непосредственно (без переходного сопротивления), так называемые «металлические».

Часто причиной повреждений в электрической части электроустановок, сопровождающихся короткими замыканиями, являются неправильные действия обслуживаемого персонала, например, ошибочные отключения разъединителем цепи с током, включения разъединителей на короткую, ошибочные действия при переключениях в главных схемах и в схемах релейной защиты и автоматики. Такие действия обуславливают до 50-70% случаев всех отказов, возникших по вине обслуживающего персонала электроустановок.



Последствия КЗ разнообразны:

А) Механические и термические повреждения оборудования;

Б) Снижения уровня напряжения в сети, ведущее к уменьшению вращающего момента электродвигателей, их торможению, снижению производительности или даже к полной остановке;

В) Выпадение из синхронизма отдельных генераторов, электростанций и частей электрической системы, возникновение аварий, включая системные;

Г) возгорания в электроустановках;

Д) электромагнитное влияние на линии связи и на системы железнодорожных блокировок и т.п.

Расчеты токов КЗ необходимы для:

- 1) Сопоставления, оценки и выбора главных схем электрических соединений электростанций и подстанций.
- 2) Выбора электрических аппаратов;
- 3) Оценки поведения потребителей при аварийных условиях, определения допустимости того или иного режима;
- 4) Проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики;
- 5) Проектирование заземляющих устройств;
- 6) Определения влияния токов КЗ на линии связи;
- 7) Выбора разрядников;
- 8) Анализа аварий в электроустановках и в электрических системах;
- 9) Оценки допустимости и разработки методики проведения различных испытаний в электрических системах;
- 10) Анализа устойчивости работы энергосистем.

На электрических станциях и подстанциях применяют электрические аппараты и проводники различного типа. Различают аппараты и проводники первичных и вторичных цепей.

Электрические аппараты первичных цепей различного напряжения можно условно разделить на четыре группы:

- А) Коммутационные аппараты;
- Б) Защитные аппараты;
- В) Токоограничивающие аппараты;
- Г) Измерительные аппараты.

В качестве проводников в первичных цепях используют гибкие проводники и гибкие токопроводы; шинные линии, закрытые шинные токопроводы с воздушной или газовой изоляцией; силовые кабели.

К электрическим аппаратам вторичных цепей относятся аппараты систем измерения, контроля, сигнализации и управления, релейной защиты и автоматики.

В качестве проводников во вторичных цепях используются контрольные кабели, изолированные проводники, а в отдельных случаях и неизолированные проводники, укрепленные на изоляторах.



Электрические аппараты и проводники должны надежно функционировать как при нормальных продолжительных режимах, так и при кратковременных аварийных режимах при условии, что параметры окружающей среды (температура, влажность, давление) не выходят за пределы, указанные в соответствующих ГОСТ или в технических условиях. При этом температура отдельных элементов аппаратов и проводников не должна превышать нормированных значений.

Кроме общих технических требований к электрическим аппаратам и проводникам предъявляются также некоторые специальные требования, вытекающие из их назначения и условий работы электроустановки.

## **Допустимые температуры нагрева.**

Нагревание проводников и аппаратов происходит вследствие потерь энергии различных видов. Сюда относятся:

- 1) Джоулевы потери, пропорциональные квадрату тока.
- 2) Потери в диэлектриках, пропорциональные квадрату напряжения
- 3) Потери в магнитопроводах от вихревых токов и гистерезиса
- 4) Потери в массивных ферромагнитных деталях от индуктированных токов и перемагничивания.

Потерянная энергия выделяется в виде тепла. Температура проводника, аппарата, не должна превышать соответствующие допустимые значения, определяемые нагревостойкостью изоляции, требованиям надежной работы контактов и другими соображениями.

Следует различать наблюдаемую температуру и температуру в наиболее нагретой точке.

Под наблюдаемой температурой понимают температуру, найденную измерением. Она несколько меньше температуры в наиболее нагретой точке, поскольку последняя обычно недоступна для измерения и применяемые методы измерения несовершенны.

