

5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Аналитическое исследование электромагнитного переходного процесса в электрических машинах представляет достаточно сложную задачу.

Для её упрощения вводится ряд допущений:

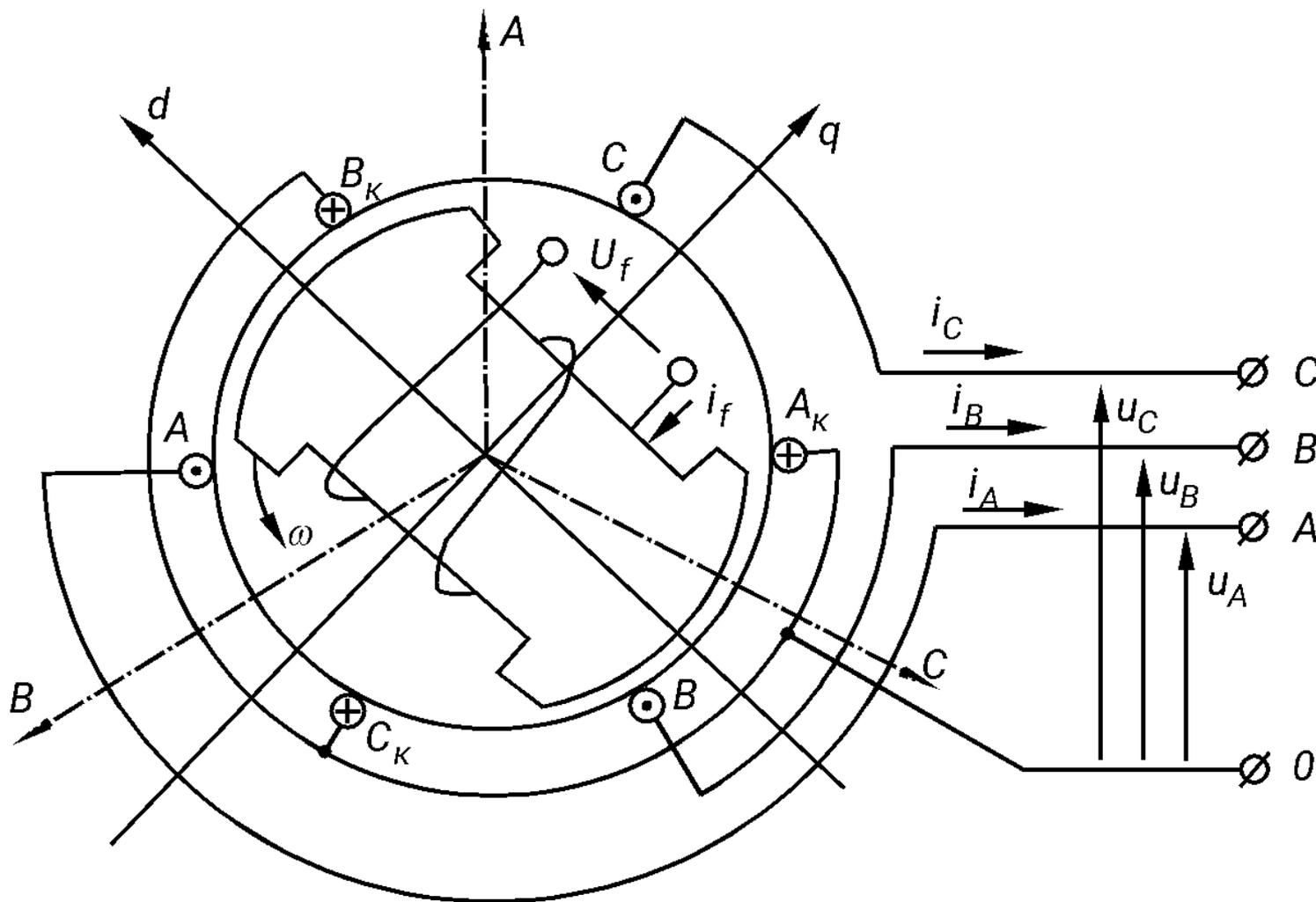
- учитывается только периодическая слагающая тока статора;
- скорость ротора считается неизменной и равной ;
- рассматривается синхронная машина, работающая отдельно от других источников питания;
- трансформаторные ЭДС принимаются равными нулю, вследствие того, что обобщённые векторы потоков изменяются медленно.

Таким образом, в дальнейшем рассматривается в известной мере идеализированная машина. Это вносит погрешности в оценку отдельных величин. Однако, как показывают сопоставления полученных величин с экспериментальными данными, обычно погрешности находятся в допустимых для практических расчётов пределах.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

5.1. Уравнения синхронной машины в фазных координатах

Принципиальная схема синхронной машины, ротор которой имеет явно выраженные полюсы



Дифференциальные уравнения для каждой из обмоток синхронной машины

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A &= u_A \\ \frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B &= u_B \\ \frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C &= u_C \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

где R, R_f - активные сопротивления контуров каждой фазы цепи возбуждения соответственно,

$\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f$ - результирующие потокосцепления обмоток статора и обмотки возбуждения соответственно,

u_A, u_B, u_C, u_f - напряжения на зажимах соответствующих ОБМОТОК.

При принятых допущениях выражения для потокосцеплений представляют линейные зависимости.

Так для потокосцепления фазы ,

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f$$

где L_A - индуктивность фазы A ;

M_{AB}, M_{AC}, M_{Af} - взаимные индуктивности фазы A с фазами B и C , и обмоткой возбуждения (индекс f) соответственно.

Аналогично

$$\Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f$$

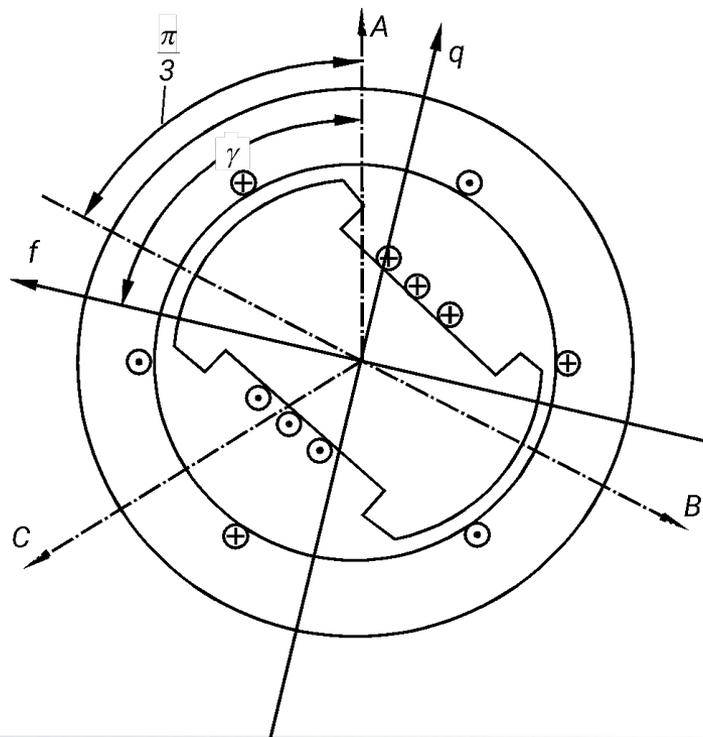
где L_f - индуктивность обмотки возбуждения.

Необходимо отметить, что по принципу взаимности .

$$M_{AB} = M_{BA} \quad M_{Af} = M_{fA} \quad \text{и т.д.}$$

Параметры L и M зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени.

Только индуктивность обмотки возбуждения можно считать неизменной. Положение ротора будем характеризовать углом между магнитной осью фазы A и продольной осью d .



Синусоидальность наводимых в статоре ЭДС указывает на гармонический закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой из фазных обмоток.

Так, например, для фазы А,

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma$$

где M_d - максимальное значение взаимоиндукции при совпадении магнитных осей обмоток статора и ротора.

Изменение индуктивностей фазных обмоток и взаимных индуктивностей между ними обусловлены вращением явнополюсного ротора, поскольку при этом меняется сопротивление магнитным потокам, которые определяют данные величины.

Изменение магнитных потоков происходит гармонически с периодом $T_1 = T/2$, так как при повороте ротора на 180° повторяется предыдущий цикл изменения магнитного сопротивления.

Так, например, индуктивность фазы A определяется выражением,

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma$$

взаимная индуктивность между обмотками фаз A и B ,

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2(\gamma - \pi / 3)$$

где l_0 , m_0 - постоянные составляющие соответствующих индуктивностей;

l_2 , m_2 - амплитуды вторых гармоник соответствующих индуктивностей.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Аналогично могут быть записаны выражения для L и M остальных обмоток.

