



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Интеллектуальные электрические сети»

Практикум по дисциплине

«Электромагнитные переходные процессы»

Авторы
Цыгулев Н. И.,
Шелест В. А.,
Михайлов В. В.

Ростов-на-Дону, 2020

Аннотация

Практикум предназначен для студентов очной, заочной форм обучения направлений 13.03.02/13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Авторы

д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Интеллектуальные электрические сети»

Цыгулев Н.И.,

к.т.н., доцент кафедры «Интеллектуальные
электрические сети»

Шелест В.А.,

доцент кафедры «Интеллектуальные
электрические сети»

Михайлов В.В.



Оглавление

Задания по практическим занятиям	4
1. Принимаемые допущения	4
2. Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания	5
3. Методы расчета несимметричных коротких замыканий, составление схем замещения	10
4. Расчет аperiodической составляющей тока короткого замыкания.....	13
5. Расчет ударного тока короткого замыкания	14
6. Расчет периодической составляющей тока КЗ для произвольного момента времени	15
7. Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете токов КЗ.....	18
8. Учет комплексной нагрузки при расчетах токов короткого замыкания.....	24
9. Учет сопротивления электрической дуги.....	29
10. Учет изменения активного сопротивления проводников при коротком замыкании	32
11. Примеры расчетов токов короткого замыкания	34
Список литературы	40

ЗАДАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Расчет ТКЗ в сети с напряжением до 1000 В

Задания по практическим занятиям состоит из семи задач: расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания (№1), расчет ударного тока короткого замыкания (№2), расчет периодической составляющей тока КЗ для произвольного момента времени (№3), учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете токов КЗ (№4), учет комплексной нагрузки при расчетах токов короткого замыкания (№5), учет сопротивления электрической дуги (№6), учет изменения активного сопротивления проводников при коротком замыкании (№7).

Все задачи, включенные в задание, даны в нескольких вариантах, поэтому каждый студент получает индивидуальное задание, выдаваемое руководителем.

При выполнении преобразований схем замещения следует приводить промежуточные схемы, дающие возможность видеть последовательность преобразования. Сопротивления всех элементов на схемах должны иметь порядковые номера и величину. Выполнять задачи следует в порядке их размещения. После решения очередной задачи в сроки, устанавливаемые графиком выполнения, она сдается на проверку руководителю.

После решения всех задач и внесения исправлений оформляется отчет согласно соответствующим руководящим указаниями.

Исходные схемы, схемы замещения, векторные диаграммы и графики выполняются на фоне сетки с шагом 1мм с обозначением всех элементов и их числовых значений. Обязательно указываются принятые масштабы величин токов и напряжений.

В заключении приводится перечень использованной литературы, указывается дата окончания работы и ставится подпись студента.

1. ПРИНИМАЕМЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

При расчетах токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ допускается:

- 1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %;
- 2) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ;
- 3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;
- 4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;
- 5) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23;
- 6) не учитывать влияние синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0 % начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей или комплексной нагрузки.

2. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

2.1. Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах.

При составлении эквивалентных схем замещения параметры элементов исходной расчетной схемы следует приводить к ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах.

2.2. Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения - от энергосистемы или от автономного источника.

2.3. При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих пи-

тание непосредственно от сети энергосистемы, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление.

Значение этого сопротивления (X_c), мОм, приведенное к ступени низшего напряжения сети, следует рассчитывать по формуле

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3}I_{\text{к.ВН}} \cdot U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{S_{\text{к}}} 10^{-3}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ср.НН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$U_{\text{ср.ВН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора. В;

$I_{\text{к.ВН}} = I_{\text{п0ВН}}$ - действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$S_{\text{к}}$ - условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы в миллиомах допускается рассчитывать по формуле

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{откл.ном}} \cdot U_{\text{ср.ВН}}} \quad (2)$$

где $I_{\text{откл.ном}}$ - номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора.

В случаях, когда понижающий трансформатор подключен к сети энергосистемы через реактор, воздушную или кабельную линию (длиной более 1 км), необходимо учитывать не только индуктивные, но и активные сопротивления этих элементов.

2.4. При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ ($I_{\text{п0}}$) в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей следует рассчитывать по формуле

Электромагнитные переходные процессы

$$I_{п0} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (3)$$

где $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В;

$R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_p + R_{ТА} + R_{КВ} + R_{Ш} + R_K + R_{1КБ} + R_{ВЛ} + R_D$$

и

$$X_{1\Sigma} = X_c + X_T + X_p + X_{ТА} + X_{КВ} + X_{Ш} + X_{1КБ} + X_{ВЛ}$$

где X_c - эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведенное к ступени низшего напряжения;

R_T и X_T - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм, приведенные к ступени низшего напряжения сети, их рассчитывают по формулам:

$$R_T = \frac{P_{к.НОМ} U_{НННОМ}^2}{S_{Т.НОМ}^2} 10^6; \quad (4)$$

$$X_T = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{100 P_{к.НОМ}}{S_{Т.НОМ}} \right)^2} \frac{U_{НННОМ}^2}{S_{Т.НОМ}} 10^4 \quad (5)$$

где $S_{Т.НОМ}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$P_{к.НОМ}$ - потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{НННОМ}$ - номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

u_k - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$R_{ТА}$ и $X_{ТА}$ - активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм, значения которых приведены в приложении 5 ГОСТ Р 50270-92;

R_p и X_p - активное и индуктивное сопротивления реактора, мОм.

Активное сопротивление токоограничивающего реактора следует рассчитывать по формуле

Электромагнитные переходные процессы

$$R_p = \frac{\Delta P_{p.\text{ном}}}{I_{p.\text{ном}}^2} 10^3, \quad (6)$$

где $\Delta P_{p.\text{ном}}$ - потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт;

$I_{p.\text{ном}}$ - номинальный ток реактора, А.

Индуктивное сопротивление реактора (X_p) следует принимать, как указано изготовителем, или определять по формуле

$$X_p = \omega_c (L - M) \cdot 10^3, \quad (7)$$

где $\omega_c = 2\pi f$ - угловая частота напряжения сети, рад/с;

L - индуктивность катушки реактора, Гн;

M - взаимная индуктивность между фазами реактора,

Гн;

$R_{кв}$ и $X_{кв}$ - активное и индуктивное сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, мОм, значения которых приведены в приложении 6 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{ш}$ и $X_{ш}$ - активное и индуктивное сопротивления шинопроводов, мОм. Рекомендуемый метод расчета сопротивлений шинопроводов и параметры некоторых комплектных шинопроводов приведены в приложении 1 ГОСТ Р 50270-92;

R_k - суммарное активное сопротивление различных контактов и контактных соединений, данные о которых приведены в приложении 4 ГОСТ Р 50270-92. При приближенном учете сопротивлений контактов следует принимать: $R_k = 0,1$ мОм - для контактных соединений кабелей; $R_k = 0,01$ мОм - для шинопроводов; $R_k = 1,0$ мОм - для коммутационных аппаратов;

$R_{1кб}$ и $X_{1кб}$ - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабелей, значения которых приведены в приложении 2 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{1вл}$ и $X_{1вл}$ - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности воздушных линий или проводов, проложенных открыто на изоляторах, значения которых приведены в приложении 3 ГОСТ Р 50270-92;

R_d - активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, рассчитываемое, как указано в п.8, в зависимости от условий КЗ.

2.5. Если электроснабжение электроустановки осуществляется

от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом подпитки от электродвигателей или комплексной нагрузки следует определять как сумму токов от энергосистемы (см. п. 2.4) и от электродвигателей или комплексной нагрузки (см пп. 6 и 7).

2.6. В электроустановках с автономными источниками электроэнергии начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ без учета подпитки от электродвигателей в килоамперах следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0} = \frac{E''_{\phi}}{\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (8)$$

где $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм.