Принято нормировать наблюдаемые температуры, поскольку это удобно для практического использования в эксплуатации. Однако в основу нормирования в числе других требований положены допустимые температуры в наиболее нагретых точках для основных видов изоляции.



## Допустимые температуры для изоляционных материалов в наиболее нагретых точках при нормальном режиме.

Класс нагревостойкости	Допустимая температура, °С	Основные группы электроизоляционных материалов
У	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал
А	105	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или натурального, искусственного и синтетического шелка, в рабочем состоянии пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал
Е	120	Синтетические органические материалы(пленки, волокна, смолы, компаунды и др.)
В	130	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, соответствующими данному классу нагревостойкости
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
G	Свыше 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц или их комбинации, применяемые без связующих или с органическими и элементоорганическими составами

Как видно из таблицы, изоляционные материалы разделены по нагревостойкости на семь классов.

Под нагревостойкостью понимается способность материала сохранять свои изоляционные свойства при воздействии нормированной температуры в течение нормального срока эксплуатации электрооборудования.

Рассмотрим допустимые для проводников и аппаратов в нормальном режиме, приведенные в таблице ниже.



## Допустимые температуры для проводников и аппаратов в нормальном режиме

Проводники и аппараты	Допустимая температура, °С	
Неизолированные провода и шины	70	
Кабели с бумажной изоляцией напряжением, кВ: до 3 включительно 6 10 20 и 35	80	
	65	
	60	
	50	
	55	
Провода, шнуры, кабели с резиновой, поливинилхлоридной или пластмассовой изоляцией	55	
Неразмыкаемые контакты аппаратов в воздухе, выполненные из: Алюминия, меди и их сплавов Алюминия с покрытием серебром Меди с покрытием серебром	90	
	110	
	120	
	75	
Размыкающие контакты в воздухе	75	
Болтовые соединения шин из алюминия, меди и их сплавов	90	
Масло трансформаторное: В выключателях В трансформаторах, изоляторах	80	
	90	
	90	

## Нагрев проводников и электрических аппаратов в продолжительных режимах

Тепловой расчет имеет целью определить допустимый ток для проводника заданного сечения.

Под допустимым током понимают наибольший ток (действующее значение), который проводник может проводить в течение неограниченного времени при нормированной (номинальной расчетной) температуре воздуха и при условии, что температура проводника не превысит соответствующее допустимое значение.

Шины и многопроволочные проводники относятся к однородным проводникам. Теплообмен происходит только с поверхности проводника через конвекцию и излучение.

Нагрев проводника (или другого элемента электрической цепи) при прохождении по нему переменного тока описывается уравнением:

$$Q = I^2 R_a = cG(\Phi_{\text{л}} + \Phi_{\text{к}} + \Phi_{\text{т}}),$$

Где  $I$  - ток, А;  $R_a$  - активное сопротивление, Ом;  $Q$  - тепловая энергия, Дж;  $\Phi$  - тепловой поток, Вт;  $c$  - удельная теплоемкость, Вт·с / (г · °С);  $G$  - масса проводника, г;  $\Phi_{\text{л}}$  - теплоотдача лучеиспусканием, Вт;  $\Phi_{\text{к}}$  - теплоотдача конвекцией, Вт;  $\Phi_{\text{т}}$  - теплоотдача вдоль проводника за счет теплопроводности при неодинаковом уровне температуры в различных точках проводника, Вт.



Определение длительно допустимого тока для проводника заданного сечения связано с расчетом теплового потока с поверхности проводника. Эта задача сложна и выполняется экспериментально. Для стандартных сечений существуют таблицы  $I_{\text{длит доп}}$ .