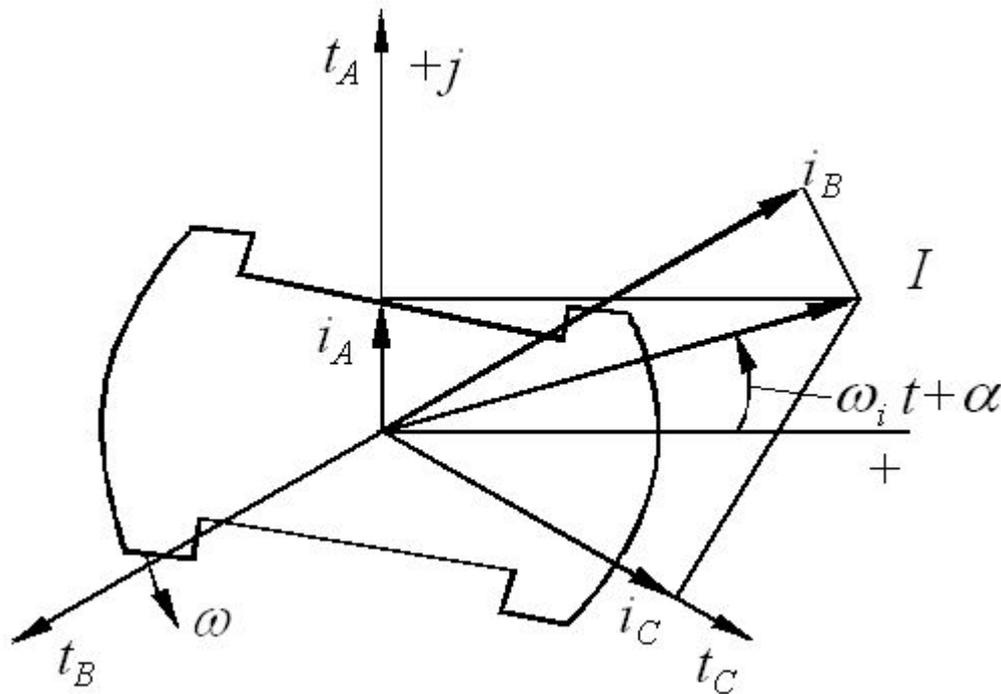
Таким образом, коэффициенты в уравнениях системы (5.1) являются переменными, что значительно усложняет её решение.

(Дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами называются параметрическими; аналитическое решение имеют только немногие из них).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

5.2. Обобщённый вектор трёхфазной системы и замена переменных синхронной машины

Мгновенные значения токов (напряжений, потоков и т.п.) трёхфазной системы можно получить, проектируя один вектор на три оси времени, расположенные под углом 120°



Такой вектор называется обобщённым (или изображающим) вектором трёхфазной системы.

Замена фазных переменных величин обобщённым вектором позволяет разложить его на продольную (d) и поперечную (q) составляющие.

Оси $d, q, 0$ образуют декартову систему координат, вращающуюся вместе с ротором.

Переход от неподвижной фазной системы координат A, B, C к вращающейся, жестко связанной с ротором системы $d, q, 0$ был впервые предложен Блонделем для установившегося режима.

Такой подход был распространён Парком Р.Х. на переходный режим. Это позволяет параметрическую систему уравнений (5.1) свести к системе дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, что упрощает её решение.

Величина обобщённого вектора может быть определена исходя из следующих равенств

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I \sin(\omega_i t + \alpha), \\ i_B &= I \sin(\omega_i t - \pi / 3 + \alpha), \\ i_C &= I \sin(\omega_i t + \pi / 3 + \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где ω_i - угловая скорость обобщённого вектора I , которая в переходном режиме может отличаться от угловой скорости вращения ротора ,

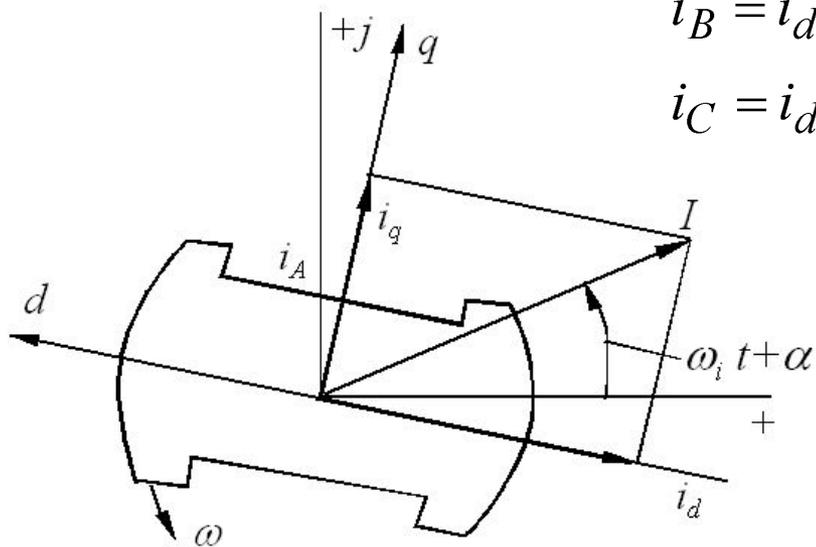
α - начальный угол обобщённого вектора относительно оси, перпендикулярной оси обмотки A .

Если возвести равенства (5.2) в квадрат и просуммировать их, то получим величину обобщённого вектора

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}$$

Фазные токи на основе рисунка (при $I_0 = 0$):

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma \\ i_B &= i_d \cos(\gamma - 2\pi / 3) + i_q \sin(\gamma - 2\pi / 3) \\ i_C &= i_d \cos(\gamma + 2\pi / 3) + i_q \sin(\gamma + 2\pi / 3) \end{aligned} \right\} (5.3)$$



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

5.3. Уравнения Парка для синхронной машины

В уравнение для фазы обмотки статора (из (5.1))

$$\frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A = u_A$$

подставим выражения для фазных величин (Ψ, i, u), выраженные через обобщённые векторы в продольной и поперечной осях ротора (из 5.3))

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma \quad u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma$$

$$\Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma$$

С помощью этой подстановки заменим фазные переменные обобщёнными. После дифференцирования и преобразования получим

$$\left(u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d \right) \cos \gamma + \left(u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q \right) \sin \gamma = 0 \quad (5.4)$$

Равенство (5.4) может быть удовлетворено при любом значении γ , только при условии, что каждое выражение в скобках тождественно равно нулю.

Приравнивая выражения в скобках к нулю, получим два уравнения.

Добавим к полученным уравнениям уравнение для обмотки возбуждения из системы (5.1), получим систему уравнений синхронной машины при отсутствии в роторе демпферных контуров

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d &= -u_d \\ \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q &= -u_q \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Полученные уравнения называются уравнениями Парка. Они выражают теорию двух реакций обмоток статора синхронной машины и характеризуют переходный процесс в ней.

Входящие в систему дифференциальные уравнения имеют постоянные коэффициенты.

Слагаемые $\frac{d\Psi_d}{dt}$, $\frac{d\Psi_q}{dt}$ представляют ЭДС трансформации, так как наводятся в обмотках статора и ротора благодаря изменению потокосцеплений.

Трансформаторные ЭДС наводятся в переходном режиме, в стационарном режиме они отсутствуют.

Слагаемые, содержащие $\frac{d\gamma}{dt}$, представляют собой ЭДС вращения (резания), которые наводятся в обмотках статора благодаря вращающемуся полю.

В обмотках ротора в стационарном режиме эти ЭДС отсутствуют, так как не создают в них изменяющегося потока. В переходном режиме происходит перемещение обобщённого вектора потока относительно ротора и в его обмотках наводятся ЭДС скольжения.

Потокосцепления Ψ_d и Ψ_q включают потоки рассеяния обмоток статора.

Полные синхронные индуктивности $L_d = L_{ad} + L\sigma$, $L_q = L_{aq} + L\sigma$

При принятом положительном направлении потока из ротора в статор результирующее потокосцепление можно выразить через обобщённые векторы токов ротора и статора

$$\Psi_d = L_{ad}i_f - L_d i_d, \quad \Psi_q = -L_q i_q$$

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

5.4. Трёхфазное короткое замыкание синхронной машины

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

*5.4.1. Переходный процесс в синхронной
машине без демпферных обмоток при
отключённом регуляторе возбуждения*

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

При указанных выше допущениях и учитывая, что в месте КЗ $u_d = u_q = 0$ из первого и второго уравнений системы (5.5) путём несложных преобразований можно получить

$$I = \frac{E_q}{\sqrt{x_d^2 + R^2}} \quad (5.6)$$

где $E_q = Ri_q + x_d i_d$ — синхронная ЭДС в установившемся режиме.

