

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ЧАСТЬ 2

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
в системах электроснабжения**

РАЗДЕЛ № 1

**Общие сведения о
электро-механических
переходных процессах**

**Уравнение движения
генератора**

1. Общие сведения о электромеханических переходных процессах

В разделе электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах и системах электроснабжения вместе **с изменением электрических величин** рассматривается также **механическое (вращательное) движение роторов электрических машин (СГ, СД, АД)**. Основное внимание уделяется вопросам устойчивости совместного движения этих машин, объединённых в параллельную работу электрическими связями.

Переходные процессы и в электрической системе являются следствием всевозможных **возмущений** – то есть изменений значений токов, напряжений, механических моментов, скорости вращения машин и других параметров.

В системе различают малые и большие возмущения.

Малые возмущения в энергосистеме обусловлены непрерывным изменением нагрузки, действием регулирующих устройств и другими причинами. Процессы, вызванные малыми возмущениями, происходят около некоторого равновесного состояния системы или СМ и связаны с понятием **статической устойчивости энергосистемы, СД или АД.**

Большие возмущения в энергосистеме обусловлены резкими возмущающими воздействиями: короткими замыканиями, включением и отключением воздушных линий, трансформаторов, СД и АД и др. Процессы, вызванные большими и длительными возмущениями, приводят к значительным изменениям параметров режима, скорости вращения СГ, СД или АД и связаны с понятием **динамической устойчивости энергосистемы, СД или АД.**



Основные задачи, решаемые при анализе статической устойчивости

- Расчет параметров предельных режимов (мощности, напряжения и др.);
- Определение коэффициентов запаса устойчивости;
- Выбор мероприятий по повышению статической устойчивости.



Основные задачи, решаемые при анализе динамической устойчивости

- Расчет траектории движения генератора, СД или АД в режиме длительного короткого замыкания;
- Расчет предельного времени ликвидации короткого замыкания;
- Определение коэффициентов запаса устойчивости СГ, СД и АД;
- Выбор мероприятий по повышению динамической устойчивости.

Параметры движения ротора генератора

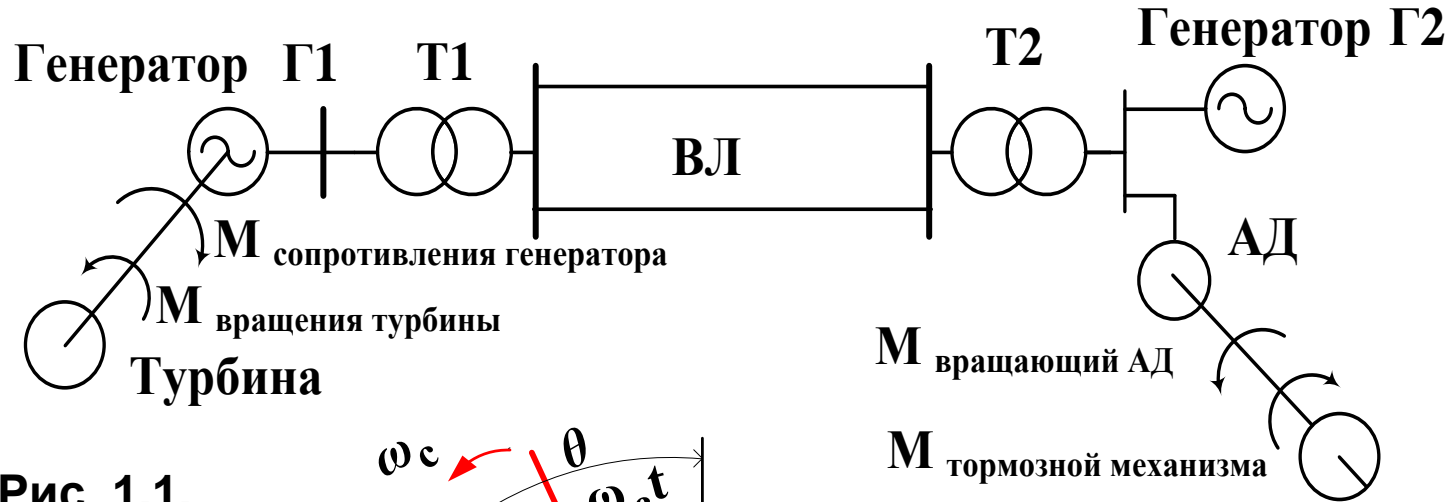


Рис. 1.1.

