



Кафедра электроснабжения ЮЗГУ



Программа повышения квалификации

**«ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ»**

«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХОЗЯЙСТВОМ ПРЕДПРИЯТИЙ  
И ОРГАНИЗАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ  
ТРАНСФОРМАЦИИ»

**Курск 2019**

# ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Коротким замыканием называется соединение между двумя точками сети с разными потенциалами, не предусмотренное нормальными условиями работы установки.

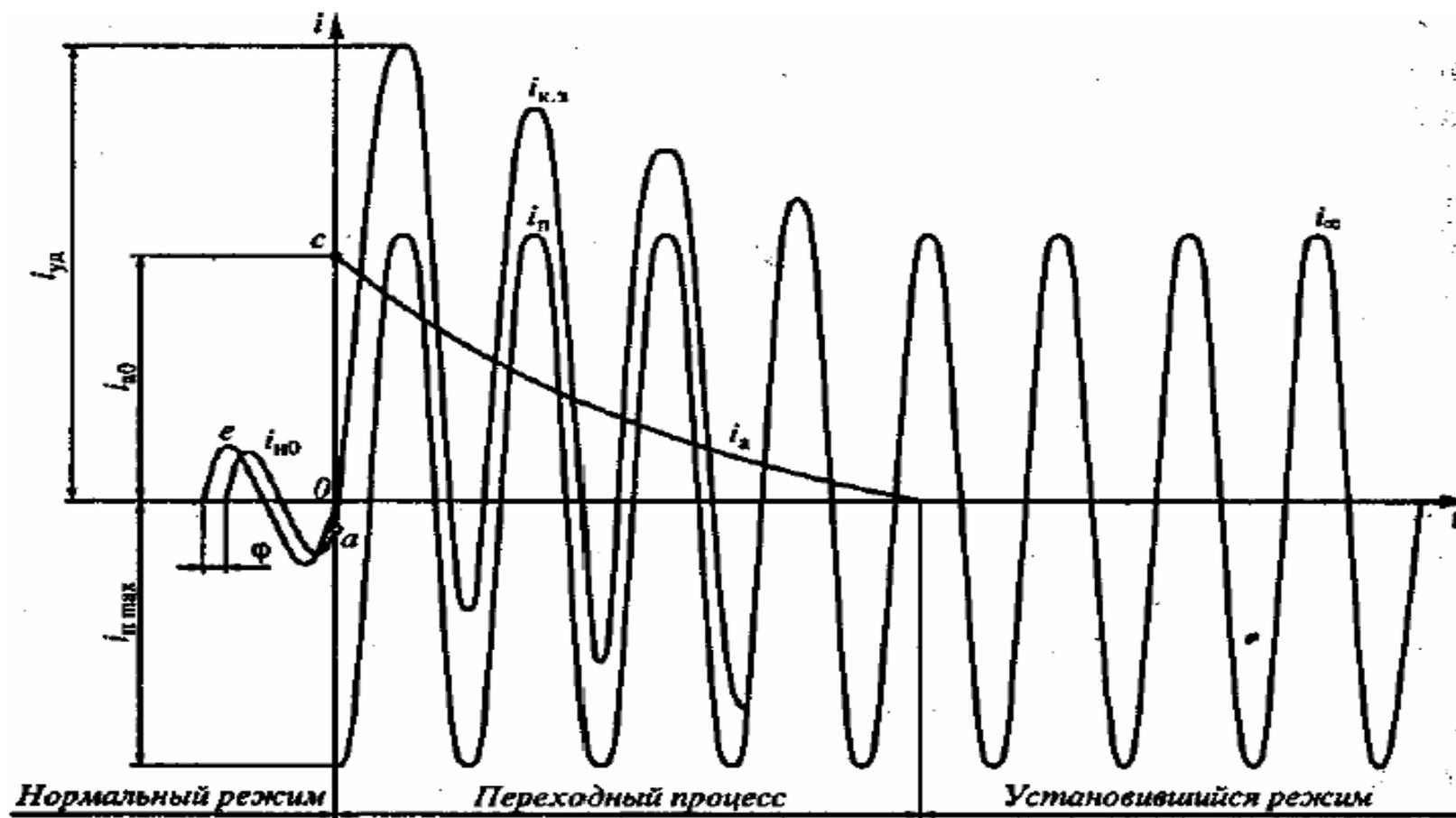
Полный ток короткого замыкания представляет собой сумму двух составляющих: вынужденной, имеющей периодический характер и свободной, имеющей аperiodический характер

$$i_{n.t} = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{n.m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

$$i_{a.t} = i_{a.0} e^{-\frac{t}{T_a}} .$$

Максимальное мгновенное значение полного тока обычно наступает через 0,01 с после начала процесса КЗ.

Этот ток называют ударным током  $i_y$



# Основные соотношения между токами КЗ

Рассмотрим связь между ударным током  $i_y$  и начальным действующим значением периодической слагающей тока к.з.  $I_{n0}$

1. Аперриодическая слагающая затухает по закону экспонентной кривой, определяемой уравнением

$$i_a = I_{amax} e^{-t/T_a},$$

где  $I_{amax}$  — амплитудное (максимальное) значение аперриодической составляющей;  $T_a$  — постоянная времени затухания аперриодической составляющей, определяемая соотношением между индуктивностью  $L_k$  и активным сопротивлением  $r_k$  цепи до точки КЗ:

$$T_a = L_K / r_K .$$

Учитывая, что  $\omega = 2\pi f_{\text{НОМ}} = 2\pi f_K$ ,

Величина индуктивного сопротивления  $x_K = \omega L_K = 314L_K$ ,  
откуда  $L_K = x_K / 314$ , получим  $T_a = L_K / r_K = x_K / (314 r_K)$ .

Здесь  $r_K$ ,  $x_K$  — соответственно активное и индуктивное сопротивление цепи КЗ.