Выражение (5.6) может быть использовано для расчёта переходного режима при заданных значениях E'_q и x'_d

Изменение во времени действующего значения периодической слагающей тока получим из третьего уравнения системы (5.5)

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f = u_f$$

Разделим это уравнение на R_f учитывая, что ,
 Получим

$$\frac{L_f}{R_f} \frac{di_f}{dt} + i_f = \frac{u_f}{R_f} \quad (5.7)$$

где $i_{fe} = \frac{u_f}{R_f}$ - вынужденный ток возбуждения.

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора

$$T_{f0} = \frac{L_{f0}}{R_f}$$

при замкнутой обмотке статора постоянная времени свободного переходного тока статора

$$T'_d = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}$$

С учётом последнего выражения перепишем уравнение (5.7) в виде

$$T'_d \frac{di_f}{dt} + i_f = i_{fe} \quad (5.8)$$

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Так как относительных единицах ток возбуждения равен ЭДС $i_{f*} = \frac{E_q}{E_{qe}}$ (5.8) представим в виде

$$T'_d \frac{dE_q}{dt} + E_q = E_{qe} \quad (5.9)$$

где E_{qe} - вынужденная ЭДС, создаваемая возбудителем, равная при отключённом регуляторе возбуждения ЭДС предшествующего режима.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Решение дифференциального уравнения (5.9)

$$E_q = (E_{q0} - E_{qe}) \exp(-t / T'_d) + E_{qe} \quad (5.10)$$

где E_{q0} - начальная полная ЭДС в первый момент КЗ с учётом возрастания за счёт свободных токов ответной реакции ротора.

В соответствии с (5.6) разделим все члены уравнения (5.10) на $(x_d + x_{вн})$ пренебрегая активными сопротивлениями; получим действующее значение тока в любой момент времени

$$I_t = I_{dt} = (I'_0 - I_\infty) \exp(-t/T'_d) + I_\infty = I'_{св.0} \exp(-t/T'_d) + I_\infty \quad (5.11)$$

где $I'_{св.0} = I'_0 - I_\infty$ — начальный свободный переходный ток.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

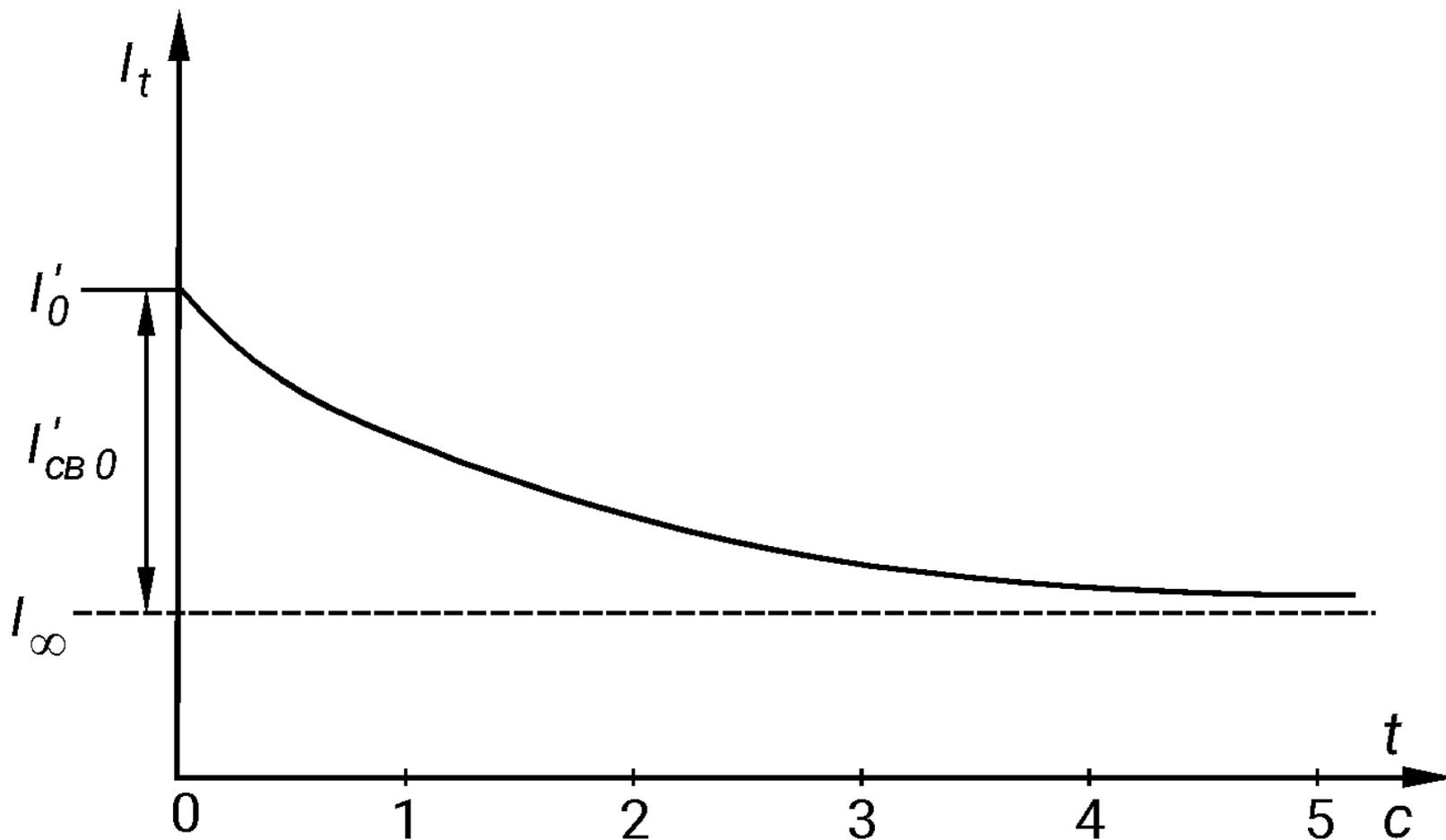
Начальный переходный ток КЗ определяется из формулы

$$I'_0 = \frac{E'_q}{x'_d + x_{вн}}$$

Установившейся ток, соответствующий принуждённой ЭДС .

$$I_\infty = \frac{E_{qe}}{x_d + x_{вн}}$$

Кривая действующего значения тока, соответствующая (5.11)



Кривая действующего значения тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины без демпферных обмоток

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

5.4.2. Влияние демпферных обмоток на ток короткого замыкания.

Упрощённо можно считать, что демпферная обмотка приводит к возникновению дополнительного свободного сверхпереходного тока

$$I''_{св} \approx I''_{dсв} = (I'' - I') \exp(-t / T''_d)$$

где T''_d - постоянная времени демпферной обмотки при замкнутой обмотке статора,

$$I''_0 = E''_q / (x''_d + x''_{вн}) \text{ (начальный сверхпереходный ток.)}$$

Ток КЗ в любой момент времени

$$I_t = I''_{св.0} \exp(-t / T''_d) + I'_{св.0} \exp(-t / T'_d) + I_\infty \quad (5.12)$$