При выборе проводников:

$$I_{\text{длит доп}} > I_{\text{раб нб}}$$

Для аппаратов:

$$I_{\text{ном}} > I_{\text{раб нб}}$$

В случае, когда температура воздуха (окружающей среды) и температура проводника не равны номинальным значениям используют приближенное равенство

$$I_{\text{доп}} \approx I_{\text{доп ном}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta - \vartheta_{\text{в}}}{\vartheta_{\text{ном}} - \vartheta_{\text{в.ном}}}}$$

Где  $\vartheta_{\text{в}}$  - температура воздуха,  $\vartheta_{\text{в.ном}}$  - номинальная расчетная температура,  $\vartheta_{\text{ном}}$  - номинальное значение температуры,  $\vartheta$  - температура.

## Нагрев проводников и электрических аппаратов при КЗ

При протекании тока КЗ температура проводников и токоведущих частей аппаратов существенно возрастает, поскольку  $I_{\text{КЗ}} \gg I_{\text{раб}}$ , то температура при нагреве может достигать опасных значений.

Для надежной работы электроустановок проводники должны обладать термической стойкостью, т.е. способностью выдерживать при наибольших неблагоприятных условиях тепловое воздействие токов КЗ.

Проводники считаются термически стойкими, если выполняется следующее неравенство

$\vartheta_{\text{к}} \leq \vartheta_{\text{к.доп}}$ , где  $\vartheta_{\text{к}}$  - температура проводника,  $\vartheta_{\text{к.доп}}$  - предельная допустимая температура нагрева при КЗ.

$\vartheta_{\text{к.доп}}$  - устанавливаются с учетом снижения прочности материала проводника, приводящее к уменьшению изолирующих свойств и надежности работы контактных соединений. Значительное увеличение температуры приводит к снижению временного сопротивления, разрыву проводниковых материалов. При температуре  $> 70-75$  °С интенсивно окисляются контакты аппаратов (особенно болтовые), соединения проводников. Длительное повышение температуры резко снижает срок службы изоляции. Существует так называемое 6-градусное правило: увеличение температуры изоляции на 6 градусов сокращает срок ее службы вдвое.



Количественную оценку степени термического воздействия тока КЗ на проводники и электрические аппараты обычно производят с помощью интеграла Джоуля

$$W = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}}^2 dt, \text{ где } i_{\text{к}} - \text{ток КЗ в произвольный момент времени } t, \text{ А; } t_{\text{откл}} - \text{расчетная продолжительность КЗ, с.}$$

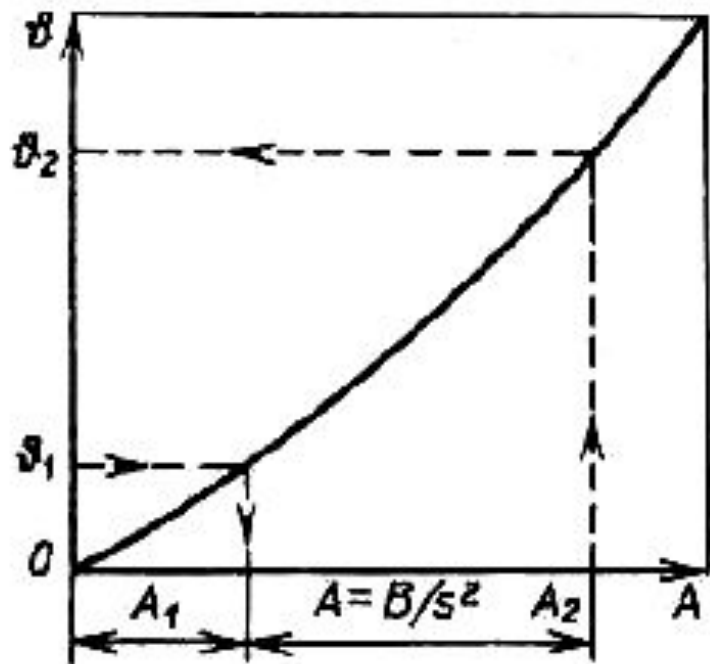
Количественную оценку степени термического воздействия тока КЗ можно также производить с помощью термически эквивалентного тока КЗ  $I_{\text{тер.эк}}$ , т.е. неизменного по амплитуде (синусоидального) тока, который за время, равное расчетной продолжительности КЗ, оказывает на проводник или электрический аппарат такое же термическое воздействие, как и реальный ток КЗ за это же время. Этот ток связан с интегралом Джоуля простым соотношением

$$I_{\text{тер.эк}} = \sqrt{\frac{W_{\text{к}}}{t_{\text{откл}}}}$$

Интеграл Джоуля допускается определять приближенно как сумму интегралов от периодической и аperiodической составляющей тока КЗ, т.е.