2. Ударный ток (соответствует времени 0,01с) через полпериода с момента возникновения КЗ

$$i_y = i_a + I_{n.\text{max}}$$

где  $I_{n.\text{max}} = \sqrt{2} I_{n.o}$

— максимальные значения периодической составляющей.

$$i_y = I_{a.\text{max}} \cdot e^{-t/T_a} + I_{n.\text{max}} \cdot$$

В момент  $t = 0$   $I_{n.\max} = I_{a.\max}$ , тогда

$$i_y = I_{n.\max} + I_{n.\max} \cdot e^{-t/T_a}$$
$$= I_{n.\max} (1 + e^{-t/T_a}) = \sqrt{2} I_{n0} (1 + e^{-t/T_a}).$$

Обозначив  $1 + e^{-t/T_a} = K_y$ ,

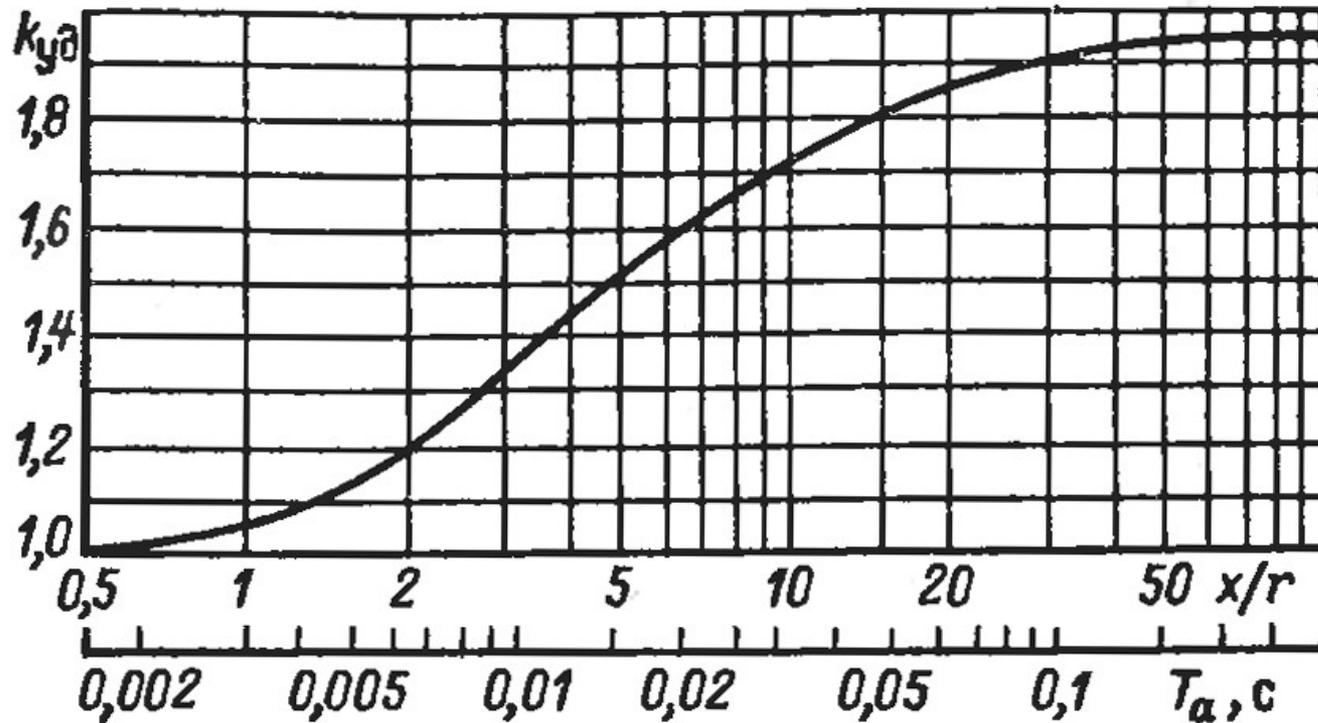
получим 
$$i_y = K_y \sqrt{2} I_{n.0}$$

Следовательно, ударным коэффициентом  $k_y$  учитывается (через  $T_a$ ) соотношение между активным и индуктивным сопротивлениями цепи КЗ, т. е. расстояние точки КЗ от ИП (генератора).

$$i_y = I_{n.0} + I_{n.0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{n.0} (1 + e^{-\frac{t}{T_a}});$$

$$i_y = k_y I_{n.0};$$

где  $k_y$  – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени цепи КЗ.



$$k_y = (1 + e^{-\frac{t}{T_a}}),$$

**При расчете токов КЗ в  
электроустановках предприятий  
принимаются следующие допущения:**

- электродвижущие силы источников питания считают неизменными;
- трехфазную систему считают симметричной;
- не учитывают насыщение магнитных систем, что позволяет считать все цепи линейными;
- пренебрегают емкостными проводимостями всех элементов короткозамкнутой цепи;
- не учитывают влияние неподвижной нагрузки на токи КЗ;
- не учитывают подпитку места КЗ со стороны электродвигателей напряжением до 1 кВ;

# Порядок расчета

- для рассматриваемой системы электроснабжения составляется расчетная схема;
- по расчетной схеме составляется схема замещения;
- схема замещения путем преобразования приводится к наиболее простому виду, так чтобы источник питания был связан с точкой КЗ одним результирующим сопротивлением;
- по закону Ома определяют ток короткого замыкания, начальное значение периодической и апериодической составляющих тока КЗ и значение ударного тока КЗ.

## Порядок расчета

- если активное сопротивление цепи КЗ меньше одной трети индуктивного сопротивления ( $r < x/3$ ), то им можно пренебрегать.

- генераторы, трансформаторы большой мощности, воздушные линии, реакторы представляют в схеме замещения их индуктивными сопротивлениями, так как активные сопротивления во много раз меньше индуктивных. Кабельные линии 6-10 кВ, трансформаторы мощностью 630 кВА и менее в схеме замещения представляются индуктивными и активными сопротивлениями.

# Расчет токов короткого замыкания

Расчет ведется в относительных единицах. Для расчета сопротивлений выбирают базовые величины:  $U_B$  и  $S_B$ . За базовое напряжение принимают среднее номинальное напряжение той ступени, где производится расчет ТКЗ.

Шкала  $U_{CP}$ : 230; 115; 37; 10,5; 6,3; 0,69; 0,4 кВ.

За базовую мощность можно принимать любое значение, но для удобства расчетов следует принимать 100 кВА; 1000 кВА и т.д.

Исходные данные элементов схемы –  $x''_d$ ,  $U_K$  %;  $P_{KЗ}$ ;  $x_0$ ;  $r_0$  определяют по справочной литературе.

# Основные расчетные формулы

Базисные сопротивления в относительных единицах определяются по следующим формулам:

***- сопротивления воздушных и кабельных линий***

$$r_{\sigma^*} = r_{y\sigma} l \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2} \quad x_{\sigma^*} = x_{y\sigma} l \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2}$$

Где  $x_{y\sigma}$   $r_{y\sigma}$  – удельное активное и индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км;  $l$  – длина линии, км;

**- индуктивное сопротивление трансформатора**

$$x_{\sigma^*} = \frac{U_k}{100} \frac{S_{\sigma}}{S_{н.тр}}$$

**- индуктивное сопротивление реактора**

$$x_{\sigma^*} = \frac{x_p}{100} \cdot \frac{I_{\sigma} \cdot U_H}{I_H \cdot U_{\sigma}}$$

$x_p$  – сопротивление реактора, %;

$$x_p = \frac{X_p \% U_p}{100 \sqrt{3} I_p}$$

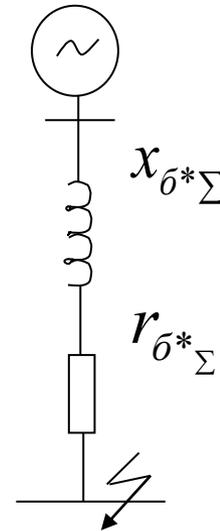
Действующее значение установившегося тока КЗ:

$$I_{\text{по}} = I_{\infty} = I_{\text{пт}} = \frac{I_{\text{б}}}{Z_{\text{б}^*\Sigma}} \quad , \text{ кА}$$

– полное сопротивление от источника питания до точки КЗ, выраженное в относительных единицах и приведенное к базисной мощности:

$$Z_{\text{б}^*\Sigma} = \sqrt{r_{\text{б}^*\Sigma}^2 + x_{\text{б}^*\Sigma}^2}$$

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}}$$



По величине  $I_{\text{по}} = I_{\infty} = I_{\text{пт}}$  проверяют электрические аппараты и токоведущие части на термическую устойчивость.