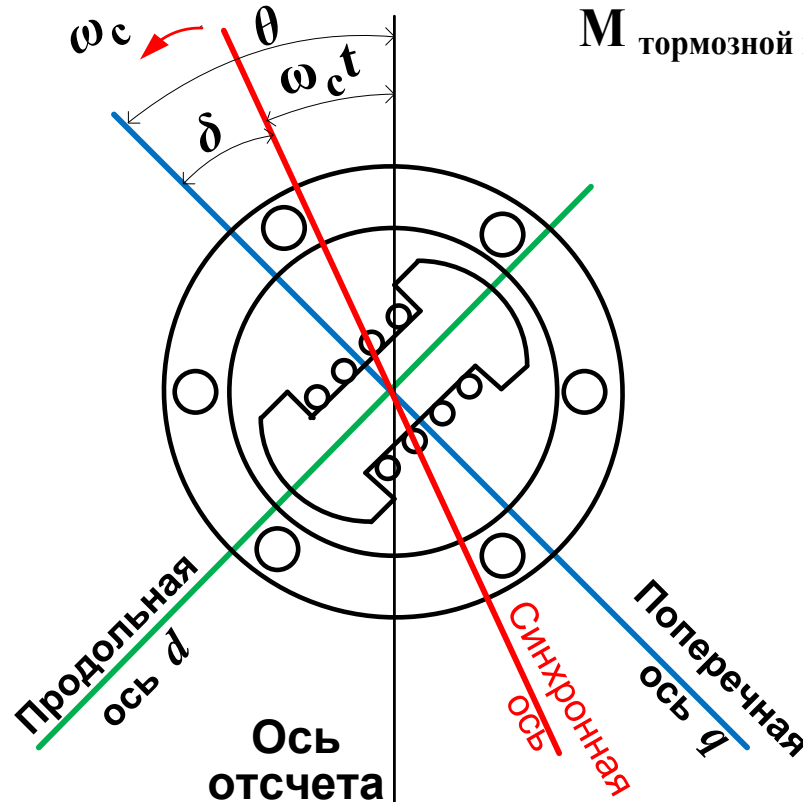


Рис. 1.2.

2. Уравнение движения ротора генератора

Вращательное движение ротора генератора и турбины далее условно называемых «генератором», согласно второго закона Ньютона, описывается **дифференциальным уравнением**:

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{\text{ЭМ}} \quad \text{или} \quad \omega J_0 \frac{d\omega}{dt} = \omega (M_T - M_{\text{ЭМ}}), \quad (1.1)$$

где J_0 , ω , $d\omega / dt$ – соответственно, момент инерции, угловая скорость и угловое ускорение вращающейся части «турбина - ротор генератора»;

M_T – вращающий момент турбины;

$M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный тормозной момент генератора.

Используя систему относительных единиц, имеем:

$$\omega J_0 = T_j; \quad \omega M_T = P_T; \quad \omega M_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМ}}; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2},$$

В результате дифференциальное уравнение движения генератора в системе от. ед. запишется так:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_{\text{ЭМ}}, \quad (1.2)$$

где T_j , δ , t – соответственно, постоянная инерции, угол рассогласования ротора генератора относительно синхронно вращающейся оси и время;
 P_T – мощность турбины;
 $P_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная мощность генератора.