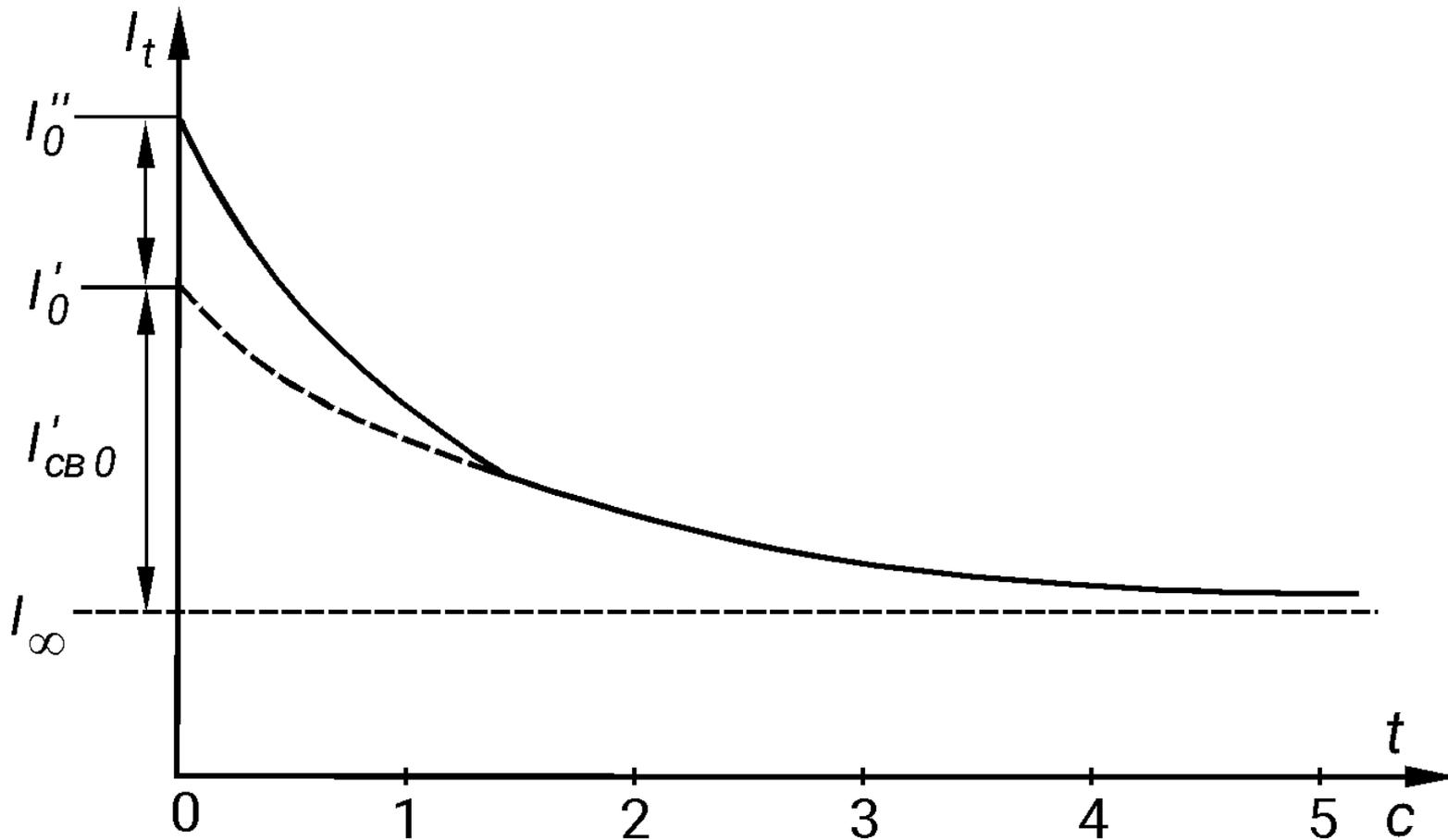
Выражение (5.12) с двумя постоянными времени с допустимой для практики погрешностью (10-15%) позволяет определить периодический ток.

В действительности процесс протекает сложнее.

Демпферные обмотки и тело ротора имеют много контуров, свободные токи вначале протекают по поверхности, постепенно проникая во внутрь.

Магнитная связь между продольной демпферной обмоткой и обмоткой возбуждения исключает независимое изменение тока в любой из них.

Кривая тока в соответствии с выражением (5.12)



Кривая действующего значения тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины с демпферными обмотками

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

*5.4.3. Влияние автоматического регулятора
возбуждения на процессы в синхронной
машине.*

Автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) называется устройство релейной форсировки возбуждения, которое приходит в действие при определённом снижении напряжения генератора (например, при КЗ).

Релейная форсировка является простой, но эффективной мерой повышения устойчивости работы генераторов, а также потребителей электроэнергии.

Релейная форсировка характеризуется предельным (потолочным) током возбуждения, скоростью нарастания напряжения и вынужденного тока возбуждения.

Существенной особенностью данного режима работы является нелинейность характеристики возбудителя и машины (вследствие насыщения зубцов ротора и других элементов на пути магнитного потока).

Для упрощения решения задачи расчёта тока КЗ характеристики машины примем линейными, соответствующими некоторому среднему насыщению. При этом можно считать, что действие АРВ заключается в увеличении тока КЗ.

Выражение для тока КЗ можно представить в виде

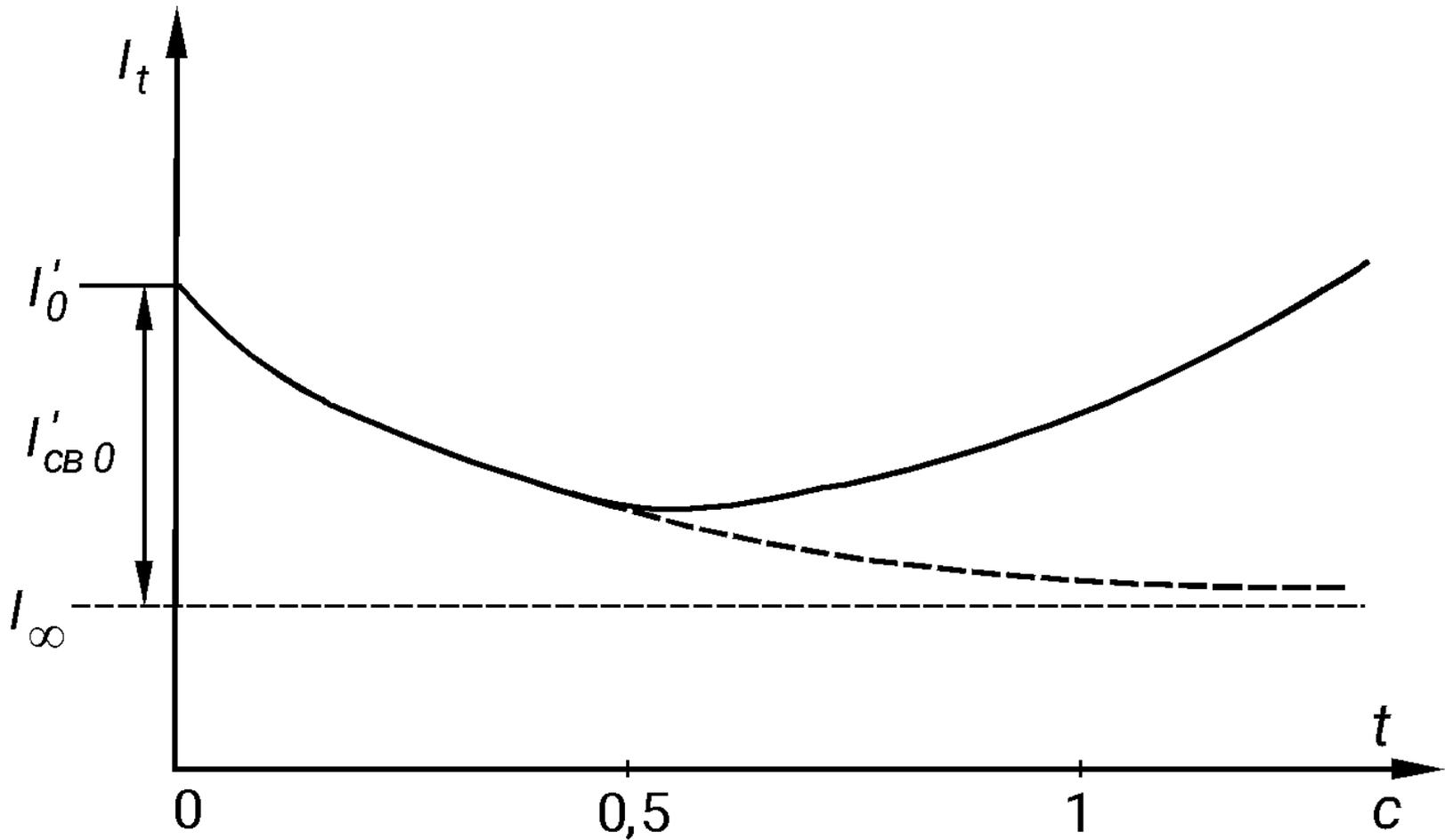
$$I_t = I_{t \text{ без АРВ}} + \Delta I_{np} F(t) \quad (5.13)$$

где ΔI_{np} - предельное приращение установившегося тока КЗ за счет АРВ,

$F(t)$ функция, определяющая закон приращения во времени синхронной ЭДС вследствие форсировки возбуждения машины (зависит от постоянных времени сверхпереходного тока и обмотки возбуждения);

$I_{t \text{ без АРВ}}$ - периодическая слагающая тока КЗ при отключённом АРВ (вычисляется по формулам (5.11) или (5.12) в зависимости от наличия демпферных обмоток).

