

В сумме эти токи составят полный ток к. з., который в начальный момент к. з. будет равен нулю, т. е. току предшествующего режима. Примерно через полпериода ток к. з. достигнет максимального значения. Наибольшее возможное мгновенное значение тока к. з. принято называть ударным током  $I_{уд}$  (рис. 5).

В общем случае для начального периода к. з.  $t \approx T/2$  с некоторым приближением можно считать, что периодическая слагающая не затухает, как и показано на рис. 5. При отсутствии затухания аperiodической слагающей ударный ток был бы равен:

$$I_{уд} = I_{п,0} + I_a = 2I_{п,0}$$

С учетом затухания

$$I_{уд} = I_{п,0} + I_{п,0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{п,0} \left( 1 + e^{-\frac{t}{T_a}} \right) = \sqrt{2} I_{п,0} k_{уд} \quad (4)$$

где  $I_{п,0} = \sqrt{2} I_{п,0}$ ,  $k_{уд}$  — ударный коэффициент.

### 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

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 (Н) 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 параллельными проводниками, м.

12

Максимальное механическое усилие (Н) при двухфазном к. з., при котором токи в поврежденных фазах равны по значению (см. § 12), определяется как

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

где  $i_{уд}^{(2)}$  — ударный ток двухфазного к. з. (наибольшее амплитудное значение).

Для трехфазного к. з. в формулу вводится снижающий коэффициент примерно 0,87, учитывающий неодинаковость мгновенных значений токов в фазах, в результате чего

$$F^{(3)} = \sqrt{3} \frac{i_{уд}^{(3)2} l}{a} k_{\Phi} \cdot 10^{-7} \quad (5)$$

Расчеты по проверке электродинамической стойкости оборудования при к. з. должны производиться в соответствии с [4].

Примеры расчетов приведены в § 13.

Вследствие того, что максимальные усилия при к. з. возникают практически мгновенно, обеспечить механическую прочность установленного оборудования можно только путем уменьшения тока к. з. — установкой реакторов, трансформаторов с расцепленными обмотками, секционированием шин и т. п.

### 4. ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

По закону Джоуля-Ленна количество тепла  $Q$ , выделяемое электрическим током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока  $I^2$ , сопротивлению проводника  $r$  и времени  $t$ .

Время прохождения тока к. з. определяется действием защитных устройств и отключающей аппаратуры. Для того чтобы повреждения от термического (теплового) воздействия тока к. з. были наименьшими, стремятся отключать к. з. возможно быстрее, так что обычно длительность к. з. находится в пределах от долей секунды до нескольких секунд.

Поскольку ток к. з. может во много раз превышать нормальный ток нагрузки, очевидно, что, несмотря на сравнительно небольшую длительность процесса, при

13

к. з. возможен значительный перегрев проводника. Перегрев сверх допустимой температуры может вызвать повреждение изоляции — выгорание, потерю эластичности, электрической прочности; быстрый нагрев до определенной температуры с последующим медленным охлаждением может привести к отжигу металла, т. е. к потере механических качеств проводника.

При нагреве проводника током нагрузки часть выделенного тепла рассеивается в окружающую среду, причем степень рассеивания зависит от условий охлаждения. Установившийся перегрев проводника по отношению к температуре окружающей среды определяется из теплового баланса или равенства количества выделенного и рассеянного тепла. Напротив, кратковременность к. з. в большинстве случаев позволяет не считаться с отводом тепла в окружающую среду и принимать, что все выделяемое тепло идет на нагрев и повышение температуры проводника.

Тепловые потери при к. з., теплоотдача или тепловой спад учитываются только при проверке сечений проводников, если время отключения к. з. превышает заданное критическое время или относительно велико активное сопротивление цепи к. з.

Термическое действие тока к. з., исходя из закона Джоуля-Ленна, определяется значением импульса квадратичного тока  $B_k$  от протекания тока к. з.  $i_k$  за время  $t_k$  — с момента возникновения повреждения до его отключения (или прекращения тока в результате его затухания).

В общем виде выражение для определения импульса квадратичного тока имеет вид:

$$B_k = \sum_{t=0}^{t_k} i_k^2 \Delta t, \quad (6)$$

где  $i_k$  — ток к. з. (мгновенное значение);  $\Delta t$  — приращение времени;  $t_k$  — продолжительность к. з.

Решение задачи по определению нагрева проводника при к. з. осложняется тем, что значение тока  $i_k$  за время к. з. изменяется (см. рис. 3). Точный подсчет  $B_k$  при изменяющемся значении тока  $i_k$ , состоящего из периодической и аperiodической слагающих, достаточно сложен и требует применения методов высшей математики.