Связь параметров в именованных и от. ед.

$$T_{*j(\text{рад})} = \omega T_{j(\text{с})}; \quad t_{*}(\text{рад}) = \omega t(\text{с}); \quad P_* = P_{\text{кВт}} / S_{\text{б(кВт)}}; \quad \delta_{*\text{рад}} = (\pi / 180^\circ) \cdot \delta^\circ$$

КОНЕЦ РАЗДЕЛА № 1

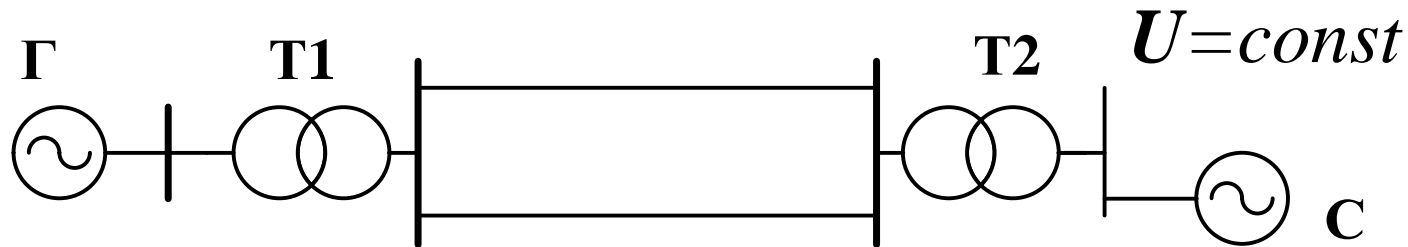
**Общие сведения о
электро механических
переходных процессах**

**Уравнение движения
генератора**

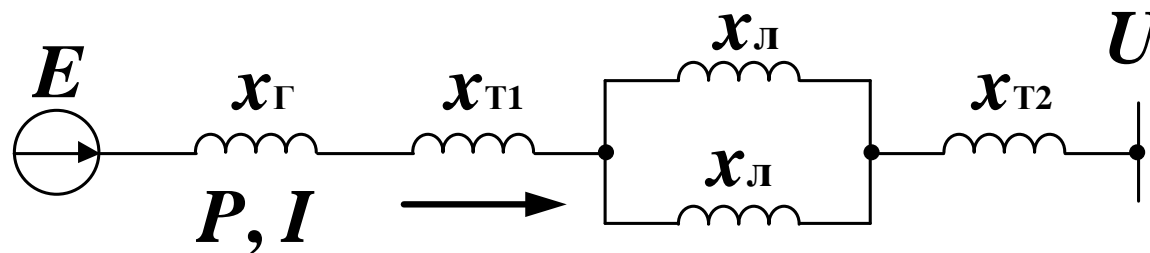
РАЗДЕЛ № 2

Статическая устойчивость простейшей энергосистемы

3. Характеристика электромагнитной мощности генератора



а - принципиальная схема одномашинной энергосистемы



б - схема замещения

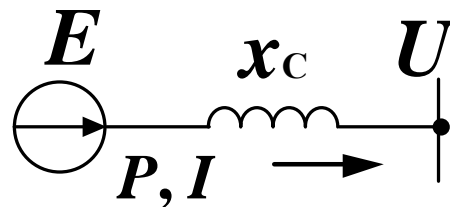


Рис.2.1.

в - преобразованная эквивалентная схема замещения

Эквивалентное индуктивное сопротивление схемы:

$$x_c = x_d + x_{T1} + 0,5x_L + x_{T2} = x_d + x_{ГС}$$

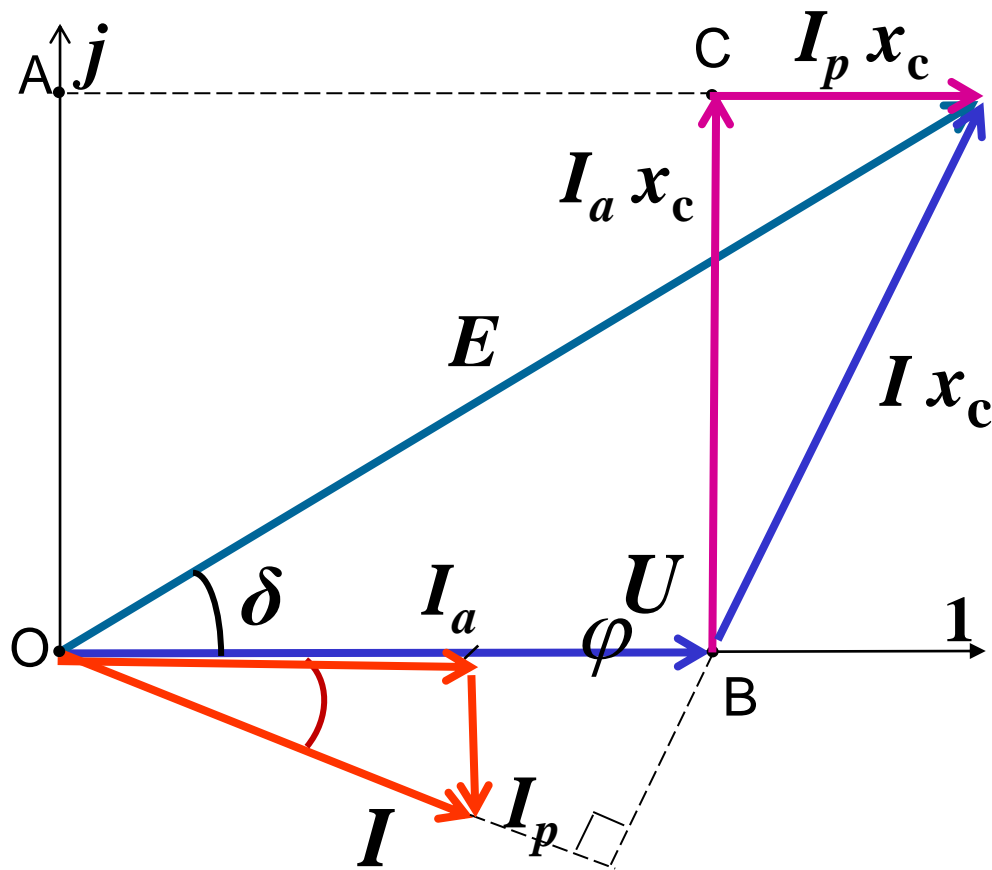


Рис. 2.2. Векторная диаграмма напряжений и токов

Связь между электрическими параметрами схемы отражена на векторной диаграмме (рис. 1.4) .

На ней выделены активная I_a и реактивная I_p составляющие фазного тока I и, соответственно, показаны продольная $I_p jx$ и поперечная $I_a jx$ составляющие падения напряжения $I jx$ на эквивалентном сопротивлении x .

Из диаграммы следует равенство $I_a x = E \sin \delta$.

Умножив обе части этого равенства на U / x , получим расчетное выражение активной мощности генератора:

$$P = \frac{E U}{x} \sin \delta. \quad (2.1)$$

При $E, U = \text{const}$ зависимость (2.1) представляет собой синусоидальную функцию активной мощности генератора от угла. Графическое изображение этой функции называется ***угловой характеристикой активной мощности (P) генератора***. Изменение передаваемой мощности P осуществляется изменением угла δ , т.е. изменением угла рассогласования векторов E и U .