Кривая тока КЗ при наличии АРВ



Кривая действующего значения тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины с АРВ

Выражение (5.13) предполагает увеличение тока возбуждения до предельного значения, что соответствует близким КЗ.

При удалённых КЗ напряжение генератора через 1-5 с может достигнуть номинального U_i , после чего АРВ поддерживает ток возбуждения на достигнутом уровне.

При этом ток КЗ в генераторе, также неизменный

$$I_t = \frac{U_H}{x_{вн}}$$

При включённом АРВ затухание свободных оков, возникших при КЗ, компенсируется увеличением токов от действия АРВ.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

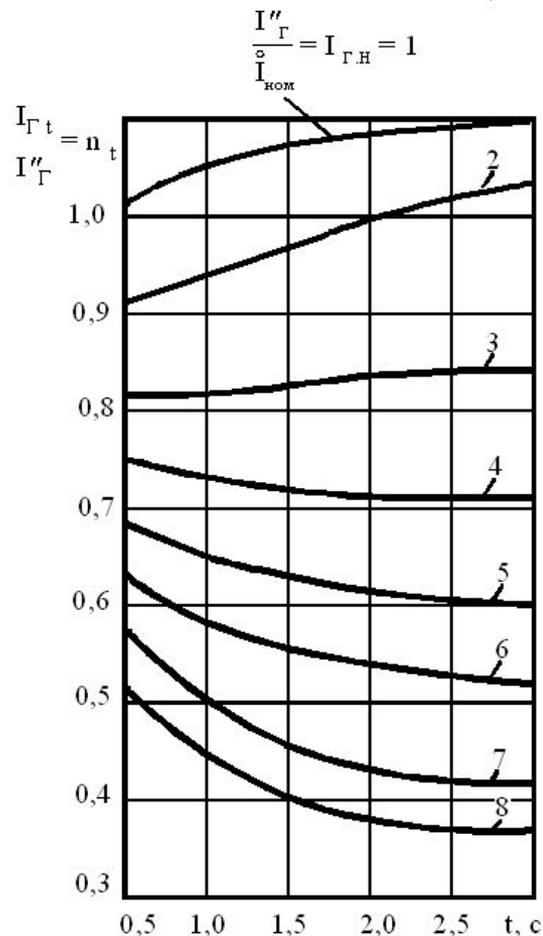
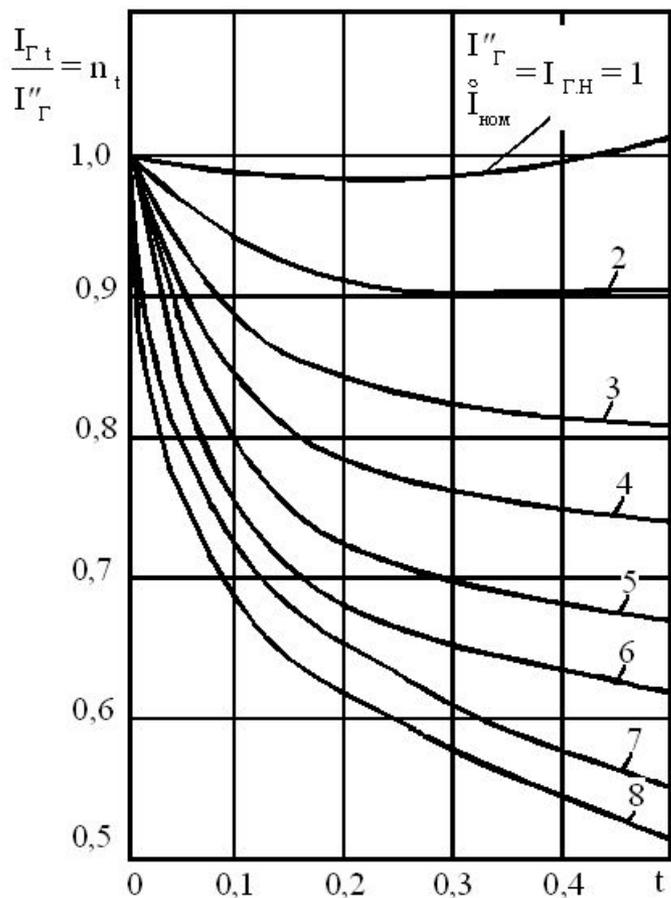
*5.4.4. Расчёт периодической составляющей
тока короткого замыкания методом
типовых кривых*

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Наиболее важным и характерным является начальное значение периодической слагающей тока КЗ.

Однако, в ряде случаев требуется учитывать изменение периодической слагающей тока КЗ: для проверки термической устойчивости аппаратов, отключаемого тока, анализа действия релейной защиты.

Для расчёта периодической слагающей тока КЗ в разные моменты времени переходного режима используется инженерный метод типовых кривых



Известно, что параметры турбо- и гидрогенераторов различны, поэтому характер изменения тока во времени различен даже при одинаковой удалённости КЗ.

Типовые кривые получены путём решения дифференциальных уравнений синхронной машины и представляют собой средние кривые изменения тока во времени в относительных единицах (для турбо- и гидрогенераторов).

Максимальная погрешность усреднения не превышает 10%, что является приемлемым для практических расчётов.

Использование типовых кривых рекомендуется для турбогенераторов мощностью 12,5 - 800 МВт, гидрогенераторов до 500 МВт и всех крупных синхронных компенсаторов.

Типовые кривые представляют собой относительные значения токов (отнесены к сверхпереходным токам генератора) для различных моментов времени t .

Для учёта удалённости КЗ введено отношение начального тока КЗ генератора $I''_{кз}$ к его номинальному току $I_{ном}$. Т.е. $I_{н.з*} = I''_{кз} / I_{ном}$, характеризующие кратность тока КЗ к номинальному току.

Таким образом, типовые кривые представляют собой семейство кривых $f(t) = I_{кз} / I_{ном}$ при различных значениях $I_{кз} / I_{ном} = const$, которые характеризуют изменение во времени относительного тока.

Во многих случаях систему нельзя представить одним генератором, так как многие электрические станции имеют различную удалённость от места КЗ и, следовательно, различную скорость затухания периодической слагающей.

В этом случае схему замещения представляют в виде двух источников: эквивалентного генератора станции и системы бесконечной мощности, у которой периодическая слагающая тока КЗ постоянна