Ударный ток через полпериода с момента возникновения КЗ

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{н.о}$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ в течение первого периода КЗ:

$$I_y = \sqrt{I_{но}^2 + I_{ат}^2}$$

$$I_y = \sqrt{I_{но}^2 + [\sqrt{2} I_{но} (k_y - 1)]^2} = I_{но} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = I_{но} q,$$

По величине  $I_y$

$$q = \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

проверяются аппараты на динамическую устойчивость (в течение первого периода КЗ).

$q$  зависит от места КЗ (справочная величина)

Если синхронные ЭД подключены к точке КЗ кабельными линиями длиной не более 300 м, начальное значение периодической составляющей тока КЗ  $I_{п.о}$  без учета внешнего сопротивления

$$I_{с.д} = I_{п.о} = E_0'' I_{н.д} / x_d'',$$

с учетом внешнего сопротивления

$$I_{с.д} = \frac{E_0'' I_{н.д}}{\sqrt{(x_d'' + X_{вн*})^2 + r_{вн*}^2}},$$

–  $E_0''$  сверхпереходная ЭДС в начальный момент КЗ, отн. ед.;  $I_{н.д}$  – номинальный ток двигателя;  $X_{вн*}$ ,  $r_{вн*}$  – индуктивная и активная составляющие внешнего сопротивления.

–  $x_d''$  сверхпереходное реактивное сопротивление двигателя по продольной оси, отн. ед.;

Значение сверхпередающей ЭДС  $E_0'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + x_d'')^2}$ ,

где  $\cos \varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности в режиме перевозбуждения.

Влияние асинхронных ЭД учитывается, как правило, только в ударном токе КЗ. При этом максимальное значение тока КЗ от этих ЭД при трехфазном КЗ на их выводах определяется по выражению

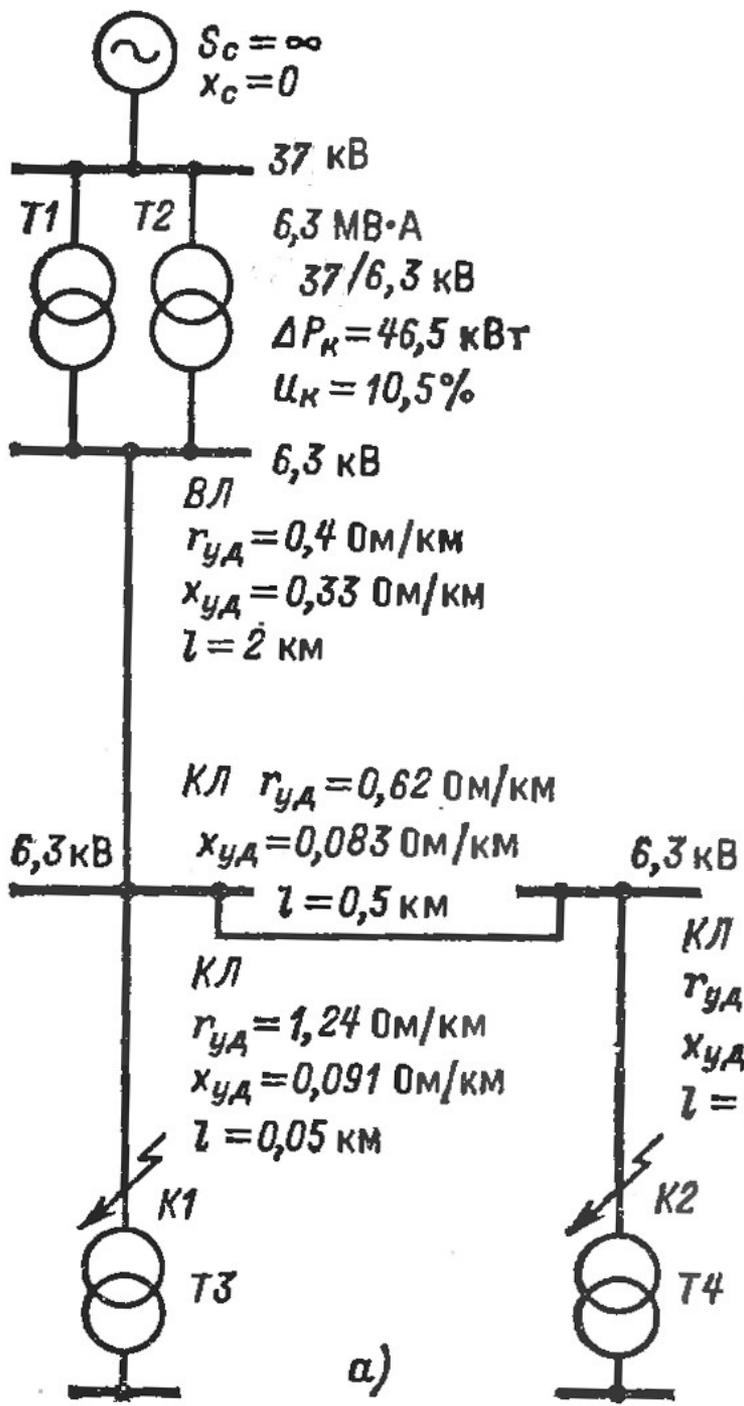
$$i_{\text{м}} = \sqrt{2} \frac{0,9}{x_{\text{д}}''} I_{\text{н.д}},$$

$x_{\text{д}}''$  — относительное сверхпереходное индуктивное сопротивление АД;  $I_{\text{н.д}}$  — номинальный ток АД.