4. Статическая устойчивость энергосистемы

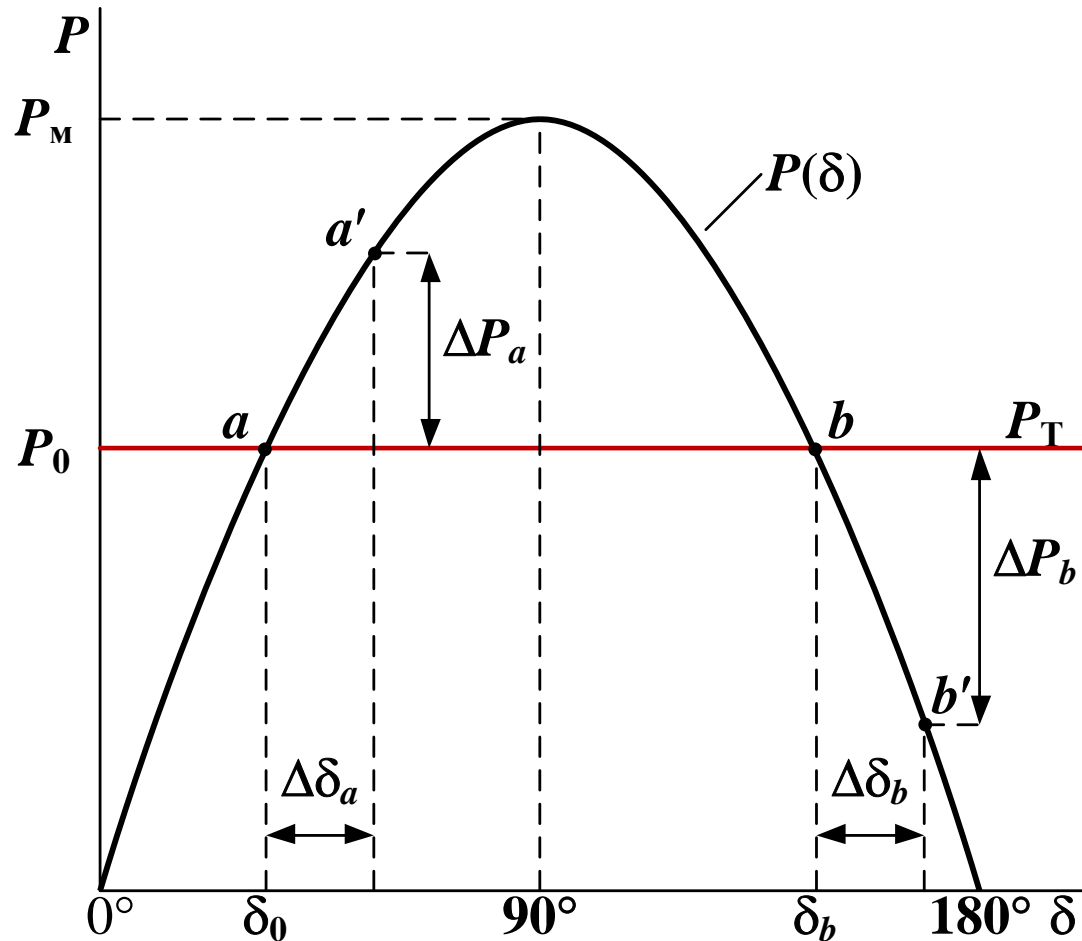


Рис. 2.3. Угловая характеристика генератора

В установившемся режиме генератор передаёт мощность P_0 равную мощности турбины P_T , что обеспечивает баланс моментов и вращение генератора происходит с постоянной скоростью. Как видно на **рис. 2.3**, есть две точки (**a** и **b**) равновесного состояния.

Возникает вопрос о возможности устойчивой работы в каждой из этих точек.

Допустим, что установившийся режим генератора характеризуется точкой **«a»**. При случайном увеличении мощности генератора на величину ΔP_a и соответствующем увеличении угла на величину $(\Delta \delta_a)$ нарушится равенство моментов, действующих на вал, причём тормозящий электромагнитный момент генератора окажется больше ускоряющего момента турбины.

Под действием избыточного тормозящего момента начнётся замедление движения ротора, сопровождаемое уменьшением угла и отдаваемой в сеть активной мощности генератора. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не восстановится равенство ускоряющего и тормозящего моментов, то есть пока система не возвратится к исходному режиму, характеризуемому точкой «а». **Таким образом, при работе в точке «а» режим энергосистемы статически устойчив.**

Статической устойчивостью называется способность системы самопроизвольно восстанавливать исходное или близкое к исходному состояние после незначительного и кратковременного возмущения.

При работе в точке «b» незначительное увеличение угла сопровождается уменьшением отдаваемой в сеть активной мощности. При случайном переходе в точку (b') мощность турбины окажется больше мощности генератора на величину (ΔP). Соответственно, ускоряющий механический момент турбины окажется больше тормозящего электромагнитного момента генератора, вследствие чего ротор генератора будет ускоряться. Это приведёт к увеличению угла (δ) и, как следствие, к увеличению небаланса (ΔP_b) мощностей (моментов). Дальнейшее развитие процесса имеет лавинообразный характер и завершается **выпадением удалённого генератора из синхронизма** с генераторами приёмной энергосистемы т.е. режим в точке «b» статически неустойчив.

В любой точке восходящей ветви угловой характеристики случайно возникающий небаланс мощности (ΔP) и соответствующее ему приращение угла ($\Delta \delta$) имеют одинаковые знаки, их отношение ($\Delta P / \Delta \delta > 0$) положительно и может рассматриваться как формальный признак устойчивости.