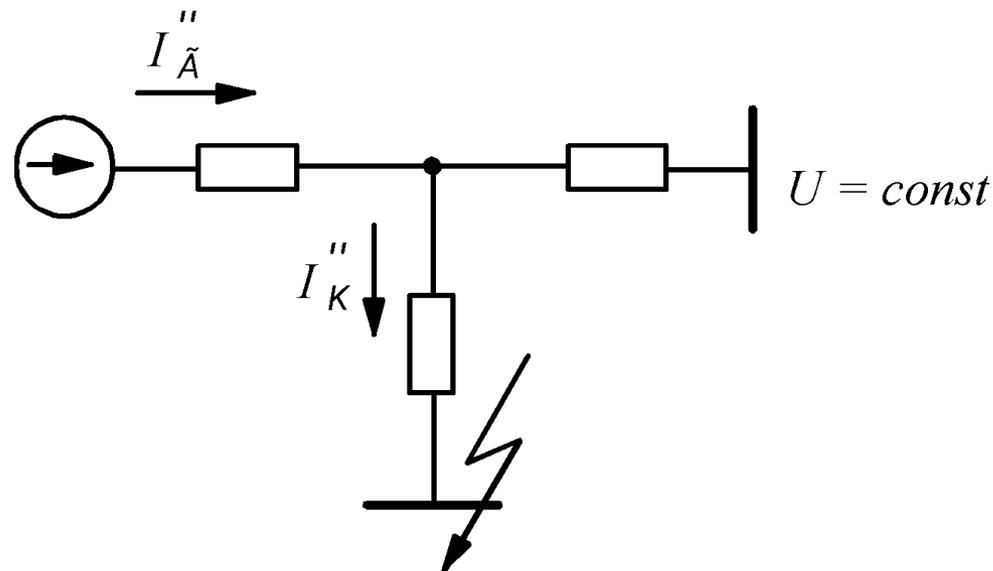
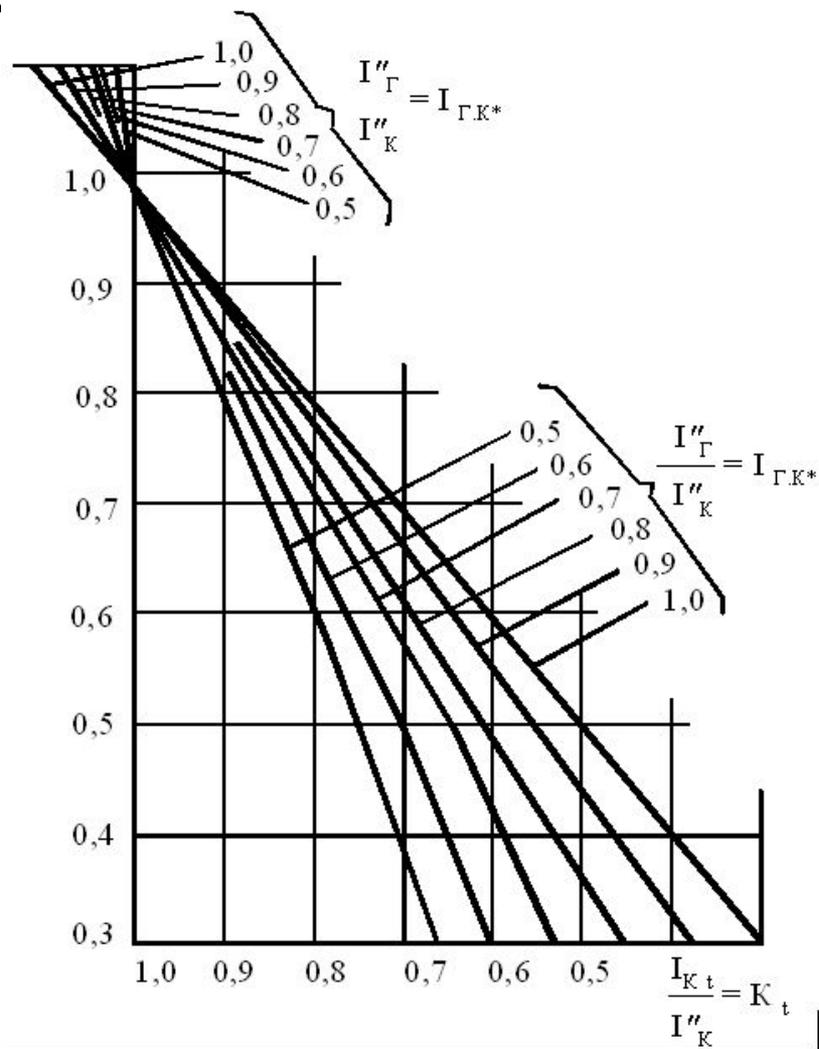
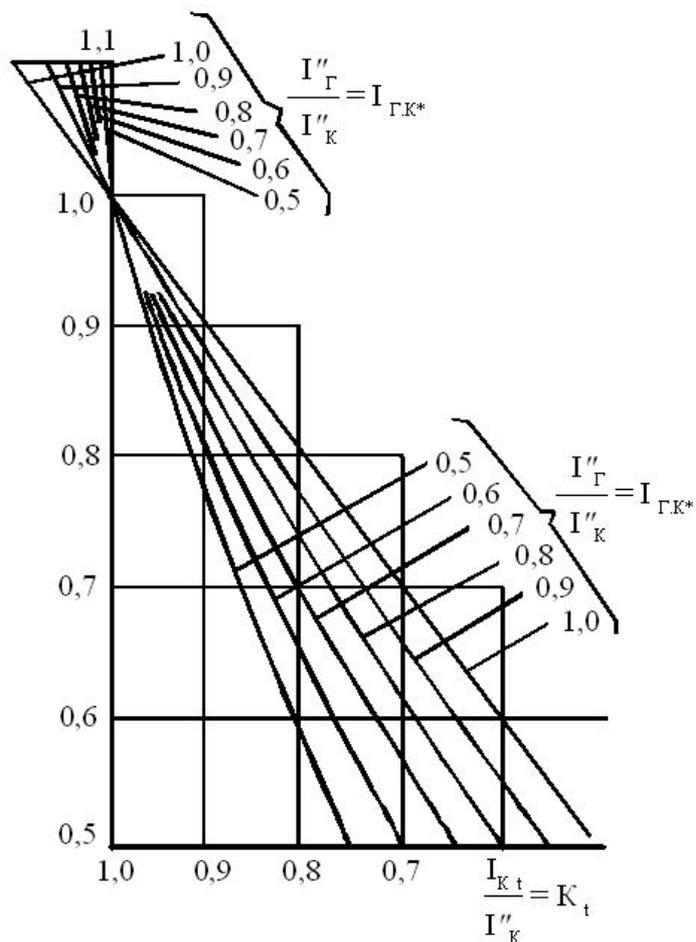


Схема замещения системы в виде двух источников: эквивалентного генератора станции и системы бесконечной мощности

Для учёта влияния системы Ульянов С.А. предложил ввести ещё одну зависимость, удобную для непосредственного определения тока в месте КЗ



Расчёт токов КЗ с помощью типовых кривых при отсутствии системы бесконечной мощности производится в следующей последовательности.

1. Составляется схема замещения для начального сверхпереходного режима. Все генераторы и нагрузки вводятся сверхпереходными ЭДС.
2. Схема замещения преобразуется (упрощается) относительно точки КЗ и определяются эквивалентные ЭДС и сопротивление L_{ε} . \tilde{e}_y''
3. С помощью найденных значений ЭДС и сопротивления определяется начальный ток КЗ от обобщённого генератора $I_{\tilde{a}}''$ (при расчёте без учёта нагрузок он равен току в месте КЗ).

4. Определяется номинальный ток генераторов, приведенный к ступени КЗ

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{Э.НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{н}}}$$

где $P_{\text{Э.НОМ}}$ - номинальная мощность всех генераторов станции, $U_{\text{НОМ}}$ - напряжение генератора, приведенное к ступени КЗ (среднее номинальное напряжение ступени КЗ), $\cos \varphi_{\text{н}}$ - коэффициент мощности.

5. По найденным в п.п. 3 и 4 значениям и определяется кратность начального тока КЗ генератора

$$I_{\text{г.н}^*} = I_{\text{к}}'' / I_{\text{НОМ}}$$

Для заданных моментов времени определяются действующие значения периодической составляющей тока КЗ, используя найденные по кривым значения

n_t

$$I_{\text{гт}} = I_{\text{г}}'' n_t$$

Пример 5.1.

Для схемы, произвести расчёт изменения во времени периодической составляющей тока КЗ в месте трёхфазного повреждения, используя типовые кривые.

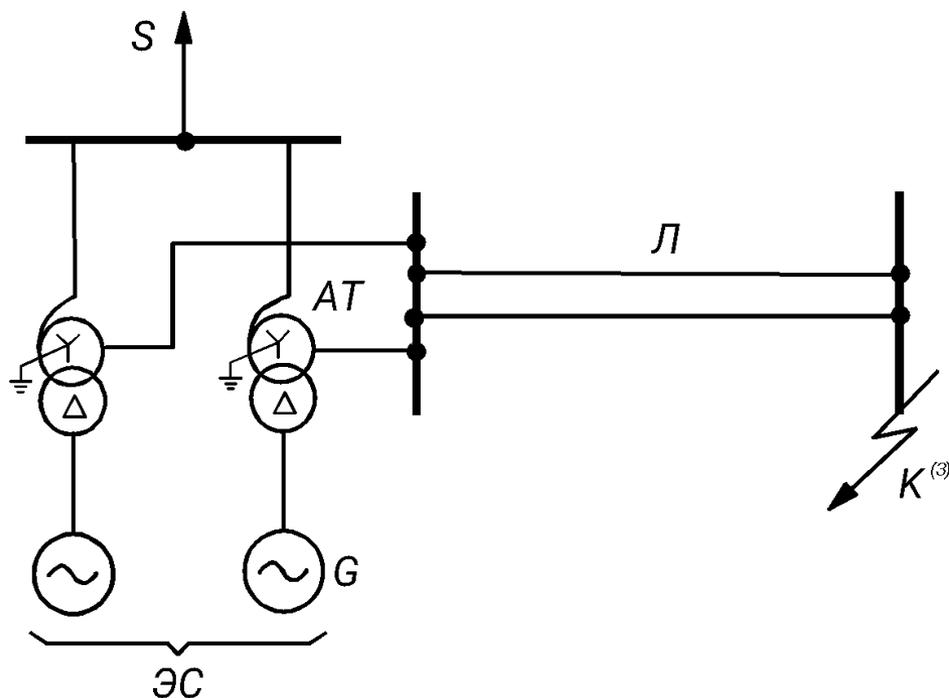


Схема участка сети к примеру 5.1.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Параметры элементов схемы:

- Генератор G : $S_{\text{н}} = 264,7$ МВА; $U_{\text{н}} = 15,75$ кВ; $x''_d = 0,2$;
- Автотрансформатор T : $S_i = 250$ МВА; $U_{\text{АТ}} = 220$ кВ; $U_{\text{НТ}} = 121$ кВ;
 $U_{\text{НН}} = 15,75$ кВ $U_{\text{к\%BC}} = 11\%$; $U_{\text{к\%BH}} = 32\%$; $U_{\text{к\%CH}} = 11\%$;
- Линия Л: длина $l = 15$ км, погонное сопротивление $x_{\text{л}} = 0,4$ Ом/км.