Эти сопротивления равны:

$$R_{1\Sigma} = R_{ст} + R_{ТА} + R_{кв} + R_p + R_{ш} + R_k + R_{1кб} + R_{1вл} + R_d$$

;

$$X_{1\Sigma} = X''_d + X_{ТА} + X_{кв} + X_p + X_{ш} + X_{1кб} + X_{1вл},$$

где E''_{ϕ} - сверхпереходная ЭДС (фазное значение) автономного источника, В. Значение этой ЭДС следует рассчитывать как и для синхронных электродвигателей (см. п. 6);

X''_d - сверхпереходное сопротивление по продольной оси ротора;

$R_{ст}$ - активное сопротивление обмотки статора автономного источника.

2.7. При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки в автономной электрической системе начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ следует определять как сумму токов от автономных источников (см. п. 2.6) и от электродвигателей (см. п. 6) или комплексной нагрузки (см. п. 7).

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ, СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

3.1. Расчет токов несимметричных КЗ следует выполнять с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно следует составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы исходной расчетной схемы, причем при расчете начального значения периодической составляющей тока несимметричного КЗ автономные источники, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также комплексная нагрузка должны быть учтены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями.

Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы исходной расчетной схемы. Сопротивления обратной последовательности следует принимать по данным каталогов, а асинхронных машин - принимать равными сверхпереходным сопротивлениям.

3.2. Расчет токов однофазного короткого замыкания

3.2.1. Если электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы, кА, следует рассчитывать по формуле

$$I_{\Pi 0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \quad (9)$$

где $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм;

$R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$\left. \begin{aligned} R_{0\Sigma} &= R_{0\Gamma} + R_{\text{п}} + R_{\text{тА}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{к}} + R_{0\text{ш}} + R_{0\text{кб}} + R_{0\text{вл}} + R_{\text{д}}; \\ X_{0\Sigma} &= X_{0\Gamma} + X_{\text{п}} + X_{\text{тА}} + X_{\text{кв}} + X_{0\text{ш}} + X_{0\text{кб}} + X_{0\text{вл}}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Электромагнитные переходные процессы

где $R_{0т}$ и $X_{0т}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора. Для трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 , при расчете КЗ в сети низшего напряжения эти сопротивления следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей;

$R_{0ш}$ и $X_{0ш}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпровода;

$R_{0кб}$ и $X_{0кб}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля;

$R_{0вл}$ и $X_{0вл}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности воздушной линии:

$$R_{0вл} = R_1 + 3R_3 = R_1 + 0,15 \text{ МОм/м};$$

$$X_{0вл} \approx 3X_{1вл}.$$

3.2.2. В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ ($I_{п0}^{(1)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{3E''_{\phi}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \quad (11)$$

где E''_{ϕ} - эквивалентная сверхпереходная ЭДС автономных источников (фазная), В, которую определяют в соответствии с п. 2.6.

Начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ с учетом синхронных и асинхронных электродвигателей в килоамперах следует рассчитывать аналогично, в соответствии с формулой (11).

При необходимости определения периодической составляющей тока однофазного КЗ в произвольный момент времени следует применять методы, изложенные в п.6.

Комплексная нагрузка учитывается параметрами, приведенными в табл. 5.1.

3.3. Расчет токов двухфазного короткого

замыкания

3.3.1. При электроснабжении электроустановок напряжением до 1 кВ от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ ($I_{п0}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (12)$$

где

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_P + R_{ТА} + R_{КВ} + R_{Ш} + R_K + R_{1КБ} + R_{1ВЛ} + R_D / 2;$$

$$X_{1\Sigma} = X_C + X_T + X_P + X_{ТА} + X_{КВ} + X_{Ш} + X_{1КБ} + X_{1ВЛ}.$$

3.3.2. В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_{\Phi}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (13)$$

Начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом асинхронных электродвигателей ($I_{п0АД}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0АД}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_{\Phi\Sigma}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (14)$$

где $E''_{\Phi\Sigma}$ - эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение) асинхронных электродвигателей и источника электроэнергии, В;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности относительно точки КЗ (с учетом параметров асинхронных электродвигателей), мОм.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом синхронных электродвигателей в килоамперах определяют аналогично.

При необходимости определения периодической составляющей тока двухфазного КЗ в произвольный момент времени применяют методы расчета, приведенные в п.6.

4. РАСЧЕТ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в общем случае следует считать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ:

$$i_{a0} = \sqrt{2}I_{п0}. \quad (15)$$

4.2. В радиальных сетях аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять по формуле

$$i_{at} = i_{a0}e^{-t/T_a}, \quad (16)$$

где t - время, с;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с, равная

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega_c R_\Sigma}, \quad (17)$$

где X_Σ и R_Σ - результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм;

ω_c - синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

При определении X_Σ и R_Σ синхронные генераторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть введены в схему замещения в соответствии с требованиями п. 7.

Комплексная нагрузка должна быть введена в схему замещения в соответствии с требованиями п. 8.

4.3. Аperiodическую составляющую тока КЗ от автономного синхронного генератора в килоамперах в случае необходимости учета тока генератора в момент, предшествующий КЗ, следует определять, как в п. 5.3.4.

4.4. Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму аperiodических составляющих токов отдельных ветвей, используя формулу (5.15).

5. РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5.1. Ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2}I_{п0} \left(1 + e^{\frac{-t_{уд}}{T_a}} \right) = \sqrt{2}I_{п0} K_{уд} \quad (18')$$

где $K_{уд} = \left(1 + e^{\frac{-t_{уд}}{T_a}} \right)$ - ударный коэффициент, который может

быть определен на рис. 1;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ (см. п. 4.2);

$t_{уд}$ - время от начала КЗ до появления ударного тока, с, равное

$$t_{уд} = 0,001 \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi_k}{\pi};$$

$$\varphi_k = \arctg X_{1\Sigma} / R_{1\Sigma}.$$

5.2. При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки ударный ток КЗ следует определять как сумму ударных токов от автономных источников и от электродвигателей (см. п. 7) или от комплексной нагрузки (см. п. 8).

5.3. Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то ударный ток КЗ допустимо определять как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{уд} = \sum_{i=1}^m \sqrt{2}I_{п0i} \left(1 + e^{\frac{-t_{удi}}{T_{ai}}} \right), \quad (19)$$

где m - число независимых ветвей схемы;

$I_{п0i}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА;

$t_{удi}$ - время появления ударного тока в i -й ветви, с;

T_{ai} - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, с.

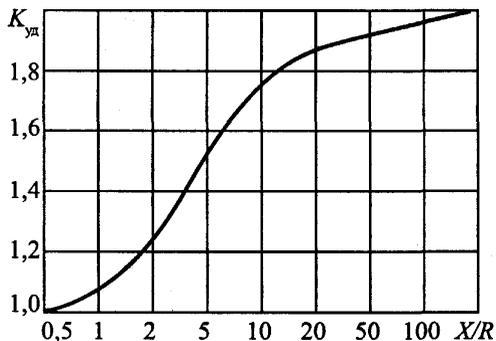
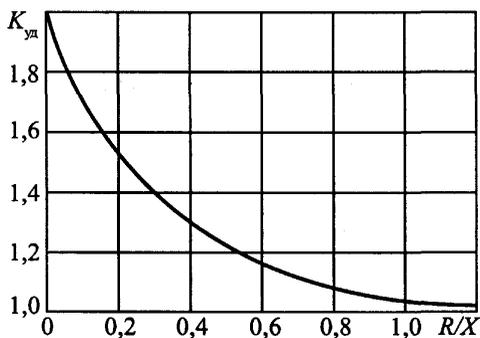


Рисунок 1 - Кривые зависимости ударного коэффициента $K_{уд}$ от отношений R/X и X/R

6. РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КЗ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО МОМЕНТА ВРЕМЕНИ

6.1. Методика расчета периодической составляющей тока трехфазного КЗ для произвольного момента времени в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения - от энергосистемы или от автономного источника.

6.2. При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей следует определять по формуле

$$I_{\text{пт}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3} \sqrt{X_{1\Sigma}^2 + (R_{1\Sigma} + R_{\text{дт}} + R_{\text{кб.9т}})^2}} \quad (20)$$

где $U_{\text{ср.НН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло КЗ, В;

$X_{1\Sigma}$, $R_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм, (см. п. 2.4) без учета активного сопротивления электрической дуги и кабельной (воздушной) линии;

$R_{\text{дт}}$ - активное сопротивление дуги в месте КЗ в произвольный момент времени, мОм, которое рассчитывают в соответствии с п. 9;

$R_{\text{кб.9т}}$ - активное сопротивление прямой последовательности кабельной линии к моменту t с учетом нагрева его током КЗ, мОм. Это сопротивление рассчитывают в соответствии с п. 10.