При бесконечно малых приращениях получаем:

$$\frac{dP}{d\delta} > 0, \quad (2.2)$$

что является практическим критерием статической устойчивости одномашинной энергосистемы.

Производная $dP / d\delta$ называется ***синхронизирующей мощностью***. Она вычисляется по формуле

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E U}{x} \cos \delta \quad (2.3)$$

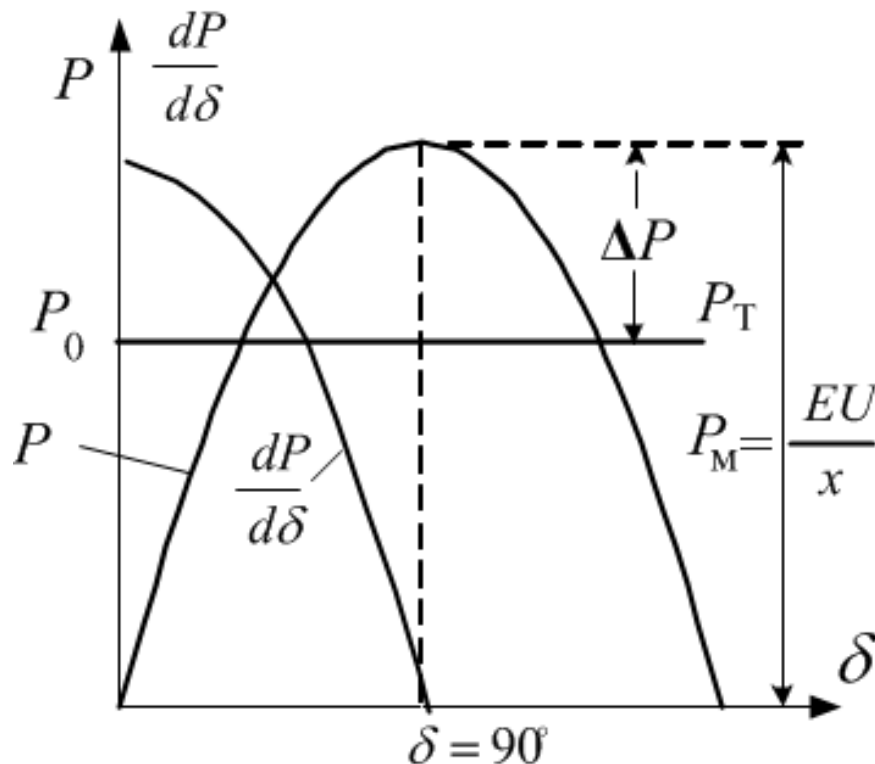
Предельному по условиям статической устойчивости режиму соответствует

$$\frac{dP}{d\delta} = 0.$$

В этом режиме предельный угол $\delta_{пр} = 90^\circ$, который определяет максимум передаваемой мощности:

$$P_M = \frac{EU}{x} \sin 90^\circ = \frac{EU}{x}.$$

В реальных условиях предусматривают запас по загрузке генератора, характеризуемый **коэффициентом запаса статической устойчивости**



$$K_3 = \frac{P_M - P_0}{P_0} = \frac{\Delta P}{P_0}.$$

Нормативный $K_3 \geq 20\%$

5. Влияние промежуточных подключений на статическую устойчивость генератора

При значительной протяженности высоковольтной электропередачи (200 км и более) в промежуточных точках линий, как правило, подключаются различные элементы. Это могут быть шунтирующие реакторы, емкостные поперечные компенсирующие устройства, управляемые источники реактивной мощности др. Эти подключения оказывают влияние на статическую устойчивость электропередач.

Оценим влияние наиболее распространённых подключений.

5.1. Влияние шунтирующего реактора (ШР)

(ШР) используются для компенсации избыточной реактивной мощности, генерируемой линиями электропередачи (рис.2.4).