В связи с этим для вычисления  $B_k$  целесообразно использовать формулы (7) — (14) из [4].

В [4] рассматриваются три схемы определения импульсов квадратичного тока (рис. 6, а, б и в). Там же принято, что импульс  $B_k$  состоит из двух слагаемых или двух импульсов — от периодического тока  $B_{к,п}$  и от аperiodического  $B_{к,а}$ :

$$B_k = B_{к,п} + B_{к,а} \quad (7)$$

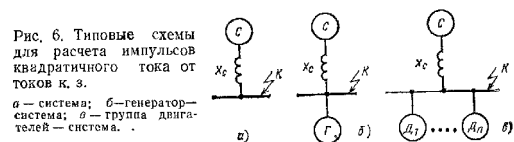


Рис. 6. Типовые схемы для расчета импульсов квадратичного тока от токов к. з.  
а — система; б — генератор — система; в — группа двигателей — система.

а) Для схемы питания потребителей от энергосистемы импульсы квадратичного тока вычисляются по следующим выражениям:

$$B_{к,п} = I_{п,с}^2 t_{отк}; \quad (8)$$

$$B_{к,а} = I_{п,с}^2 T_{а,с} \left( 1 - e^{-\frac{t_{отк}}{T_{а,с}}} \right) \approx I_{п,с}^2 T_{а,с}^* \quad (9)$$

где  $I_{п,с}$  — действующее значение периодической составляющей тока к. з. системы;  $t_{отк}$  — время отключения к. з.;  $T_{а,с}$  — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з. энергосистемы,

$$T_{а,с} = x_{\Sigma} / \omega r_{\Sigma}$$

где  $x_{\Sigma}$  и  $r_{\Sigma}$  — соответственно результирующие индуктивные и активные сопротивления энергосистемы;  $\omega = 2\pi f = 314$  — угловая частота.

Результирующий импульс квадратичного тока определяется по (7) — (9).

б) Для двухлучевой схемы питания потребителей от энергосистемы и генератора вначале по кривым рис. 7 для расчетного времени отключения генератора определяют относительные значения импульсов токового и

\* Упрощенное выражение можно использовать, если  $t_{отк}/T_{а,с} = 1 \pm 2$ .

14

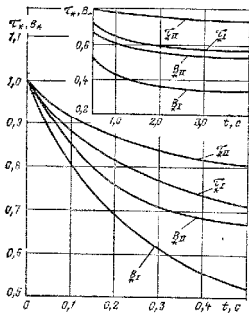
15



квадратичного тока от периодической слагающей тока к. з. генератора.

По полученным результатам рассчитывается импульс квадратичного тока от периодической слагающей тока к. з.:

$$B_{к.п} = (I_{п.с}^2 + I_{п.0,г}^2 B_* + 2I_{п.с} I_{п.0,г} \tau_z) t_{отк}, \quad (10)$$



где  $I_{п.с}$  — действующее значение периодического тока к. з. энергосистемы;  $I_{п.0,г}$  — начальное действующее значение периодической слагающей тока к. з. генератора;  $t_{отк}$  — время отключения к. з.

Рис. 7. Расчетные кривые относительных токовых импульсов ( $I_p$ ) и импульсов квадратичного тока ( $B_*$ ).

$I_p$  — турбогенераторы (кроме ТВВ-400) и синхронный компенсатор КСВ-100;  $I_{п.0,г}$  — гидрогенераторы, синхронные компенсаторы (кроме КСВ-100) и турбогенератор ТВВ-400.

**Примечание.** При проверке термической стойкости проводников и аппаратов, установленных в цепи генератора

$$B_{к.п} = B_* I_{п.0,г}^2 t_{отк,г},$$

где  $t_{отк,г}$  — время отключения к. з. в цепи генератора.

Импульс квадратичного тока от аperiodической слагающей определяется с учетом разновременности затухания аperiodических токов от энергосистемы и генератора

$$B_{к.а} = I_{п.с}^2 T_{а.с} + I_{п.0,г}^2 T_{а.г} + \frac{4I_{п.с} I_{п.0,г}}{\frac{1}{T_{а.с}} + \frac{1}{T_{а.г}}}, \quad (11)$$

где  $T_{а.г}$  — постоянная времени затухания аperiodической слагающей тока к. з. от генератора (берется по каталогу).

Суммарный импульс  $B_k$  определяется по (7), (10) и (11).

16

В основном все практические задачи, связанные с термическим действием тока к. з., сводятся к обеспечению термической стойкости оборудования. Для достижения этой цели прибегают в случае необходимости к ограничению значения тока к. з. путем реактирования, секционирования или к уменьшению длительности существования к. з. Иногда оба эти способа ограничения нагрева от тока к. з. применяют одновременно.