6.3. Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, связанные с точкой КЗ по радиальной схеме, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму токов от энергосистемы и от электродвигателей или комплексной нагрузки (см. пп. 7 и 8).

6.4. В электроустановках с автономными источниками электроэнергии уточненный расчет периодической составляющей тока КЗ от источников электроэнергии (синхронных генераторов) в произвольный момент времени следует выполнять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ЭВМ и выделения периодической составляющей. В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ при радиальной схеме следует применять типовые кривые, приведенные на

рис. 2.

Типовые кривые разработаны на базе параметров схемы замещения эквивалентного генератора, полученных в результате эквивалентирования синхронных генераторов напряжением 230/400 В различных серий, а именно: МСК-1500 (400 В); МСК-1500 (230 В); МС-1500 (400 В); МС-1500 (230 В); МС-1000 (400 В); МС-1000 (230 В); СГДС (400 В); ЕСС, ЕСС5 (230 В); ЕСС, ЕСС5 (400 В); ГСФ5; ГМ; СВГ; СГ и др.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронного генератора (или нескольких однотипных синхронных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ) следует определять по формуле

$$I_{\text{пт}} = \gamma_t I_{* \text{п0(ном)}} I_{\text{ном}}, \quad (21)$$

причем при нескольких генераторах под номинальным током следует понимать сумму номинальных токов всех генераторов.

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки в автономной электрической системе действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени при радиальной схеме связи двигателей с точкой КЗ следует определять как сумму токов от автономных источников и от электродвигателей или комплексной нагрузки (см. пп. 7 и 8).

Учет влияния на ток КЗ сопротивления электрической дуги и увеличения активного сопротивления проводников под действием тока КЗ рекомендуется выполнять в соответствии с пп. 9 и 10.

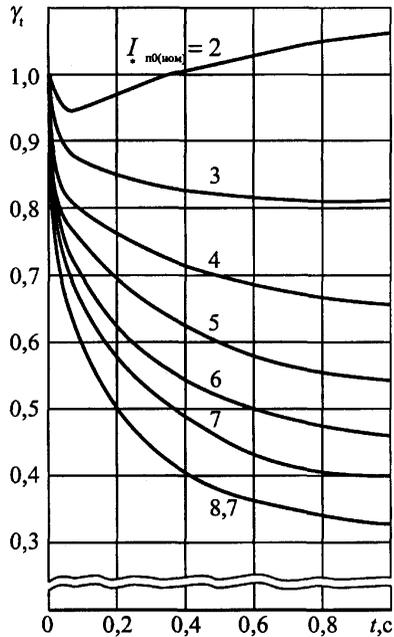


Рисунок 2 - Типовые кривые для синхронного генератора автономных систем электроснабжения напряжением 400/230 В

7. УЧЕТ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКОВ КЗ

7.1. При расчете начального значения периодической составляющей тока КЗ синхронные электродвигатели следует учитывать сверхпереходным сопротивлением по продольной оси ротора (X_d''), а при определении постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ — индуктивным сопротивлением для токов обратной последовательности X_2 и активным сопротивлением обмотки статора $R_{сд}$. При приближенных расчетах допустимо принимать

$$X_{d(ном)}'' = 0,15; X_2 = X_d''; R_{сд} = 0,15 X_d''.$$

7.2. В радиальной схеме начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей следует определять по формуле

$$I_{\text{посд}} = \frac{E''_{\text{ф.сд}}}{\sqrt{(X''_{\text{д}} + X_{1\Sigma})^2 + (R_{\text{сд}} + R_{1\Sigma})^2}}, \quad (22)$$

где $E''_{\text{ф.сд}}$ - сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя (фазное значение), В;

$X''_{\text{д}}$ и $R_{\text{сд}}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и расчетной точкой КЗ, мОм.

Для синхронных электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, сверхпереходную ЭДС в вольтах следует рассчитывать по формуле

$$E''_{\text{ф.сд}} = \sqrt{(U_{\text{ф}|0|} \cos \varphi_{|0|} + I_{|0|} R_{\text{сд}})^2 + (U_{|0|} \sin \varphi_{|0|} + I_{|0|} X''_{\text{д}})^2} \quad (23)$$

Для синхронных электродвигателей, работавших до КЗ с недо-возбуждением, сверхпереходную ЭДС ($E''_{\text{ф.сд}}$), в вольтах, следует определять по формуле

$$E''_{\text{ф.сд}} = \sqrt{(U_{\text{ф}|0|} \cos \varphi_{|0|} + I_{|0|} R_{\text{сд}})^2 + (U_{|0|} \sin \varphi_{|0|} - I_{|0|} X''_{\text{д}})^2} \quad (24)$$

7.3. При расчетах начального значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей последние следует вводить в схему замещения сверхпереходным индуктивным сопротивлением. При необходимости проведения уточненных расчетов следует также учитывать активное сопротивление асинхронного электродвигателя.

Суммарное активное сопротивление, характеризующее асинхронный электродвигатель в начальный момент КЗ в миллиомах, допустимо рассчитывать по формуле

$$R_{\text{АД}} = R_1 + 0,96 \overset{\circ}{R}_2, \quad (25)$$

где R_1 - активное сопротивление статора, мОм;

R_2 - активное сопротивление ротора, приведенное к статору, мОм. Это сопротивление допустимо определять по формуле

$$R_2 = \frac{0,36 M_{* \Pi} (P_{\text{НОМ}} + P_{\text{МХ}})}{I_{* \Pi}^2 I_{\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})} 10^6 \quad (26)$$

где $M_{* \Pi}$ - кратность пускового момента электродвигателя по отношению к его номинальному моменту;

$P_{\text{НОМ}}$ - номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$P_{\text{МХ}}$ - механические потери в электродвигателе (включая добавочные потери), кВт;

$I_{* \Pi}$ - кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току;

$I_{\text{НОМ}}$ - номинальный ток электродвигателя, А;

$s_{\text{НОМ}}$ - номинальное скольжение, отн.ед.

Активное сопротивление статора электродвигателя, в миллиомах, если оно не задано изготовителем, допускается определять по формуле

$$R_1 = \frac{s_{\text{НОМ}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \cos \varphi \eta_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} \quad (27)$$

где $s_{\text{НОМ}}$ - номинальное скольжение асинхронного электродвигателя, %.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя в миллиомах равно

$$X''_{\text{АД}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ф.НОМ}}}{I_{* \Pi} I_{\text{НОМ}}} 10^3 \right)^2 - R_{\text{АД}}^2} \quad (28)$$

где $U_{\text{ф.НОМ}}$ - номинальное фазное напряжение электродвигателя, В.

7.4. Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей в килоамперах следует рассматривать по формуле

$$I_{\text{п0АД}} = \frac{E''_{\text{ф.АД}}}{\sqrt{(X''_{\text{АД}} + X_{1\Sigma})^2 + (R_{\text{АД}} + R_{1\Sigma})^2}} \quad (29)$$

где $X''_{АД}$ и $R_{АД}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, МОм;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и расчетной точкой КЗ, МОм;

$E''_{ф.АД}$ - сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя, которую можно рассчитать по формуле (24), заменив в ней $R_{сд}$ и X''_d соответственно на $R_{АД}$ и $X''_{АД}$.

7.5. Ударный ток трехфазного КЗ от синхронного электродвигателя следует рассчитывать так же, как и от автономного источника (см. п. 4).

7.6. Ударный ток от асинхронного электродвигателя следует рассчитывать с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока КЗ по формуле

$$i_{удАД} = \sqrt{2} I_{п0АД} \left(e^{\frac{-0,01}{T_p}} + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right) \quad (30)$$

где T_p - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, с;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока статора, с.