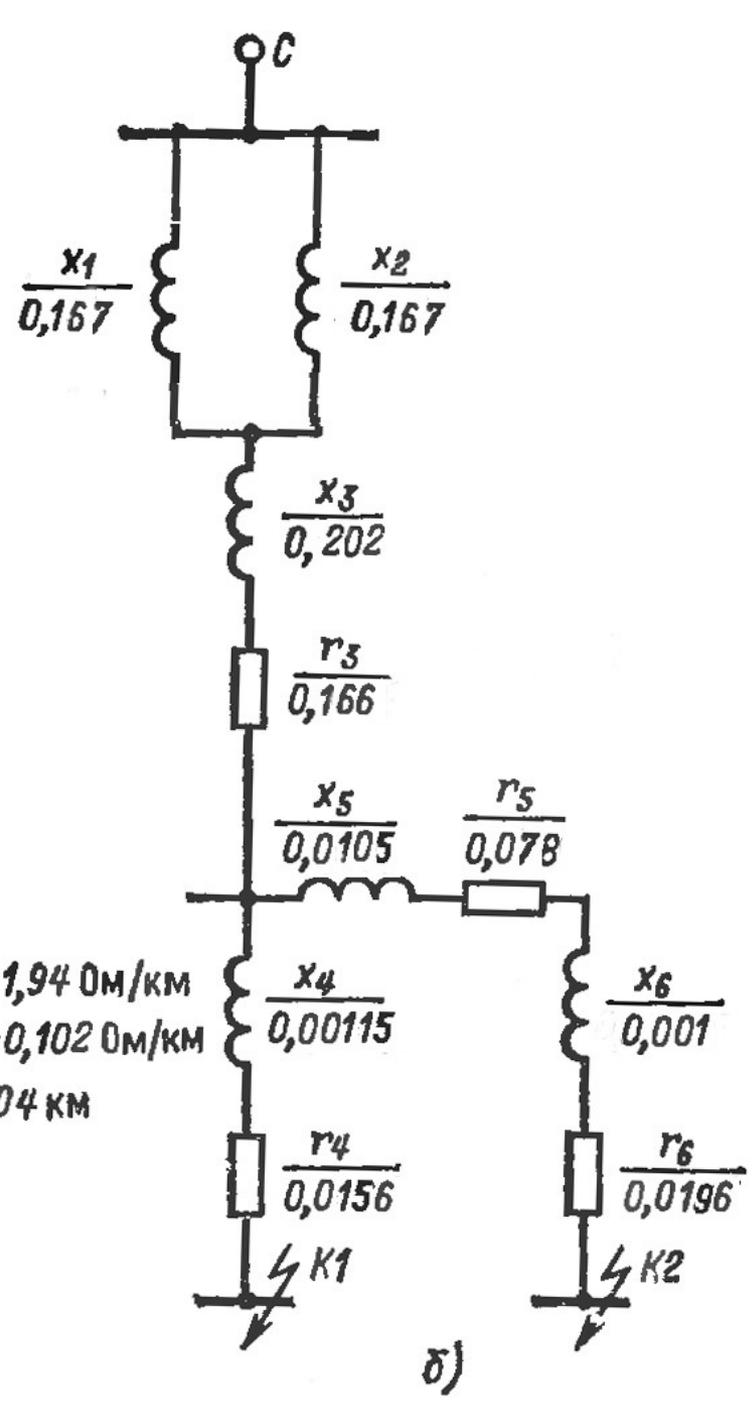
Если отсутствуют справочные данные по  $x_{\text{д}}''$  на АД, то

$$x_{\text{д}}'' = 1/K_{\text{пуск}} \cong 0,2,$$

где  $K_{\text{пуск}}$  — средняя кратность пускового тока двигателя



а)



б)

# РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1000 В

## Цель и особенности расчетов

Расчет выполняется с целью выбора коммутационной аппаратуры, шинопроводов, кабелей и другого электрооборудования, а также для проверки чувствительности защит.

*Особенности расчета токов КЗ в сетях до 1000 В:*

- учитываются активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи до точки короткого замыкания: активные и индуктивные сопротивления проводов, кабелей и шин; токовых катушек расцепителей автоматических выключателей; первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока; переходных контактов аппаратов;

- при питании от энергосистемы не учитывается затухание периодической составляющей тока КЗ ввиду большой удаленности генераторов;
- при расчете принимается, что величина напряжения на первичной обмотке цехового трансформатора неизменна при условии  $S_{сист} \geq 50 S_{ном.т}$
- расчет параметров цепи и токов КЗ в установках напряжением до 1 кВ ведется в именованных единицах, сопротивления принимаются в мОм, напряжение – в В, мощность – в кВА. Значение тока получают в кА

В зависимости от цели расчета учитывают разные расчетные режимы работы электрической схемы.

При выборе аппаратуры расчетным считается максимальный режим, так как токи КЗ имеют наибольшие значения. Этот же режим принимается и при расчетах токов пуска и самозапуска электродвигателей с целью обеспечения несрабатывания защит в сети.

При проверке чувствительности защит расчетным является минимальный режим, при котором токи КЗ имеют наименьшие значения. Этот же режим используют для проверки возможности пуска и самозапуска электродвигателей.

## **Сопротивления элементов схемы замещения**

Расчет токов КЗ в установках до 1 кВ проводится аналогично расчету токов КЗ в установках выше 1 кВ. Для расчетов токов короткого замыкания составляют схему замещения, в которую входят все сопротивления цепи до точки КЗ.

Расчет сопротивлений отдельных элементов выполняется по приведенным ниже соотношениям.  
*Питающая энергосистема.*

Активное и индуктивное сопротивления питающей энергосистемы до зажимов высокого напряжения ВН понижающего трансформатора находят по току КЗ на стороне ВН и приводят к стороне низшего напряжения:

$$x_{c.HH} = x_{c.BH} \left( \frac{U_{\text{ном. тр. HH}}}{U_{\text{ном. тр. BH}}} \right)^2; \quad r_{c.HH} = r_{c.BH} \left( \frac{U_{\text{ном. тр. HH}}}{U_{\text{ном. тр. BH}}} \right)^2,$$

Где  $x_{c.BH}$  и  $r_{c.BH}$  – индуктивное и активное сопротивления энергосистемы, соответственно, приведенные к стороне ВН;

$x_{c.BH}$  и  $r_{c.BH}$  – то же, приведенные к стороне НН понижающего трансформатора;

$U_{\text{ном. тр. HH}}$  и  $U_{\text{ном. тр. BH}}$  – номинальные напряжения обмоток НН и ВН понижающего трансформатора.

Допускается при расчетах токов КЗ не учитывать активное сопротивление энергосистемы, а индуктивное – принимать равным полному сопротивлению энергосистемы, определяя его значение по известному току  $I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}$  или мощности  $S_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}$

трехфазного КЗ на зажимах ВН понижающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ:

$$x_{c.BH} \approx \frac{U_{c.BH}}{\sqrt{3} I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}} = \frac{U_{c.BH}^2}{S_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}},$$

## Трансформаторы.

Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ.тр}}},$$

где  $u_{\text{КЗ}}$  – напряжение короткого замыкания, %;

$U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение трансформатора;

$S_{\text{НОМ.тр}}$  – номинальная мощность трансформатора.