## 5. ВЫБОР ИСХОДНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Принятые допущения.** В расчетах токов к. з., приведенных ниже, приняты следующие допущения:

- не учитываются токи нагрузки;
- не учитываются емкости, а следовательно, и емкостные токи в воздушной и кабельной сети;
- трехфазная сеть принимается симметричной, или сопротивление фаз — точно равными друг другу;
- отсутствует насыщение стали электрических машин (генераторов, электродвигателей, трансформаторов);
- не учитываются токи намагничивания трансформаторов;

не учитываются активные сопротивления генераторов, трансформаторов и реакторов, за исключением случаев, когда требуется определять постоянные времени затухания свободных токов;

не учитывается сдвиг по фазе э. д. с. различных источников питания, входящих в расчетную схему.

В соответствии с назначением расчета токов к. з. (для выбора или проверки аппаратуры, вычисления уставок релейной защиты, подбора разрядников для грозозащиты линий электропередачи и подстанций, анализа аварийных отключений и т. п.) определяют исходные условия. Это означает выбор расчетной схемы сети, режимов к. з., вида к. з. местоположения точек к. з. и момента времени к. з.

**Расчетная схема сети.** На расчетной схеме сети в однолинейном изображении указываются источники питания (энергосистема, генераторы) и элементы сети (линии электропередачи, трансформаторы, реакторы), связывающие источники питания с точками к. з., а также параметры всех упомянутых элементов, необходимые для расчета.

18

в) Для схемы работы на сборные шины энергосистемы и электродвигателей все двигатели заменяются одним с усредненными параметрами.

Затухание периодического тока к. з. от такого эквивалентного двигателя учитывается приближенно в некоторой постоянной времени  $T'_д$ :

$$B_{к.п} = I_{п.с}^2 t_{отк} + 2I_{п.с} I_{п.0,д} T'_д \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T'_д}}\right) + 0,5 I_{п.0,д}^2 T'_д \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T'_д}}\right), \quad (12)$$

где  $I_{п.0,д}$  — начальное действующее значение периодической слагающей тока к. з. от эквивалентного электродвигателя;  $T'_д$  — время затухания периодической слагающей тока к. з. электродвигателей.

Импульс квадратичного тока от аperiodической слагающей определяется из выражения

$$B_{к.а} = (I_{п.с} + I_{п.0,д})^2 T_{а.сх} \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T_{а.сх}}}\right), \quad (13)$$

В этой формуле постоянные времени затухания аperiodических токов от системы и электродвигателей заменены обобщенной постоянной времени

$$T_{а.сх} = \frac{T_{а.с} I_{п.с} + T_{а.д} I_{п.0,д}}{I_{п.с} + I_{п.0,д}}, \quad (14)$$

где  $T_{а.с}$  — постоянная времени затухания аperiodического тока к. з. системы;  $T_{а.д}$  — то же для электродвигателей. Результирующий импульс определяется по (7), (12) и (13).

Выше даны выражения для расчета  $B_k$  в случае преобладания в группе электродвигателей синхронных машин; если же электродвигатели в основном асинхронные, то

$$B_k = I_{п.с}^2 (t_{отк} + T_{а.сх}) + I_{п.0,д}^2 (0,5 T'_д + T_{а.сх}) + 2I_{п.с} I_{п.0,д} (T'_д + T_{а.сх}).$$

Примеры практической проверки оборудования на термическую стойкость по выражениям (7) — (14) приведены в § 13.

§ — 206

17

Электродвигатели напряжением выше 1000 В вводятся в расчетную схему в качестве дополнительного генерирующего источника при условии, если они связаны с местом к. з. непосредственно, кабельными линиями, токопроводами или через линейные реакторы.

**Режимы к. з.** В зависимости от поставленной задачи может потребоваться определение не только максимальных, но и минимальных значений токов в месте к. з. и по элементам расчетной схемы, а также остаточных напряжений в различных точках сети.

Для решения задачи производится исследование расчетной схемы и выясняется, какие элементы расчетной схемы должны быть дополнительно включены или выведены для получения большего или меньшего значения тока к. з., большего или меньшего остаточного напряжения на шинах. Такого рода предварительная работа с расчетной схемой называется выбором расчетных режимов.

Если расчетная схема составлена для нормальных условий работы сети, а в большинстве случаев это бывает так, то исходный режим, при котором рассчитывается к. з., называется нормальным режимом. Все остальные режимы, выбранные для расчета, отличные от нормального, обычно характеризуются другими параметрами энергосистемы (§ 8) или измененным состоянием элементов расчетной схемы. Например, в нормальном режиме генераторы ТЭЦ работают параллельно, в минимальном — раздельно.