$$W_{\text{к}} = W_{\text{к.п}} + W_{\text{к.а}} = \int_0^{t_{\text{откл}}} I_{\text{п}}^2(t) dt + \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{а}}^2(t) dt$$

где  $W_{\text{к.п}}$  - интеграл Джоуля от периодической составляющей тока КЗ;  $W_{\text{к.а}}$  - интеграл Джоуля от аperiodической составляющей тока КЗ.



Определение конечной температуры проводника с учетом начальной температуры, отличной от нуля

Для определения конечной температуры проводника заданного сечения, начальная температура которого равна нулю, следует отложить по оси абсцисс значение функции  $A$  и определить по соответствующей кривой конечную температуру. Однако начальная температура, как правило, не равна нулю. Поэтому для определения конечной температуры следует сначала определить по кривой значение функции  $A_1$ , соответствующее начальной температуре проводника. Затем отложить по оси абсцисс от точки  $A_1$  функцию  $A = B/S^2$  и определить конечную температуру, как показано на рисунке. Данную температуру следует сопоставить с допустимой температурой при кратковременном нагревании.



## Допустимые конечные температуры проводников и аппаратов при КЗ

Наименование проводников, частей аппаратов	Конечная температура, °С
Неизолированные медные и латунные проводники, части аппаратов	300
Неизолированные алюминиевые проводники, части аппаратов	200
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией до 10 кВ с медными и алюминиевыми жилами	200
Кабели 20-220 кВ	125
Кабели и провода с поливинилхлоридной изоляцией, с медными и алюминиевыми жилами	150
То же, но с полиэтиленовой изоляцией	120

Прохождение токов в проводниках приводит к возникновению между ними электродинамических(механических) усилий. Одинаковое направление токов в параллельных проводниках вызывает их притягивание, противоположное - отталкивание. При этом механические силы взаимодействия, незначительные в режиме нормальной нагрузки, во время к.з. могут достигнуть значений, опасных для аппаратуры и ошиновки, и вызвать их деформацию или разрушение.

Из электротехники известно, что сила взаимодействия между двумя проводниками при прохождении по ним токов  $i_1$  и  $i_2$  определяется по формуле

$$F = 2 \frac{i_1 i_2 l}{a} k_\phi \cdot 10^{-7}$$

Где  $i_1$  и  $i_2$  – мгновенные значения токов в данных проводниках, А;  $l$ - длина проводников, м;  $k_\phi$  - коэффициент формы, учитывающий форму сечения и взаимное расположение проводников;  $a$ - расстояние между двумя параллельными проводниками, м.

Максимальное механическое усилие при двухфазном КЗ, при котором токи в поврежденных фазах равны по значению; определяется как

$$F^{(2)} = 2 \frac{i_{уд}^{(2)2} l}{a} k_\phi \cdot 10^{-7}$$

где  $i_{уд}^{(2)2}$  - ударный ток двухфазного КЗ(наибольшее амплитудное значение)



Для трехфазного КЗ

$$F^{(3)} = \sqrt{3} \frac{i_{уд}^{(3)2} l}{a} k_{\phi} \cdot 10^{-7}$$

В следствии того, что максимальные усилия при КЗ возникают практически мгновенно, обеспечить механическую прочность установленного оборудования можно только путем уменьшения тока КЗ – установкой реакторов, трансформаторов с расщепленными обмотками, секционированием шин и т.п.