◁ Схема замещения для расчёта сверхпереходного тока приведена на рис.5.10. Здесь указаны только элементы, по которым протекает ток КЗ. x_3 – сопротивление обмоток НН и СН автотрансформатора.

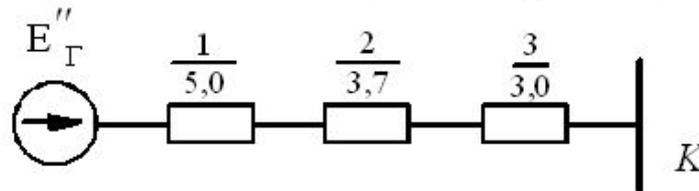


Схема замещения участка сети к примеру 5.1

Расчёт с использованием типовых кривых проводится с приближённым приведением коэффициентов трансформации.

Определим сопротивления элементов схемы в именованных единицах, приведенных к ступени напряжения, на которой произошло КЗ:

$$x_1 = \frac{1}{2} x_d'' \frac{U_{ср.н}^2}{S_H} = \frac{1}{2} 0,2 \frac{115^2}{264,7} = 5,0 \text{ Ом},$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \frac{U_{кСН\%}}{100\%} \frac{U_{ср.н}^2}{S_H} = \frac{14}{100} \frac{115^2}{250} = 3,7 \text{ Ом},$$

$$x_3 = \frac{x_{ноз} l_1}{2} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 15 = 3,0 \text{ Ом},$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_9 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 11,7 \text{ Ом}.$$

Сверхпереходный ток КЗ

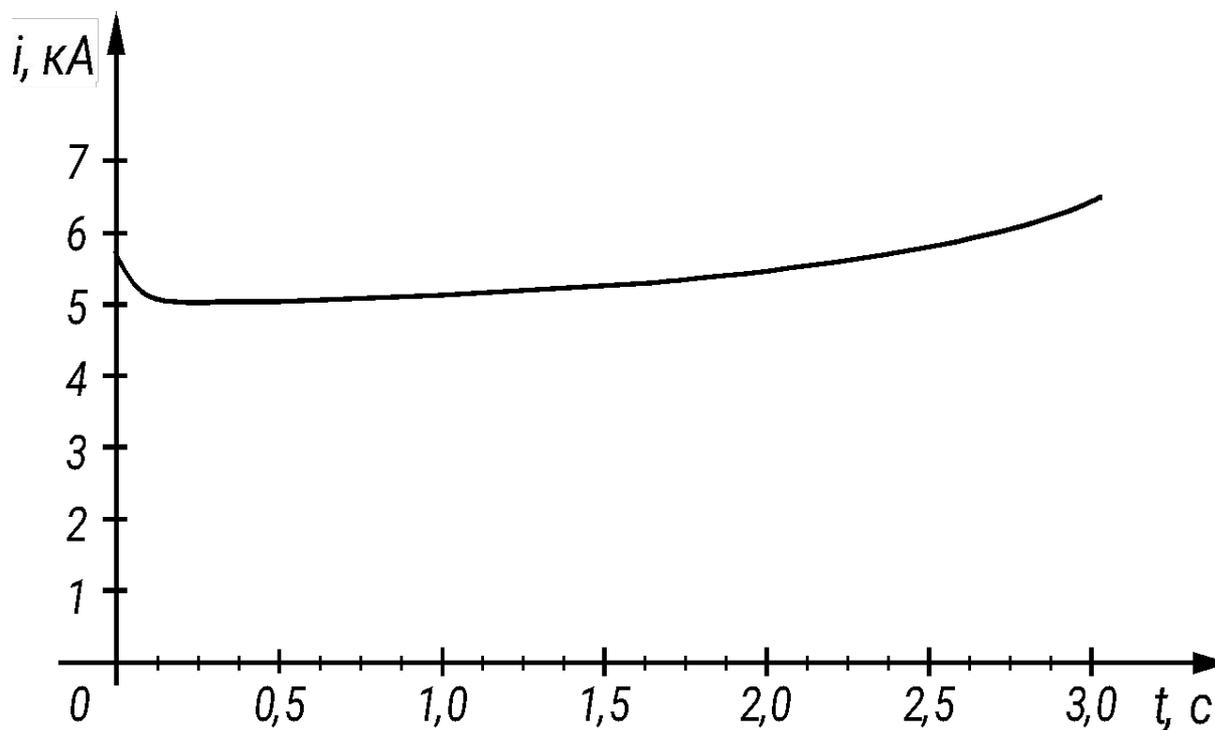
$$I_z'' = \frac{\overset{\circ}{E}''}{\sqrt{3} \overset{\circ}{x}_z} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 11,7} = 5,68 \text{ кА.}$$

Номинальный ток объединенного генератора
электростанции

$$\overset{\circ}{I}_{z.\text{НОМ}} = \frac{S_{z.\text{НОМ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.НОМ}}} = 2,66 \text{ кА.}$$

Относительные значения тока генератора $I_{zt} / I_z'' = n_t$
определяем по кривым

Действующие значения периодической составляющей
тока $I_{zt} = I_z'' n_t$



Кривая изменения действующего значения тока КЗ

5.5. Переходные процессы в электрических двигателях

Синхронный двигатель и компенсатор являются дополнительными источниками тока КЗ, так как их сверхпереходная (или переходная) ЭДС больше подведенного напряжения (U_c), которое при возникновении КЗ в любой точке сети уменьшается.

Схема замещения синхронного двигателя такая же, как и синхронного генератора.

Параметры схемы замещения синхронного двигателя находятся, используя параметры предшествующего режима.

При отсутствии справочных данных для синхронного двигателя можно приближенно принять $E''_{*CD} = 1,1$ $x''_{*CD} = 0,2$

Для определения ударного тока от синхронного двигателя, необходимо предварительно определить постоянную времени, для нахождения которой находится его активное сопротивление

$$R_{сд*} = 0,25(1 - \eta_n)\eta_n \cos \varphi$$

где η_n - КПД двигателя.

Недовозбужденный синхронный двигатель также работает в режиме генератора при значительных снижениях напряжения, возникающих при КЗ (при малой удалённости КЗ).

При малых снижениях напряжения, когда сохраняется неравенство $E'' < U_c$ по-прежнему будет потреблять ток из сети.

Асинхронные двигатели, составляющие основную часть промышленной нагрузки, работают с малым скольжением $s = 2-5\%$.

Для практических расчетов можно считать, что они работают с синхронным числом оборотов.

Следовательно, в начальный момент КЗ асинхронный двигатель можно рассматривать как недовозбужденный синхронный.

Существенный ток КЗ генерируют только асинхронные двигатели, непосредственно связанные с точкой КЗ или находящиеся в зоне малой удалённости от неё, т.е. те, у которых сверхпереходные ЭДС превышают напряжения сети в точке присоединения двигателей.

Этот ток обусловлен электромагнитной энергией, запасённой в обмотках АД до возникновения КЗ.

Переходные процессы в электрических двигателях

Ротор асинхронного двигателя в начальный момент КЗ продолжает по инерции вращаться.

В цепи ротора протекает остаточный ток, а соответствующий ему поток пронизывает обмотку статора, и, вследствие его изменения в ней наводится ЭДС.

Так как цепь обмотки статора замкнута, протекает ток к точке КЗ.

После затухания свободного тока ротора (вследствие активного сопротивления цепи ротора) генерирование тока асинхронным двигателем прекращается.

Исходя из неизменности потокосцепления с обмоткой ротора в начальный момент КЗ, для асинхронного двигателя можно установить его сверхпереходные ЭДС и сопротивление.