Расчетным режимам придают смысловые названия исходя из значения тока к. з., полученного при расчете нормальный, максимальный, минимальный и т. п. или сообщается цифровая нумерация: I, II, III и т. д.

При перспективных расчетах максимальные режимы к. з. следует определять с учетом перспективного развития сети.

Расчеты должны производиться по режимам, соответствующим прохождению по рассматриваемому участку сети наибольшего или наименьшего тока к. з. Так, например, проверка электротехнического оборудования на термическое и электродинамическое действие токов к. з. должна производиться по наиболее тяжелому режиму, когда по рассматриваемому элементу проходит максимальный ток. Напротив, проверка чувствительности ре-

2\*

19



лейной защиты производится по наименьшему току к. з., соответствующему минимальному режиму.

Не следует искусственно усложнять условия, применяя наложение ремонтных режимов, или ориентироваться на временные схемы, создаваемые при переключениях в сети, испытаниях оборудования и т. п. Например, при выборе расчетного режима для настройки устройств релейной защиты не следует считаться с наложением ремонтных отключений двух питающих элементов (допустим, линии и трансформатора) из трех, если в эксплуатации такие совпадения не допускаются; при выборе расчетного режима для проверки аппаратуры не нужно считаться с кратковременным включением на параллельную работу питающих трансформаторов, если в нормальных условиях это запрещается.

**Вид короткого замыкания.** Вид к. з. определяется задачей расчета. Так, например, проверка аппаратов на электродинамическую стойкость или механическое действие тока к. з. должна производиться по трехфазному к. з., дающему наибольшее электромеханическое усилие между проводниками в начальный момент к. з.

Стойкость оборудования к термическому (тепловому) действию тока к. з. также проверяется по трехфазному к. з.

В расчетах релейной защиты, смотря по обстоятельствам, могут быть использованы токи трехфазного, двухфазного, двухфазного на землю и однофазного к. з.

**Местоположение точек короткого замыкания.** При проверке электрооборудования на электродинамическую или термическую стойкость точки к. з. следует располагать таким образом, чтобы при этом проверяемое оборудование находилось в наиболее неблагоприятных условиях.

При выборе уставок релейной защиты точка к. з. принимается, в зависимости от назначения выполняемого расчета, в конце или в начале защищаемого участка.

**Момент времени короткого замыкания.** Момент в процессе к. з., для которого должны быть определены токи или остаточные напряжения, полностью зависит от характера расчета. Например, для проверки отключающей способности выключателя производится расчет тока к. з. для времени  $t$ , равного собственному времени отключения выключателя с добавлением 10 мс; для проверки чувствительности токовой защиты, действующей с вы-

держкой времени, необходимо определить ток для момента к. з., соответствующего выдержке времени защиты. В большинстве случаев для проверки чувствительности релейной защиты допустимо пользоваться значением тока к. з. для начального момента времени, что упрощает расчет. При этом уменьшение тока к. з. с течением времени учитывается соответствующим коэффициентом запаса.

## 6. СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Схема замещения для расчета токов к. з. составляется по расчетной схеме сети. Для этого все без исключения элементы схемы заменяются соответствующими электрическими сопротивлениями, а для источников питания, кроме того, указываются значения э. д. с.

Полное сопротивление линии электропередачи  $z = r + jx$  записывается на схеме через составляющие  $r$  и  $x$  следующим образом: вначале пишется  $r$ , затем  $jx$ ; в результате запись приобретает вид:  $r + jx$ .

При составлении схемы удобна запись сопротивлений дробью: в числителе указывается порядковый номер элемента, в знаменателе — значение сопротивления. Элементы с магнитосвязанными цепями — трансформаторы — вводятся в схему своими эквивалентными электрическими сопротивлениями (§ 8). Схему замещения, включающую эквивалентные сопротивления трансформаторов, называют эквивалентной схемой замещения.\*

В большинстве случаев схема сети содержит одну или несколько ступеней трансформации.

Для составления эквивалентной схемы замещения выбирается основная, или базовая, ступень трансформации и все электрические величины остальных ступеней приводятся к напряжению основной ступени.

Для приведения используются известные соотношения:

$$\begin{cases} \dot{E} = E(n_1 n_2 n_3, \dots, n_n); \\ \dot{U} = U(n_1 n_2 n_3, \dots, n_n); \end{cases} \quad (15)$$

\* Обычно слово «эквивалентная» опускается.