Активное сопротивление определяется по потерям КЗ в трансформаторе:

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ.тр}}^2},$$

где  $\Delta P_{\text{КЗ}}$  – потери короткого замыкания.

В вышеизложенных соотношениях в качестве  $U_{ном}$  может быть использовано номинальное напряжение любой обмотки трансформатора. Сопротивление трансформатора будет приведено к тому напряжению, которое подставляется в формулы.

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению:

$$x_{тр} = \sqrt{z_{тр}^2 - r_{тр}^2} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном.тр}} \sqrt{\left(\frac{u_{кз}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{кз}}{S_{ном.тр}}\right)^2}.$$

# Параметры трансформаторов, широко применяемых в сетях 6(10)/0,4 кВ

Активные и индуктивные сопротивления, мОм,  
трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	$u_{кз}, \%$	$x_{1тр} = x_{2тр}$	$x_{0тр}$	$r_{1тр} = r_{2тр}$	$r_{0тр}$	$z_{тр}^{(1)} / 3$
Соединение обмоток Y/Y <sub>0</sub>						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27
1000	8	12,6	72,8	2,0	19,1	33,6
1600	5,5	4,9	37,8	1,3	11,9	16,6
Соединение обмоток Δ/Y <sub>0</sub>						
100	4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	27	27	10,7	10,7	30
400	4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1000	8	12,65	12,65	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

## Воздушные и кабельные линии

Активное и индуктивное сопротивления кабельных и воздушных линий электропередачи определяется по соотношениям:

$$X_{\text{кл,вл}} = x_0 \cdot l; \quad R_{\text{кл,вл}} = r_0 \cdot l$$

где  $x_0$  и  $r_0$  – индуктивное и активное погонное сопротивление проводников, соответственно;  $l$  – длина проводников.

Погонное индуктивное сопротивление воздушных линий электропередачи с проводами из цветных металлов зависит от среднего геометрического расстояния между проводами. Его значение приводится в справочной литературе.

## Реакторы

Реактор напряжением 0,4 кВ типа РТТ-0,38-50-0,14 имеет номинальные параметры: напряжение 380 В, ток 50 А, индуктивное сопротивление при частоте 50 Гц составляет 140 мОм, активное – для исполнения УЗ (алюминиевая обмотка) 17 мОм, для исполнения ТЗ (медная обмотка) 16 мОм.

Токоограничивающие реакторы устанавливаются в линиях 6(10) кВ или в цепи трансформатора для ограничения токов КЗ до таких значений, которые позволили бы применить сравнительно легкую аппаратуру (выключатели, разъединители) и не завышать сечение кабелей в сети электроснабжения.

Сопротивление реактора (Ом) определяется, по соотношениям:

$$x_p = \omega L = 314L ;$$

$$x_p = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}}} ,$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение реактора;

$I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток реактора;

$u_{\text{КЗ}}$  – напряжение короткого замыкания, %.

Активное сопротивление реакторов 6(10) кВ мало и в расчетах не учитывается.

**Ориентировочные значения активных переходных сопротивлений контактов  $R_K$  аппаратов, мОм**

Номинальный ток аппарата, А	50	100	200	400	600	1000	1600
Автомат	1,3	0,75	0,6	0,4	0,25	—	—
Рубильник	—	0,5	0,4	0,2	0,15	0,08	—
Разъединитель	—	—	—	0,2	0,15	0,08	0,02

**Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока (класса точности 1)**

Коэффициент трансформации ТТ	100/5	150/5	200/5	300/5	400/5	500/5
$X_{ТТ}$ , мОм	2,7	1,2	0,67	0,3	0,17	0,07
$R_{ТТ}$ , мОм	1,7	0,75	0,42	0,2	0,17	0,05

Действующее значение периодической слагающей тока трехфазного КЗ без учета влияния непосредственно присоединенных асинхронных двигателей:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}}$$

где  $U_{\text{ср.н}}$  – среднее номинальное линейное напряжение сети (для сетей 0,38 кВ равно 400 В),

$r_{\Sigma}$  и  $x_{\Sigma}$  – результирующее активное и индуктивное сопротивления (прямой последовательности) цепи короткого замыкания;

$z_{\Sigma}$  – результирующее полное сопротивление цепи короткого замыкания.

# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

К аномальным режимам относятся *короткие замыкания*, а также длительные по времени *токи перегрузки*, периодически возникающие в процессе эксплуатации электроустановок.

Короткие замыкания могут привести к пожару или даже взрыву.

Длительные перегрузки ведут к старению изоляции и снижению ее изоляционных свойств.

**От токов коротких замыканий** необходимо защищать сети **всех назначений** и видов прокладок.

**Согласно ПУЭ защита от перегрузки обязательна для следующих сетей:**

- 1) выполненные открыто проложенными проводниками с горючей оболочкой или изоляцией;
- 2) осветительные сети в служебно-бытовых помещениях, включая сети для бытовых и переносных электроприемников, а также в пожароопасных зонах;
- 3) силовые сети в тех случаях, когда по условиям технологического процесса или по режиму работы сети может возникнуть длительная перегрузка проводников;
- 4) сети всех видов во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia, В-II и В-III а.

Автоматические выключатели должны устанавливаться в случаях:

- 1) необходимости автоматизации управления;
- 2) необходимости обеспечения более быстрого по сравнению с предохранителями восстановления питания;
- 3) частых аварийных отключений (испытательные, лабораторные и т.п. установки).

В остальных случаях рекомендуется применять предохранители.