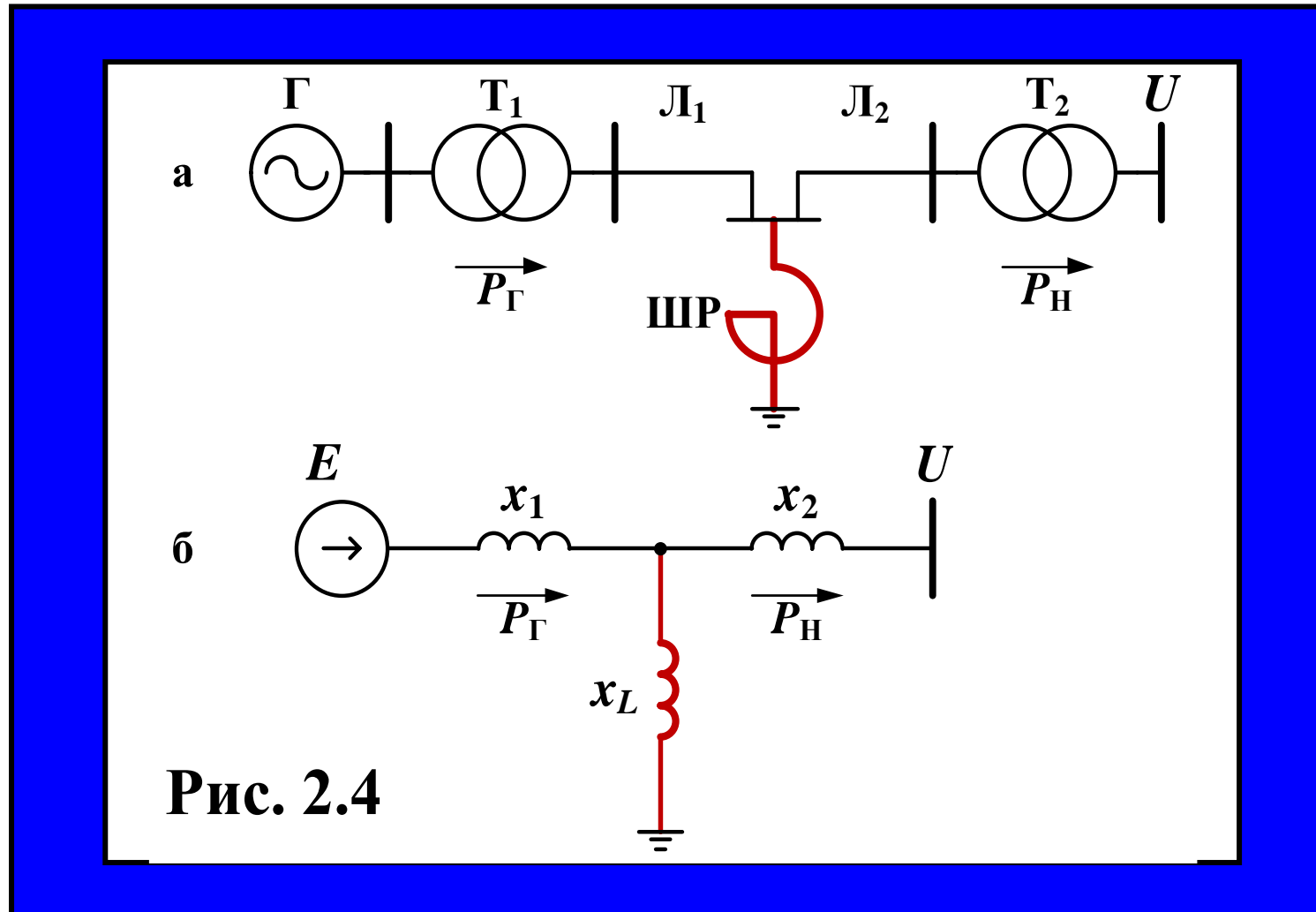


Рис. 2.4

Подключение ШР в промежуточной точке электрической связи одномашинной энергосистемы (**рис. 2.6,а**) вносит дополнительное индуктивное сопротивление в схему замещения (**рис. 2.4,б**). Это отражается на сопротивлении связи генератора с приемной системой.

Предел передаваемой мощности электропередачи определяется выражением (2.4)

$$P_M = \frac{E U}{x_{св}}, \quad (2.4)$$

где $x_{св}$ - взаимное сопротивление между узлами E и U .