Постоянные T_p и T_a допускается рассчитывать по формулам

$$T_p = \frac{X''_{АД} + X_{1кб}}{\omega_c \cdot R_2}; \quad (31)$$

$$T_a = \frac{X''_{АД} + X_{1кб}}{\omega_c (R_1 + R_{1кб})}, \quad (32)$$

где ω_c - синхронная угловая частота, рад/с;

R_1 и R_2 - соответственно активное сопротивление статора и

активное сопротивление ротора, приведенное к статору, которые допускается рассчитывать, как указано в п. 7.3.

7.7. Точный расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени выполняют путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов и выделения периодической составляющей тока. При приближенных расчетах этой составляющей тока КЗ в радиальной схеме используют типовые кривые, приведенные на рис. 3 и 4.

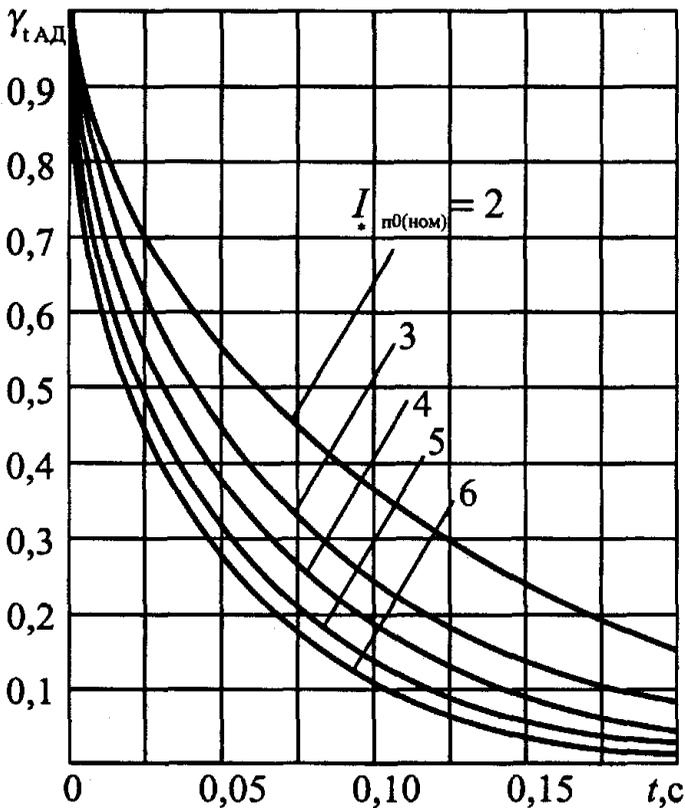


Рисунок 4 - Типовые кривые для асинхронного электродвигателя напряжением до 1 кВ

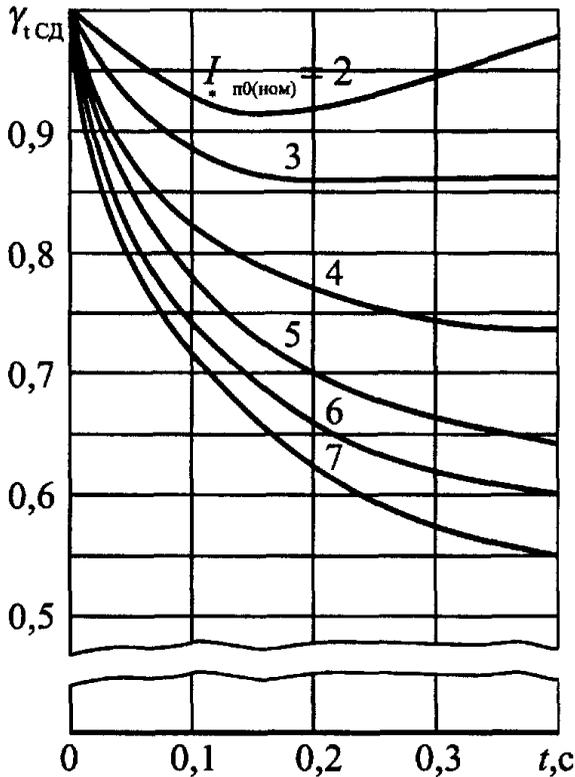


Рисунок 4 - Типовые кривые для синхронного электродвигателя напряжением до 1 кВ

Типовые кривые асинхронного двигателя (рис. 3) разработаны на базе параметров схемы замещения эквивалентного асинхронного двигателя, полученных при эквивалентировании следующих серий асинхронных двигателей: А2 6 - 9-го габаритов; АОЛ2; 4А и 4АН; ВАО; АЗ-315; А 3 - 9-го габаритов; АО и АОЛ 2 - 9-го габаритов; А защищенные 10 - 13-го габаритов; АО 8 и 9-го габаритов и др.

Типовые кривые синхронного двигателя (рис. 4) разработаны также в результате эквивалентирования синхронных двигателей напряжением до 1 кВ.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронного или асинхронного электродвигателя ($I_{птСД}$, $I_{птАД}$) или нескольких электродвигателей, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ, следует рассчитывать соответственно по формулам

$$I_{птСД} = \gamma_{тСД} I_{*} I_{п0(ном)} I_{номСД} \quad (33)$$

$$I_{птАД} = \gamma_{тАД} I_{*} I_{п0(ном)} I_{номАД} \quad (34')$$

причем при нескольких электродвигателях под номинальным током следует понимать сумму номинальных токов всех электродвигателей.

8. УЧЕТ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

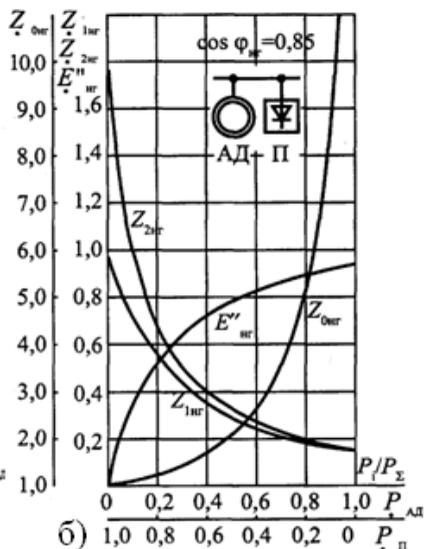
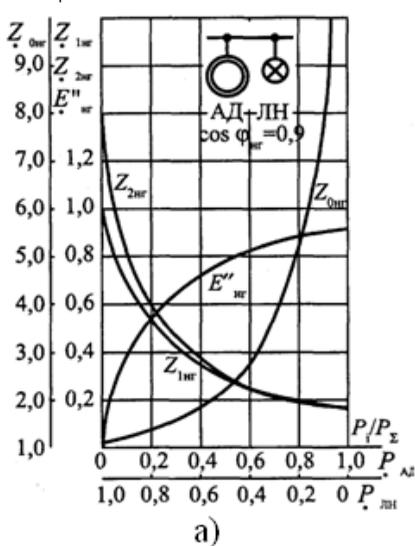
8.1. В состав комплексной нагрузки могут входить асинхронные и синхронные электродвигатели, преобразователи, электротермические установки, конденсаторные батареи, лампы накаливания и газоразрядные источники света.

8.2. При определении начального значения периодической составляющей тока КЗ комплексную нагрузку в схему замещения прямой последовательности следует вводить эквивалентной сверхпереходной ЭДС E'' и сопротивлением прямой последовательности $Z_{1нг}$, а в схему обратной и нулевой последовательностей - сопротивлениями $Z_{2нг}$ и $Z_{0нг}$. Рекомендуемые значения сверхпереходной ЭДС ($E''_{нг}$), сопротивлений прямой (Z_1) и обратной (Z_2) последовательностей отдельных элементов комплексной нагрузки приведены в табл. 5.1.

8.3. Значения модулей полных сопротивлений $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$ и $Z_{0нг}$, а также эквивалентной сверхпереходной ЭДС комплексной нагрузки $E''_{нг}$ в относительных единицах при отсутствии других, более полных данных, могут быть определены по кривым, приведенным на рис. 5, а-г и б, а-в в зависимости от относительного состава потребителей узла нагрузки P/P_{Σ} , где P_{Σ} - суммарная номинальная активная мощность нагрузки, кВт; P - установленная мощность i -го потребителя нагрузки, кВт ($P_{*АД}$ - асинхронные двигатели,

Электромагнитные переходные процессы

$P_{* \text{ СД}}$ - синхронные двигатели, $P_{* \text{ ЛН}}$ - лампы накаливания, $P_{* \text{ ЭУ}}$ - электротермические установки, $P_{* \text{ ЛГ}}$ - газонаполненные лампы, $P_{* \text{ П}}$ - преобразователи). На графиках указаны значения $\cos \varphi_{\text{нг}}$.