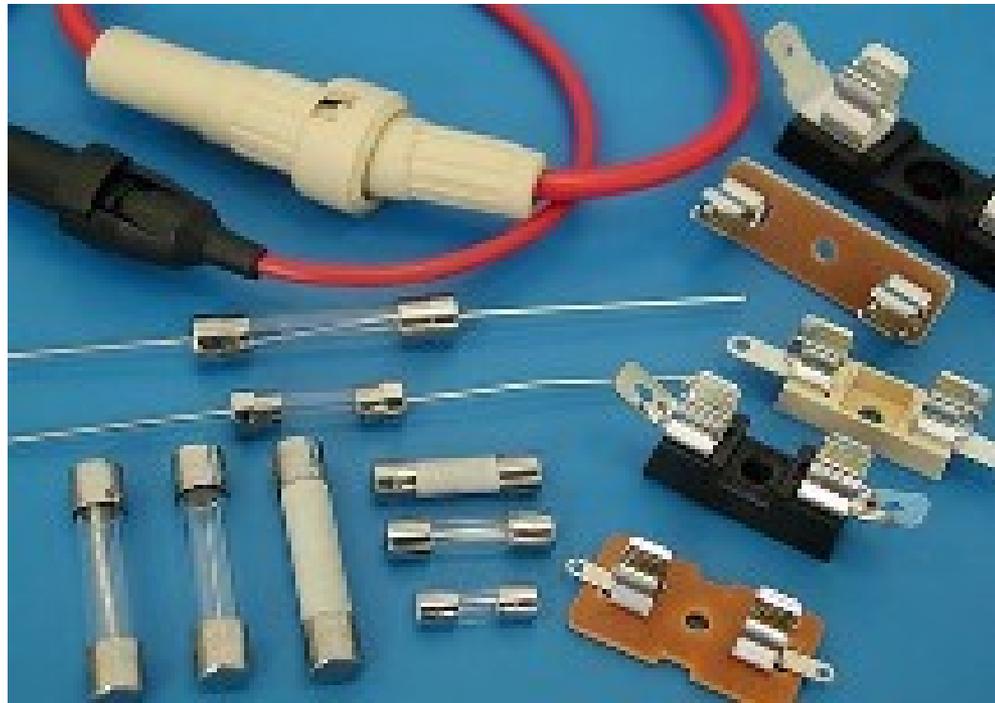
# Предохранители

Предохранитель состоит из корпуса, в котором находится металлическая пластинка или нить, являющаяся искусственным ослабленным звеном в цепи тока. Они являются простейшими аппаратами токовой защиты, действие которых основано на перегорании плавкой вставки.

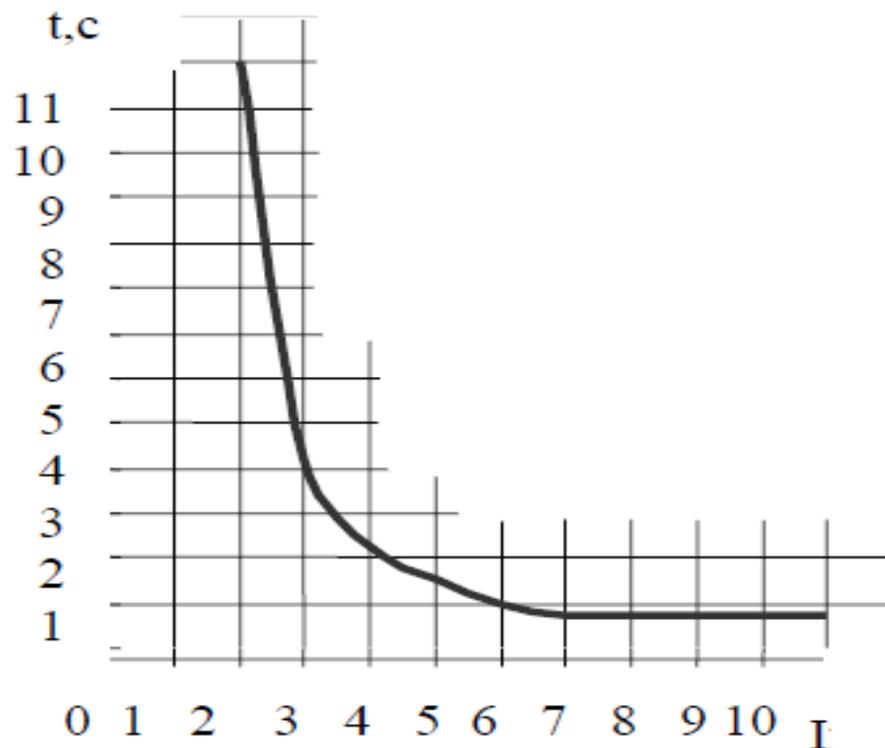


Предохранитель включают последовательно в фазу защищаемой цепи.

Наименьший ток, при котором плавкая вставка предохранителя еще не перегорает при длительной работе, называется током неплавления  $I_{\text{нп}}$ . Этот ток по значению должен быть возможно ближе к номинальному току  $I_{\text{ном.вст}}$ , на который маркируется плавкая вставка. Отношение  $I_{\text{нп}}/I_{\text{ном.вст}}$  должно быть несколько больше единицы.



Зависимость времени перегорания плавкой вставки (времени срабатывания предохранителя) от тока цепи называется защитной или время-токовой характеристикой предохранителя. Она имеет крутопадающий характер.



Ток, превышающий нормальный, нагревает плавкую вставку, вызывая ее расплавление. Чем больше ток, тем быстрее повышается температура вставки и тем меньше требуется времени, чтобы вставка расплавилась.

Номинальным током плавкой вставки называют ток, который может длительно проходить через нее, не вызывая расплавления металла плавкой вставки или сильного нагрева. Время перегорания плавкой вставки при заданных значениях тока определяется по защитным характеристикам.

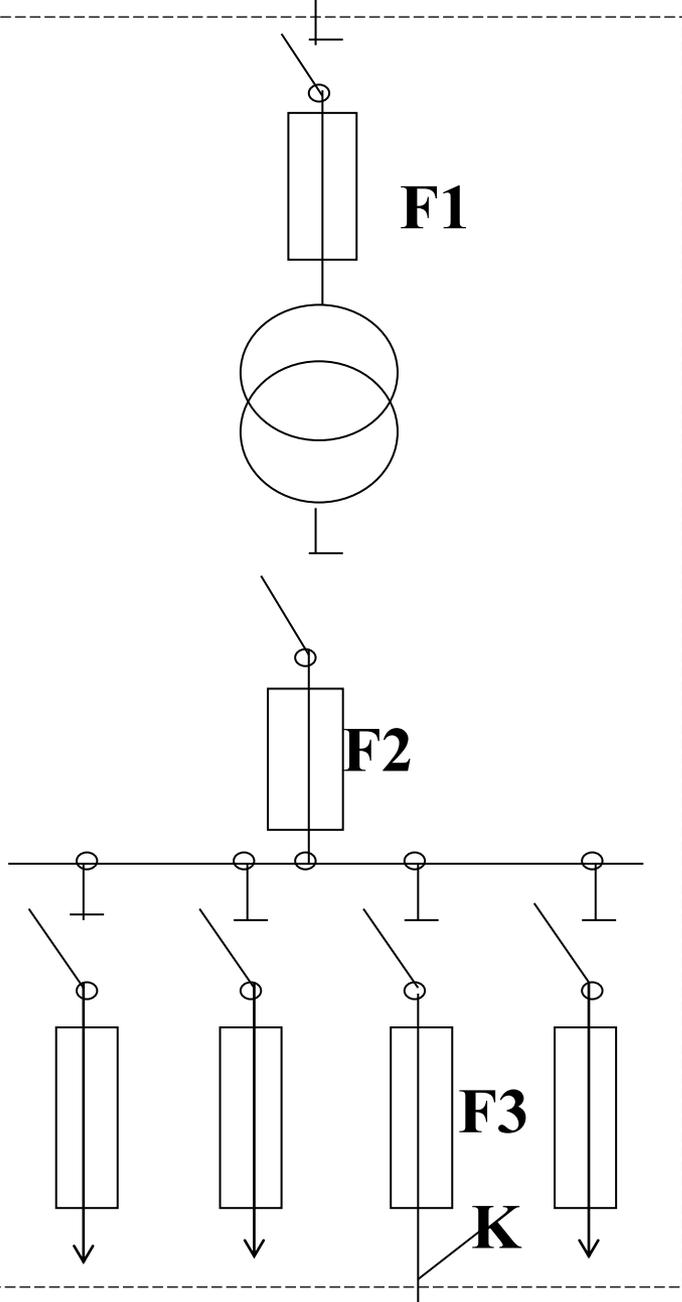
Предохранители обладают по сравнению с другими аппаратами защиты (автоматическими выключателями) рядом преимуществ, а именно:

- простота и надежность в эксплуатации,
- большая отключающая способность,
- быстродействие,
- токоограничивающая способность,
- меньшая стоимость.

Плавкие предохранители наряду с простотой их устройства и малой стоимостью имеют ряд **существенных недостатков:**

- невозможность защиты цепи от перегрузки;
- разброс защитных характеристик, вызываемый увеличением контактных сопротивлений в результате ослабления нажатия контактов и старения материала вставки в условиях эксплуатации;
- неточность калибровки номинальных токов вставки при изготовлении;
- при КЗ в трехфазной линии возможно перегорание только одного предохранителя, что особенно опасно для АД с КЗ ротором;
- после срабатывания требуется замена плавкой вставки.

При размещении предохранителей в электрической сети обязательным условием является обеспечение **селективности (избирательности)** их действия. Избирательность (селективность) защиты плавкими предохранителями обеспечивается подбором плавких вставок таким образом, чтобы при возникновении короткого замыкания, например, на ответвлении к электроприемнику, срабатывал ближайший плавкий предохранитель, защищающий этот электроприемник, но не срабатывал предохранитель, защищающий головной участок сети. Это значит, что при КЗ на каком-либо участке сети должна перегореть плавкая вставка только этого участка. Поэтому каждый предохранитель на схеме сети по мере приближения к ИП должен иметь плавкую вставку на одну-две ступени выше, чем предыдущий.



На рис. изображена схема защиты электрической сети предохранителями.

При КЗ в точке К раньше других должна расплавиться плавкая вставка предохранителя F3, имеющая меньший номинальный ток. По условию селективности защитная характеристика ближайшего к ИП предохранителя (F1) должна располагаться над характеристикой более удаленного по схеме предохранителя.

## Защита электродвигателей (ЭД) плавкими предохранителями

Они должны защищать ЭД от токов КЗ, но не должны отключать цепь при пуске ЭД. Эти требования выполняются при соблюдении следующих условий (для плавких вставок с малой тепловой инерцией):

$$I_{нвст} \geq I_{ндв},$$

$$I_{нвст} \geq \frac{I_{пуск\ дв}}{K_n},$$

Для легкого пуска (время разгона не более 10 с)  $K_n = 2,5$ , для *тяжелого* - частые и длительные пуски (время разгона более 10 с)  $K_n = 1,6-2,0$ , для сварочных аппаратов  $K_n = 1,6$ ;  $I_{нвст}$  выбирается по шкале *наибольшим* значением

Если известна пусковая характеристика ЭД  $I_{\text{пуск}} \Delta v = f(t)$  то, нанеся ее на семейство кривых  $I_{\text{н вст}} = f(t)$ , выбирается плавкая вставка с такой характеристикой, все точки которой лежат выше кривой  $I_{\text{пуск}} \Delta v = f(t)$ .

Для проводов и кабелей, питающих группу ЭД от магистрали или силового распределительного шкафа вместо  $I_{\text{пуск}} \Delta v$  подставляют значение пикового тока линии.

Номинальный ток вставки для защиты ответвления, идущего к *сварочному аппарату*, выбирается из соотношения

$$I_{\text{н вст}} \geq 1,2 \cdot I_{\text{н св}} \cdot \sqrt{ПВ},$$

Плавкие вставки для защиты трехфазных конденсаторных установок выбираются из соотношения

$$I_{н вст} \geq \frac{n \cdot Q_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} \geq \frac{Q_{нбк}}{\sqrt{3} \cdot U_n},$$

$$I_{н вст} \leq \frac{1,6 \cdot n \cdot Q_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} \leq \frac{1,6 \cdot Q_{нбк}}{\sqrt{3} \cdot U_n},$$

где  $Q_k$  - номинальная мощность одного конденсатора, кВАр;  $U_n$  - номинальное напряжение сети;  $n$  - общее количество конденсаторов в батарее (во всех фазах), штук.

## **Защита автоматическими выключателями**

Они предназначены для замены рубильников и предохранителей и являются более совершенными аппаратами защиты в сетях напряжением до 1 кВ, так как после отключения они готовы к быстрому повторному включению. Это аппараты многократного действия, снабженные устройствами выдержки времени, обеспечивающие избирательное действие защиты. Все автоматы имеют в каждой фазе максимальное токовое реле прямого действия, называемое расцепителем.

В отличие от предохранителей в АВ не применяется какой-либо специальной среды для гашения дуги. Дуга гасится в воздухе, поэтому АВ называются воздушными.

По числу полюсов АВ бывают одно-двух и трехполюсные, изготавливаются на токи до 6000 А при напряжении переменного тока до 660 В и постоянного до 1 кВ.



Автоматические воздушные выключатели а) однополюсные А63М и АЕ2044; б) двухполюсный ВА61; в) трехполюсный ВА51-35

По времени срабатывания  $t_{ср}$  различают:

- нормальные АВ с  $t_{ср}=0,02-0,1$  с;
- селективные с регулируемой выдержкой времени до 1 с;
- быстродействующие с  $t_{ср} \leq 0,05$  с.

Наименьший ток, вызывающий отключение АВ, называют **током трогания** или **током срабатывания**, а настройку расцепителя АВ на заданный ток срабатывания - *уставкой тока срабатывания*.

АВ имеет следующие основные элементы: контакты с дугогасительной камерой, привод, механизм свободного расцепления, расцепители, вспомогательные контакты. Основными элементами АВ являются *расцепители*, которых может быть один или несколько.

Расцепитель состоит из двух элементов: **нагревательного** на **основе биметаллической пластины**, осуществляющего *защиту от перегрузки* с выдержкой времени, называемого **тепловым**, и **электромагнитного** элемента, осуществляющего максимальную токовую защиту с выдержкой или без выдержки времени - отсечку *при токах КЗ*. Некоторые типы автоматов, например серии ВА-50, АЕ-2000 и др., кроме указанных расцепителей, имеют еще независимые и минимальные. Независимые - для дистанционного отключения автомата. Расцепитель минимального напряжения работает аналогично реле минимального напряжения и отключает выключатель при снижении напряжения в сети (  $U_{сети} \leq 0,7 \cdot U_n$  ).