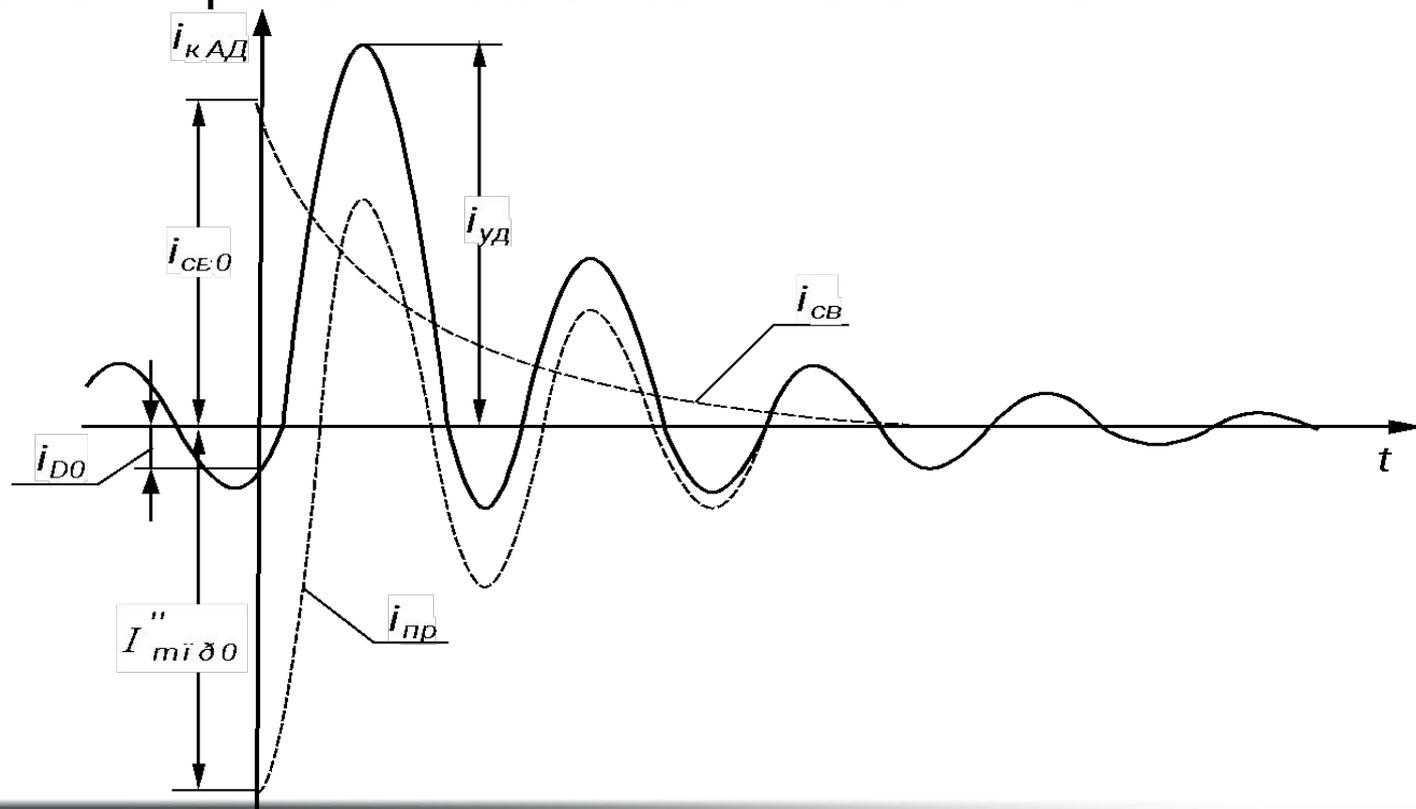
Схема замещения асинхронного двигателя для определения сверхпереходных параметров аналогична схеме замещения синхронного генератора.

Сверхпереходное сопротивление асинхронного двигателя по существу является сопротивлением КЗ, относительную величину которого можно определить из выражения $x''_{*AD} = 1 / k_{пуск}$

Сверхпереходная ЭДС определяется из условий предшествующего режима. При отсутствии справочных данных она приближенно может быть принята равной $E''_{*AD} = 0,9$

Относительно большие активные сопротивления обмоток статора и ротора АД обуславливают весьма быстрое затухание периодической и апериодической составляющих генерируемого АД тока.

Характерная кривая тока, генерируемого АД в начальный момент времени после возникновения КЗ.



Переходные процессы в электрических двигателях

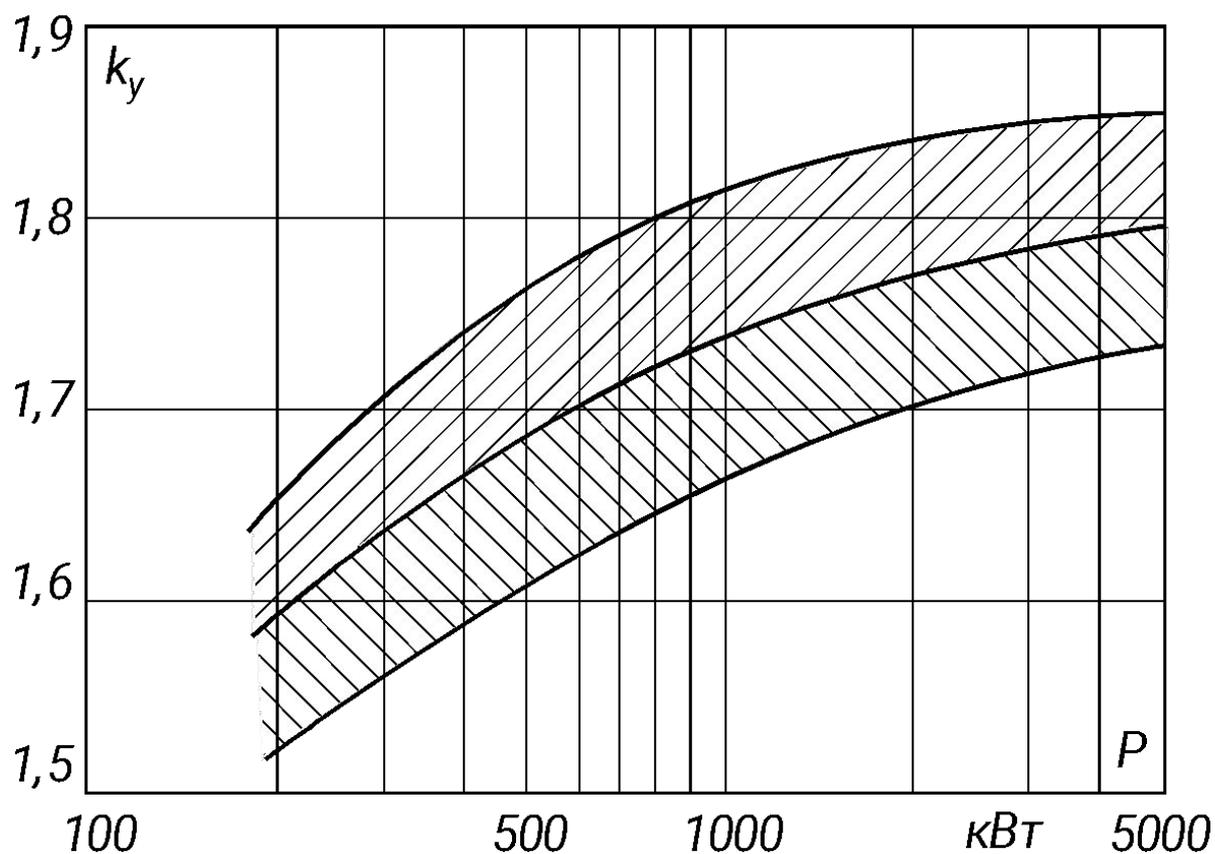
Дополнительный ударный ток от АД

$$i_{\text{уд.АД}} = \frac{E''_{\text{АД}}}{x''_{\text{АД}}} \sqrt{2} k_{\text{уд.АД}}$$

где $k_{\text{уд.АД}}$ - ударный коэффициент асинхронного двигателя.

Кривые изменения ударного коэффициента в зависимости от мощности АД.

Кривые построены с учётом затухания периодической составляющей тока КЗ.



Для обобщённой нагрузки рекомендуются следующие параметры, отнесенные к полной рабочей мощности и среднему номинальному напряжению:

$$E'' = 0,85; x'' = 0,35; X/R = 2,5; k_{уд} = 1.$$

Дополнительный ударный ток, генерируемый обобщённой нагрузкой

$$i_{уд.нагр} = k_{уд.нагр} \sqrt{2} I''_{нагр} = 1 \cdot \sqrt{2} \frac{0,85}{0,35} \frac{S_{раб}}{\sqrt{3} U_{ср}}$$