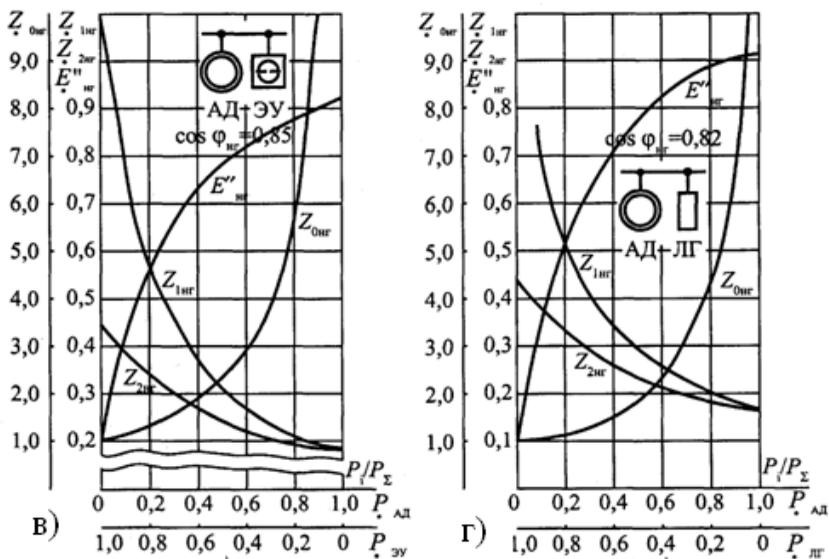
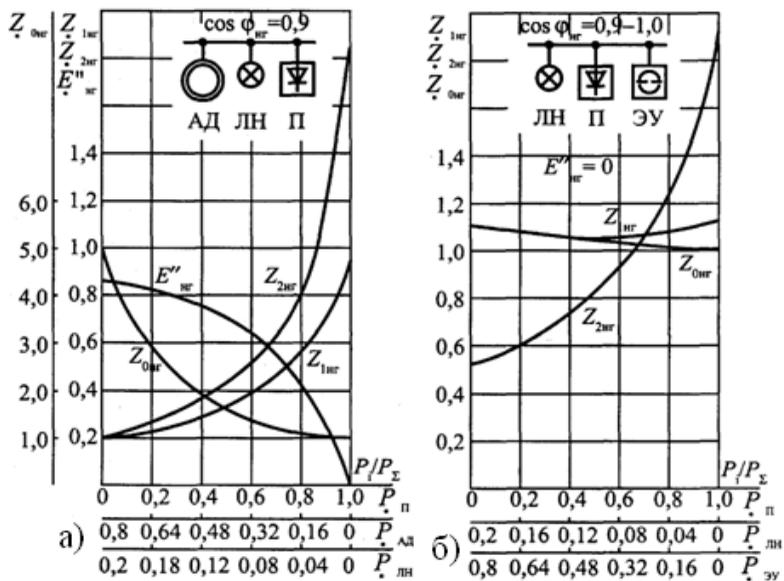


Рисунок 5 - Зависимость параметров комплексной нагрузки $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$, $Z_{0нг}$, $E''_{нг}$ от ее состава



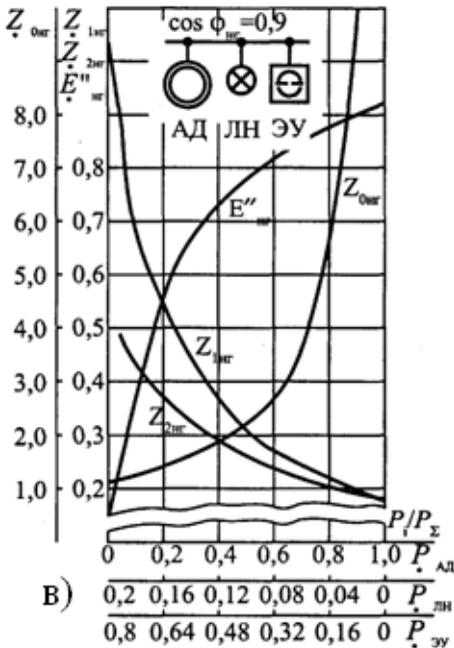


Рисунок 6 - Зависимость параметров комплексной нагрузки $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$, $Z_{0нг}$, $E_{нг}$ от ее состава

8.4. Метод учета комплексной нагрузки зависит от характера исходной схемы замещения комплексной нагрузки (рис. 7) и положения расчетной точки КЗ.

В радиальной схеме допускается не учитывать влияние статических потребителей (преобразователей, электротермических установок, электрического освещения). Начальное значение периодической составляющей тока КЗ, ударный ток, а также периодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени от асинхронных и синхронных электродвигателей в радиальных схемах следует рассчитывать в соответствии с указаниями, изложенными в п. 7.

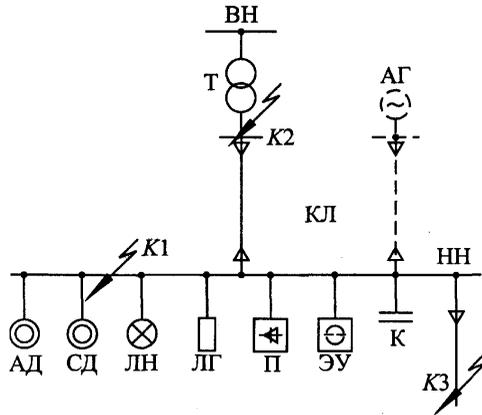


Рисунок 7 - Типовая расчетная схема узла комплексной нагрузки

- АД — асинхронные электродвигатели;
 СД — синхронные электродвигатели;
 ЛН — лампы накаливания;
 ЛГ — лампы газоразрядные;
 П — преобразователи;
 ЭУ — электротермические установки;
 К — конденсаторные батареи;
 КЛ — кабельная линия;
 АГ — автономный источник электроэнергии;
 Т — трансформатор;
 К1, К2, К3 — точки КЗ

8.5. При КЗ за общим для узла нагрузки сопротивлением начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ ($I_{п0нр}$) в килоамперах следует определять с учетом влияния двигательной и статической нагрузок, используя формулу

$$I_{п0нр} = \frac{E''_{*нр} U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \sqrt{\left(Z_{*1нр} \frac{U_{ср.НН}^2}{S_{\Sigma}} \cos \varphi_{нр} + R_{1\Sigma} \right)^2 + \left(Z_{*1нр} \frac{U_{ср.НН}^2}{S_{\Sigma}} \sin \varphi_{нр} + X_{1\Sigma} \right)^2}} \quad (35)'$$

где $E''_{*нр}$ и $Z_{*1нр}$ - эквивалентная ЭДС и сопротивление прямой последовательности узла нагрузки; их значения в относительных единицах следует определять по кривым, приведенным на рис. 5 и 6, в зависимости от относительного состава потребителей;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи короткого замыкания, мОм;
 S_{Σ} - суммарная номинальная мощность нагрузки, кВ·А;
 $U_{\text{ср.НН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, соответствующей обмотке низшего напряжения трансформатора, В.

Значения ударного тока и периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от электродвигателей следует определять в соответствии с пп. 5 и 7.