Автоматические выключатели обеспечивают защиту от перегрузок:

- с помощью тепловых расцепителей, действующих с выдержкой времени, обратно зависимой от тока перегрузки;
- расцепителями с часовым механизмом (с обратно зависимой от тока характеристикой);
- с помощью полупроводниковых расцепителей (с обратно зависимой от тока характеристикой);
- комбинированными расцепителями, обеспечивающими защиту от перегрузок (с обратно зависимой от тока характеристикой) и токов КЗ мгновенного действия и с выдержкой времени, обеспечивающей селективность действия.

## *КЛАССИФИКАЦИЯ АВ*

Автоматические выключатели можно классифицировать по следующим признакам:

- по виду коммутирующего тока – постоянный или переменный;
- по количеству полюсов – 1,2,3 или 4 полюса;
- токоограничивающие и нетокоограничивающие;
- по виду расцепителя;
- неселективные или селективные – без выдержки времени или с выдержкой времени в зоне токов короткого замыкания.

Конструкцией выключателя может предусматриваться наличие или теплового (полупроводникового), или электромагнитного расцепителя, либо наличие теплового и электромагнитного расцепителя одновременно – так называемый комбинированный расцепитель.

С помощью неселективных автоматических выключателей выполнить защиту, селективную с нижестоящими автоматическими выключателями, затруднительно, и они, как правило, применяются для защиты конечного элемента электрической цепи, наиболее удалённого от источника питания.

Для расчёта защиты, выполненной с помощью автоматических выключателей, имеющих комбинированные расцепители, необходимо знать следующие нормированные технические характеристики:

*Номинальное напряжение  $U_n, В.$*  – напряжение переменного или постоянного тока, протекающего через автоматический выключатель, при котором нормируются его технические характеристики;

*Номинальный ток выключателя  $I_n, А.$*  – нормируемое значение тока, протекающего в длительном режиме через автоматический выключатель при нормальных условиях эксплуатации. Определяется его контактами и другими проводящими частями;

*Номинальный ток теплового расцепителя  $I_{н.т}$ , А* – калиброванное значение рабочего тока, при длительном протекании которого не происходит отключения автоматического выключателя. Калиброванные значения номинального рабочего тока теплового расцепителя выбираются из стандартного ряда, но не могут превышать номинального тока выключателя;

Уставка по току срабатывания в зоне токов короткого замыкания (*ток срабатывания отсечки*)  $I_{с.о}$ , А. – такое значение тока, при котором происходит практически мгновенное срабатывание автоматического выключателя с разрывом электрической цепи. Нормируется либо в единицах тока, либо как величина, кратная току теплового расцепителя.

Для автоматических выключателей выполненных в стандартах DIN, уставка по току срабатывания в зоне короткого замыкания стандартизована и определяется как характеристика мгновенного расцепления и имеет обозначение:

характеристика «В» - ток электромагнитного расцепителя лежит в пределах  $3 \dots 5 I_{н.т.}$  ;

характеристика «С» - то же  $5 \dots 10 I_{н.т.}$  ;

характеристика «D» и «K» - то же  $10 \dots 14 I_{н.т.}$  ;

характеристика «L» - то же  $3 \dots 4 I_{н.т.}$  ;

характеристика «U» - то же  $6 \dots 9 I_{н.т.}$  ;

характеристика «Z» - то же  $2,5 \dots 3,5 I_{н.т.}$  ;

В литературе встречаются термины: *кратность тока электромагнитного расцепителя, кратность отсечки, уставка тока электромагнитного расцепителя.*

Время срабатывания в зоне токов короткого замыкания  $t_{c.o}, c.$  определяет время выдержки до разрыва электрической цепи при достижении протекающего через выключатель тока величины, равной или превышающей *уставку тока электромагнитного расцепителя.* Нормируется для селективных выключателей с регулируемой выдержкой времени и равно  $0,1 \div 0,7 c.$  У неселективных нетокоограничивающих выключателей время срабатывания отсечки, как правило, не превышает  $0,1 c.$  и приводится в каталогах.

*Предельная коммутационная способность ПКС, кА* – максимальное значение тока короткого замыкания, которое выключатель способен включить и отключить несколько раз, оставаясь в исправном состоянии. Одноразовый ПКС (ОПКС) называется наибольшее значение тока, которое выключатель может отключить один раз. После этого дальнейшая работа выключателя не гарантируется.

# Выбор автоматических выключателей

Выключатели характеризуются следующими величинами:

- номинальным током автомата  $I_{на}$  ;
- номинальным током расцепителя автомата  $I_{н\ расц}$ , так как в один и тот же автомат могут быть встроены различные по току расцепители, рассчитанные на различные номинальные токи, при этом должно выполняться условие  $I_{на} \geq I_{н\ расц}$ ;
- уставками срабатывания по току и времени при перегрузках ( $I_{перегр}$ ,  $t_{перегр}$ ), и коротких замыканиях ( $I_{кз}$ ,  $I_{мгн}$ ), называемых отсечками, а для селективных автоматов уставками выдержки времени срабатывания при КЗ в сети -  $t_{кз}$

С учетом вышесказанного выбор аппаратов защиты производится по трем условиям на основании технических условий и каталогов на автоматы

Условие 1. Номинальный ток автомата и его расцепителя не должны быть меньше расчетного тока  $I_m$  защищаемой линии или номинального тока электроприемника  $I_n$ . При этом номинальные токи расцепителей автоматических выключателей должны быть минимально возможными.

Условие 2. Для того, чтобы электроприемник или участок сети не отключался при пуске или кратковременных перегрузках ( $I_{пуск}$ ,  $I_{пик}$ ), аппарат защиты должен быть выбран с учетом кратковременных перегрузок в нормальном или послеаварийном режимах.

Аппарат защиты для электроприемников, не имеющих пусковых токов, выбирается без учета этого условия.

Условие 3.

Уставки защитных аппаратов должны быть проверены на селективность действия последовательно включенных аппаратов защиты, чтобы при каждом нарушении нормального режима отключался только поврежденный участок, но не срабатывали защитные аппараты в высших звеньях

Проверку селективности действия защит производят по типовым время-токовым характеристикам примененных аппаратов с учетом разброса характеристик ( $\pm 15-25\%$  от среднего значения) и по рассчитанным токам КЗ в защищаемой сети построением карты селективности действия защит

Окончательную проверку делают после выбора конструкции сети, защитных аппаратов, проводников и расчета токов КЗ.