8.6. При коротком замыкании за общим для нагрузки и системы сопротивлением (рис. 5.14, *r*) и одинаковых отношениях X/R ветвей расчетной схемы начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ допускается рассчитывать по формуле

$$I_{\text{п0к}} = \frac{U_{\text{ср.НН}} \frac{1}{n_i} Z_{1\text{нг}} + E''_{* \text{нг(ном)}} U_{\text{ср.НН}} Z_c}{Z_c \cdot Z_{1\text{нг}} + Z_c \cdot Z_k + Z_{1\text{нг}} \cdot Z_k} \quad (36)$$

где $E''_{* \text{нг(ном)}}$ - ЭДС узла нагрузки в относительных единицах;

n_i - коэффициент трансформации трансформатора;

$Z_{1\text{нг}}$, Z_c , Z_k — модули сопротивлений ветвей исходной схемы замещения (рис. 5.14, *r*), причем

$$Z_{1\text{нг}} = Z_{* \text{1нг(ном)}} \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_{\Sigma}} ;$$

$$Z_c = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2} - \text{рассчитывается, как указано в п. 2;}$$

$$Z_k = \sqrt{R_{1\Sigma k}^2 + X_{1\Sigma k}^2} ; R_{1\Sigma k} \text{ и } X_{1\Sigma k} - \text{соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ.}$$

Значения ударного тока и периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени следует определять в соответствии с пп. 5 и 7.

9. УЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

9.1. Учет электрической дуги в месте КЗ рекомендуется производить введением в расчетную схему активного сопротивления дуги R_d , которое определяется на базе вероятностных характеристик влияния устойчивой (непогасающей) дуги на ток КЗ.

9.2. Среднее значение активного сопротивления дуги в начальный момент КЗ допустимо определять по формуле

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{cp.HH}}^2}{3I_{\text{н0}}^2 K_c^2} - X_{1\Sigma}^2 - R_{1\Sigma}} \quad , \quad (37)$$

где $I_{\text{н0}}$ - начальное значение периодической составляющей тока в месте металлического КЗ, кА, определяемое в соответствии с п. 2;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивление цепи КЗ, мОм;

K_c - среднестатистическое значение поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока в начальный момент дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ, который можно определить по формуле

$$K_c = 0,6 - 0,0025Z_k + 0,114\sqrt{Z_k} - 0,13\sqrt[3]{Z_k} \quad (38)$$

где Z_k - сопротивление цепи КЗ, зависящее от вида КЗ:

при трехфазном КЗ $Z_k^{(3)} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}$;

при двухфазном КЗ $Z_k^{(2)} = 2 / \sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}$;

при однофазном КЗ

$$Z_k^{(1)} = 1 / 3 \sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2} .$$

9.3. Среднее значение активного сопротивления дуги в произвольный момент времени при устойчивом дуговом КЗ допустимо определять по формуле

$$R_{\text{дт}} = \sqrt{\frac{U_{\text{cp.HH}}^2}{3I_{\text{пт}}^2 K_{\text{ст}}^2} - X_{1\Sigma}^2 - (R_{1\Sigma} + R_{1\text{кб.9т}})} \quad , \quad (39)$$

где $I_{\text{пт}}$ - действующее значение периодической составляющей тока металлического КЗ в произвольный момент времени, определяемое в соответствии с п. 6 с учетом увеличения активного сопротивления цепи КЗ;

$R_{1\Sigma}$ - суммарное активное сопротивление прямой последовательности цепи КЗ, мОм, без учета активного сопротивления кабельной или воздушной линии и сопротивления электрической дуги;

$R_{1\text{кб.9т}}$ - активное сопротивление прямой последовательности

Электромагнитные переходные процессы

кабельной или воздушной линии к моменту t , МОм, с учетом нагрева ее током КЗ. Это сопротивление рассчитывают в соответствии с п. 10;

K_{ct} - среднестатистическое значение поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ, который можно определить по формуле

$$K_{ct} = 0,55 - 0,002Z_{kt} + 0,1\sqrt{Z_{kt}} - 0,12\sqrt[3]{Z_{kt}} \quad (40)$$

где Z_{kt} - сопротивление цепи КЗ, зависящее от вида КЗ:

при трехфазном КЗ $Z_{kt}^{(3)} = \sqrt{(R_{1\Sigma} + R_{1кб9т})^2 + X_{1\Sigma}^2}$;

при двухфазном КЗ ;

$$Z_{kt}^{(2)} = 2 / \sqrt{3} \sqrt{(R_{1\Sigma} + R_{1кб9т})^2 + X_{1\Sigma}^2}$$

при однофазном КЗ .

$$Z_{kt}^{(1)} = 1 / 3 \sqrt{[2(R_{1\Sigma} + R_{1кб9т}) + R_{0\Sigma}]^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}$$

9.4. Расчет максимальных и минимальных значений тока дугового КЗ рекомендуется выполнять на основе предельных значений сопротивления дуги, определяемых по статистическим характеристикам разброса поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ.

9.5. При определении вероятного значения тока КЗ в начальный момент времени с учетом сопротивления дуги последнее рекомендуется рассчитывать по формуле, в которой коэффициент K_c следует определять в соответствии с выражением:

для максимального значения тока КЗ

$$K_{c \max} = 0,788 + 0,353 \cdot 10^{-2} Z_k - 0,21 \cdot 10^{-4} Z_k^2 + 0,45 \cdot 10^{-7} Z_k^3 \quad (41)$$

для минимального значения тока КЗ

$$K_{c \min} = 0,458 + 0,557 \cdot 10^{-2} Z_k - 0,247 \cdot 10^{-4} Z_k^2 + 0,39 \cdot 10^{-7} Z_k^3 \quad (42)$$

9.6. При определении вероятного значения тока КЗ в произвольный момент времени сопротивление дуги рекомендуется рассчитывать по формуле (39), в которой коэффициент K_{ct} следует

определять в соответствии с выражением:

для максимального значения тока КЗ

$$K_{ct \max} = 0,661 + 0,319 \cdot 10^{-2} Z_{kt} - 0,127 \cdot 10^{-4} Z_{kt}^2 + 0,13 \cdot 10^{-7} Z_{kt}^3 \quad (43)$$

для минимального значения тока КЗ

$$K_{ct \min} = 0,339 + 0,745 \cdot 10^{-2} Z_{kt} - 0,484 \cdot 10^{-4} Z_{kt}^2 + 0,13 \cdot 10^{-7} Z_{kt}^3 \quad (44)$$

10. УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

10.1. При расчете минимального значения тока КЗ для произвольного момента времени необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ.

В зависимости от целей расчета увеличение активного сопротивления проводников рекомендуется определять с учетом или без учета теплоотдачи в окружающую среду, а также с учетом или без учета электрической дуги в месте КЗ.

10.2. Увеличение активного сопротивления проводников рекомендуется учитывать с помощью коэффициента $K_{\text{э}}$, зависящего от материала и температуры проводника

$$R_{\text{эt}} = R_{\text{н}} K_{\text{эt}},$$

где $R_{\text{н}}$ - активное сопротивление проводника при начальной температуре, мОм, которое может быть определено по формуле (5.46);

$K_{\text{э}}$ - коэффициент увеличения активного сопротивления проводника, который определяется по формуле (5.49).

10.3. При металлическом КЗ значение коэффициента $K_{\text{э}}$ с учетом теплоотдачи (имеются в виду кабельные линии) или без учета теплоотдачи (имеются в виду воздушные линии) следует определять в соответствии с рекомендациями п. 5.10.

10.4. При дуговом КЗ следует учитывать взаимное влияние изменения активного сопротивления проводника вследствие нагрева током КЗ и сопротивления электрической дуги в месте КЗ.

Значения коэффициента $K_{\text{э}}$ для кабелей с алюминиевыми жилами при нагреве их током дугового устойчивого КЗ с учетом теплоотдачи определяют в зависимости от сечения жилы кабеля, тока в месте КЗ ($I_{\text{н0}}$) и продолжительности КЗ по кривым, приведенным

на рис. 8 или 9, а для кабелей с медными жилами - по кривым, приведенным на рис. 10 или 11.

Кривые, приведенные на рис. 8-11, получены при следующих расчетных условиях: КЗ происходит в радиальной схеме, содержащей источник неизменной по амплитуде ЭДС; температура кабеля изменяется от $\vartheta_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $\vartheta_{к.доп} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; сопротивление

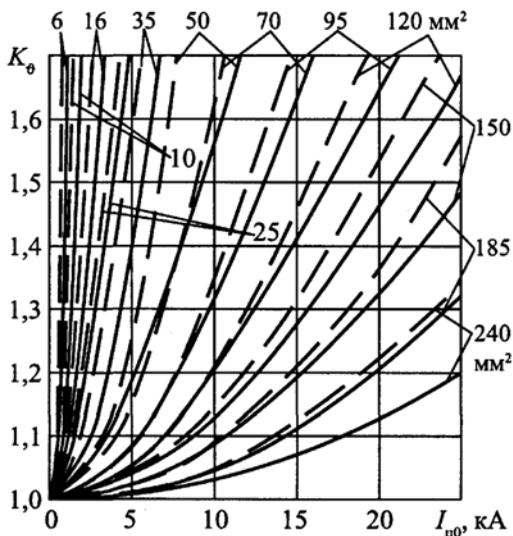


Рисунок 8 - Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с алюминиевыми жилами

электрической дуги учитывается в соответствии с п. 9; влияние теплоотдачи в изоляцию учитывается в соответствии с рекомендациями п. 5.10; продолжительность КЗ ($t_{откл}$) составляет 0,2; 0,6; 1-1,5 с.

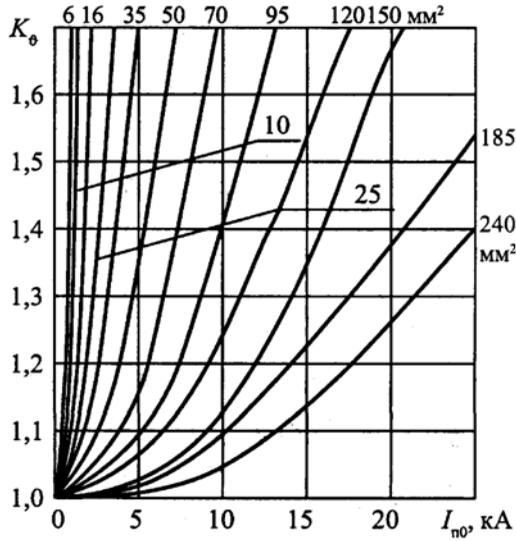
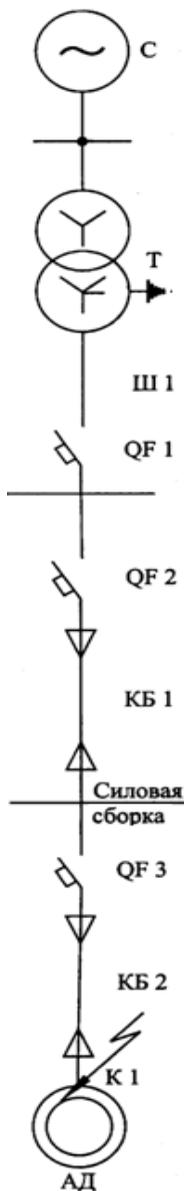


Рисунок 9 - Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с алюминиевыми жилами от тока дугового устойчивого КЗ с учетом теплоотдачи при продолжительностях КЗ 1-1,5 с

11. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Электромагнитные переходные процессы



11.1. Требуется определить вероятные максимальное и минимальное значения тока в начальный момент КЗ в точке К1 (см. схему на рис. 10) и к моменту отключения КЗ ($t_{\text{откл}} = 0,6$ с). Исходные данные приведены ниже.

Система С: $S_{\text{к}} = 150$ МВ·А; $U_{\text{ср.вн}} = 6,0$ кВ.

Трансформатор типа ТСЗС-1000/6,0: $i_{\text{к}} = 8\%$; $U_{\text{вн}} = 6,3$ кВ; $U_{\text{нн}} = 0,4$ кВ; $P_{\text{к}} = 11,2$ кВт.

Автоматические выключатели:

QF1 "Электрон": $I_{\text{ном}} = 1000$ А; $R_{\text{кв1}} = 0,25$ МОм; $X_{\text{кв1}} = 0,1$ МОм;

QF2-A3794С: $I_{\text{ном}} = 400$ А; $R_{\text{кв2}} = 0,65$ МОм; $X_{\text{кв2}} = 0,17$ МОм;

QF3-AE2056: $I_{\text{ном}} = 100$ А; $R_{\text{кв3}} = 2,15$ МОм; $X_{\text{кв3}} = 1,2$ МОм.

Шинопровод Ш1: ШМА-4-1600; $l_1 = 15$ м; $R_{1\text{ш1}} = 0,03$ МОм/м; $X_{1\text{ш1}} = 0,014$ МОм/м; $R_{0\text{ш1}} = 0,037$ МОм/м; $X_{0\text{ш1}} = 0,042$ МОм/м.

Кабельные линии:

КБ1: АВВГ-3х185+1х70; $l_2 = 50$ м; $R_1 = 0,208$ МОм/м; $X_1 = 0,063$ МОм/м; $R_0 = 0,989$ МОм/м; $X_0 = 0,244$ МОм/м;

КБ2: АВВГ-3х35+1х16; $l_3 = 20$ м; $R_1 = 1,1$ МОм/м; $X_1 = 0,068$ МОм/м; $R_0 = 2,63$ МОм/м; $X_0 = 0,647$ МОм/м.

Болтовые контактные соединения: $R_{\text{к}} = 0,003$ МОм; $n = 10$.

11.2. Значения параметров схемы замещения прямой последовательности: сопротивление системы ($X_{\text{с}}$), рассчитанное по формуле (1), составляет

$$X_{\text{с}} = \frac{(400)^2}{150} 10^{-3} = 1,066 \text{ МОм};$$

активное и индуктивное сопротивления трансформатора ($R_{\text{т}}$) и ($X_{\text{т}}$), рассчитанные по Рисунок 10 формулам (4) и (5), составляют

$$R_{\text{т}} = \frac{11,2 \cdot 0,4^2}{(1000)^2} 10^6 = 1,79 \text{ МОм};$$

Электромагнитные переходные процессы

$$X_T = \sqrt{8^2 - \left(\frac{100 \cdot 11,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} 10^4 = 12,67 \text{ мОм};$$

активное и индуктивное сопротивления шинпровода:
 $R_{1ш1} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ мОм}; X_{1ш1} = 0,014 \cdot 15 = 0,21 \text{ мОм};$

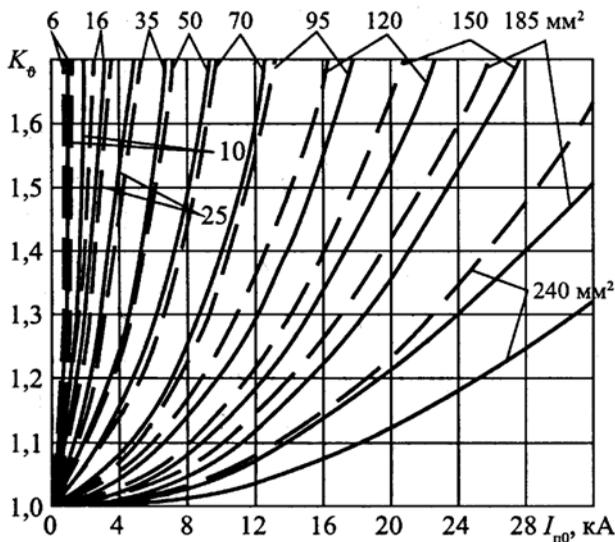


Рисунок 11 - Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с медными жилами от тока дугового устойчивого КЗ с учетом теплоотдачи при продолжительностях КЗ 0,2 с (сплошные кривые) и 0,6 с (пунктирные кривые)

активное сопротивление болтовых контактных соединений:
 $R_k = 0,003 \cdot 10 = 0,03 \text{ мОм};$

активное и индуктивное сопротивления кабельных линий:
 КБ1: $R_{1кб1} = 0,208 \cdot 50 = 10,4 \text{ мОм}; X_{1кб1} = 0,063 \cdot 50 = 3,15 \text{ мОм};$
 КБ2: $R_{1кб2} = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ мОм}; X_{1кб2} = 0,068 \cdot 20 = 1,36 \text{ мОм}.$

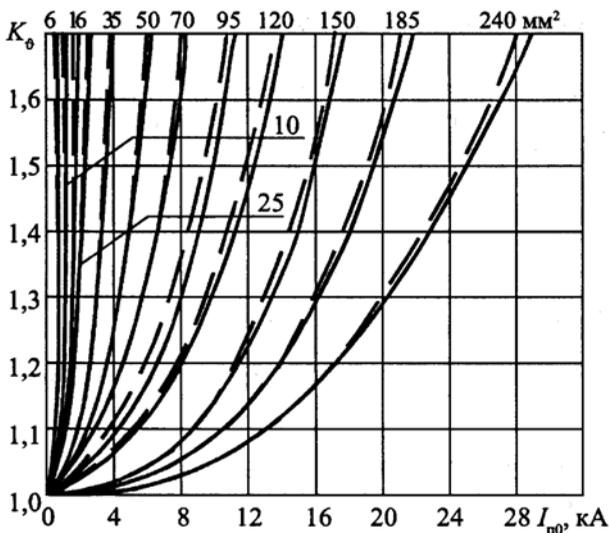


Рисунок 12 - Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с медными жилами при дуговом КЗ с учетом теплоотдачи при продолжительностях КЗ 0,2 с (сплошные кривые) и 0,6 с (пунктирные кривые)

Значения параметров схемы замещения нулевой последовательности:

$$R_{0T} = 154 \text{ МОм}; \quad X_{0T} = 59 \text{ МОм};$$

$$R_{0ш1} = 0,037 \cdot 15 = 0,555 \text{ МОм}; \quad X_{0ш1} = 0,042 \cdot 15 = 0,63 \text{ МОм};$$

$$R_{0кб1} = 0,989 \cdot 50 = 49,45 \text{ МОм}; \quad X_{0кб1} = 0,244 \cdot 50 = 12,2 \text{ МОм};$$

$$R_{0кб2} = 2,63 \cdot 20 = 52,6 \text{ МОм}; \quad X_{0кб2} = 0,647 \cdot 20 = 12,94 \text{ МОм}.$$

Суммарные сопротивления относительно точки КЗ $K1$:

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{1ш1} + R_{1кб1} + R_{1кб2} + R_{кв1} + R_{кв2} + R_{кв3} + R_K = 1,79 + 0,45 + 10,4 + 22 + 0,25 + 0,65 + \quad + 2,15 + 0,03 = 37,72 \text{ МОм};$$

$$X_{1\Sigma} = X_T + X_{1ш1} + X_{1кб1} + X_{1кб2} + X_{кв1} + X_{кв2} + X_{кв3} = 12,67 + 0,21 + 3,15 + 1,36 + 0,1 + 0,17 + \quad + 1,2 = 18,86 \text{ МОм}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока при металлическом КЗ:

$$I_{п0 \max}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{37,72^2 + 18,86^2}} = 5,48 \text{ кА.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока дугового КЗ определяется с учетом сопротивления дуги.

Активное сопротивление дуги в начальный момент КЗ, определяемое по формуле (37), составляет:

$$R_{\text{д}} = \sqrt{\frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{3I_{\text{поКс}}^2} - X_{1\Sigma}^2} - R_{1\Sigma} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 5,48^2 \cdot 0,78^2} - 18,86^2} - 37,72 = 12,9 \text{ МОм,}$$

где коэффициент $K_{\text{с}}$ в соответствии с формулой (38) составляет:

$$K_{\text{с}} = 0,6 - 0,0025 \cdot 42,17 + 0,114 \sqrt{42,17} - 0,13^3 \sqrt{42,17} = 0,78.$$

Среднее (вероятное) начальное значение тока дугового КЗ составляет:

$$I_{п0 \text{д}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(37,72 + 12,9)^2 + 18,86^2}} = 4,28 \text{ кА.}$$

Максимальный и минимальный токи $I_{п0 \text{д}}^{(3)}$ определяются с учетом соответствующих значений коэффициента $K_{\text{с}}$ (см. формулы (41) и (42)):

$$I_{п0 \text{д} \max}^{(3)} = 0,896 \cdot 5,48 = 4,9 \text{ кА;}$$

$$I_{п0 \text{д} \min}^{(3)} = 0,64 \cdot 5,48 = 3,5 \text{ кА}$$

Коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля КБ1 при металлическом КЗ без учета теплоотдачи составляет:

$$K_{\vartheta_{\text{кб1а}}} = \frac{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{к.кб1а}}}{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{н.кб1}}} = \frac{236 + 26}{236 + 20} = 1,024,$$

где $\vartheta_{\text{к.кб1а}}$ - конечная температура при адиабатическом нагреве.

$$\vartheta_{\text{к.кб1а}} = (\vartheta_{\text{н}} + \beta) \exp \left[\frac{I_{п0}^2 \cdot t}{K^2 S^2 \varepsilon^2} \right] - \beta = (20 + 228) \exp \left[\frac{5,48^2 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{148^2 \cdot 185^2 \cdot 1,016^2} \right] - 228 = 26^\circ \text{C}$$

Она составляет

где

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \sqrt{\frac{t}{S} + F^2 \cdot B \left(\frac{t}{S}\right)}} = \sqrt{1 + 0,7 \cdot 0,574 \sqrt{\frac{0,6}{185} + 0,7^2 \cdot 0,165 \left(\frac{0,6}{185}\right)}} = 1,016$$

Конечная температура жил кабельной линии КБ1 с учетом теплоотдачи:

$$\vartheta_{к.кб1} = \vartheta_{н.кб1} + (\vartheta_{к.кб1} - \vartheta_{н.кб1}) \cdot \eta = 20 + (26 - 20) \cdot 0,968 = 25,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где коэффициент η найден по кривым рис. 5.22 [1].

Коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля КБ1 с учетом теплоотдачи $K_{\vartheta_{кб1}} = 1,022$.

Соответственно для кабеля КБ2

$$\vartheta_{к.кб2а} = (20 + 228) \exp\left[\frac{5,48^2 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{148^2 \cdot 35^2 \cdot 1,0375^2}\right] - 228 = 234,8^\circ \text{C}$$

$$\vartheta_{к.кб2} = 20 + (234,8 - 20) \cdot 0,92 = 217,6 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ и } K_{\vartheta_{кб2}} = 1,77.$$

Поэтому значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ к моменту отключения КЗ с учетом нагрева кабелей

$$I_{пт}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(10,4 \cdot 1,022 + 22 \cdot 1,77 + 5,32)^2}} = 3,98 \text{ кА.}$$

Сопротивление электрической дуги к моменту отключения КЗ составляет:

$$R_{дт} = \sqrt{\frac{U_{ср.НН}^2}{3I_{пт}^2 \cdot K_{ct}^2} - X_{1\Sigma}^2} - R_{1\Sigma t} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 3,98^2 \cdot 0,74^2} - 18,86^2} - 54,9 = 21,2$$

МОм,

где $K_{ct} = 0,55 - 0,002 \cdot 58 + 0,1\sqrt{58} - 0,12\sqrt[3]{58} = 0,74$, так как

$$Z_{кт} = \sqrt{(10,4 \cdot 1,022 + 22 \cdot 1,77 + 5,32)^2 + 18,86^2} = 58$$

МОм.

Среднее значение периодической составляющей тока КЗ к моменту отключения с учетом влияния нагрева и электрической дуги равно:

$$I_{пт\text{cp}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(10,4 \cdot 1,01 + 22 \cdot 1,7 + 21,2 + 5,32)^2 + 18,86^2}} = 3,0 \text{ кА.}$$

Значения $K_{\vartheta_{кб1}}$ и $K_{\vartheta_{кб2}}$ определены с учетом влияния теплоотдачи и активного сопротивления дуги по кривым рис. 8 для $t_{откл} = 0,6$ с.

Максимальное и минимальное вероятные значения тока $I_{птд}^{(3)}$ определены с учетом коэффициента K_{ct} (см. формулы (43) и (44)):

$$I_{птдmax}^{(3)} = 3,98 \cdot 0,81 = 3,22 \text{ кА};$$

$$I_{птдmin}^{(3)} = 3,98 \cdot 0,65 = 2,59 \text{ кА}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.:Энергия, 1970, с. 519.
3. Дроздов А. Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Новочеркасск: НПИ. 1976, с. 79.
4. Дроздов А. Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты. Новочеркасск: НПИ, 1977, с. 75.