При отсутствии реактора имеем:

$$x_{св} = x_1 + x_2.$$

При подключенном реакторе посредством преобразования «звезды сопротивлений» x_1 , x_2 , x_L в эквивалентный «треугольник» получаем сопротивление связи генератора с приемной системой:

$$x_{\text{св}(L)} = x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_L,$$

где x_L - реактивное сопротивление реактора.

Поскольку $x_{\text{св}(L)} > x_{\text{св}}$, то $P_{\text{M}(L)} < P_{\text{M}}$, и,

следовательно, **подключение реактора снижает предел передаваемой мощности электропередачи.**

5.2. Влияние конденсаторной батареи (КБ)

Конденсаторные батареи (КБ) устанавливаются в промежуточных точках ЛЭП для поддержания нормальных уровней U при передаче больших потоков мощности. Оценим влияние КБ на P_M энергосистемы (рис. 2.5).

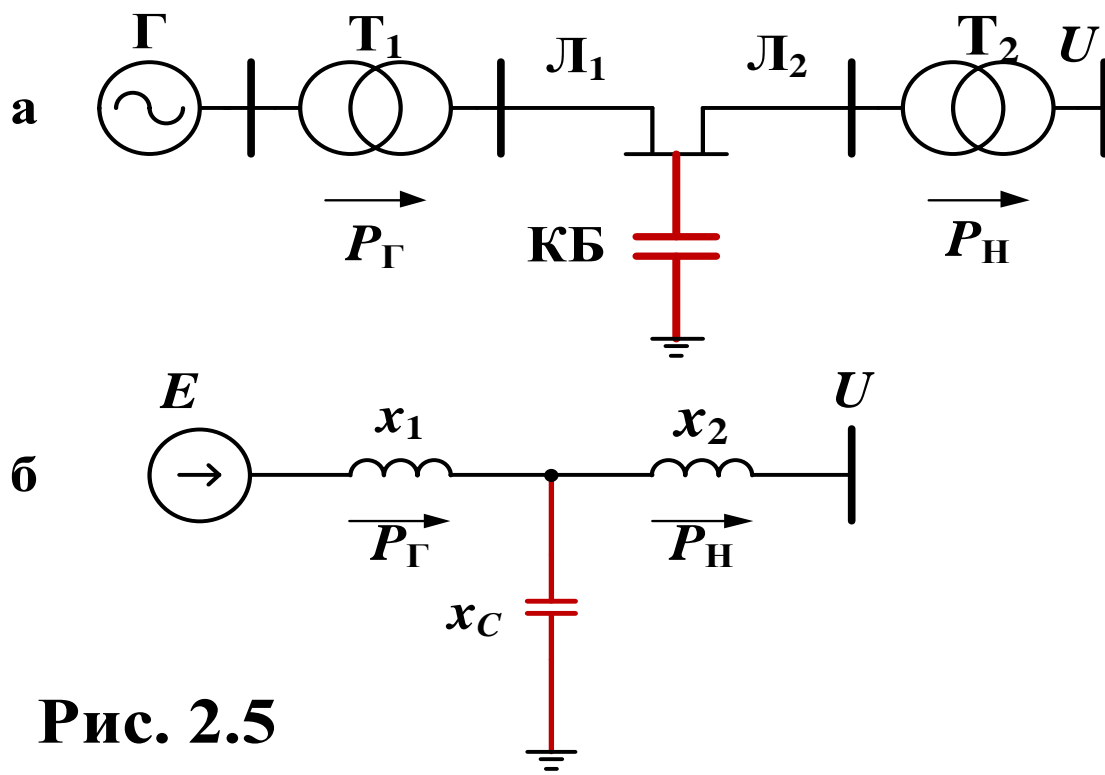


Рис. 2.5

Как и прежде, при отсутствии реактора имеем взаимное сопротивление связи x_{CB} между узлами E и U

$$x_{CB} = x_1 + x_2.$$

При подключенной конденсаторной батарее в на основе электрической схемы замещения посредством преобразования «звезды сопротивлений» x_1 , x_2 , $-x_c$ в эквивалентный «треугольник» получаем сопротивление связи генератора с приемной системой:

$$x_{CB(c)} = x_1 + x_2 - x_1 x_2 / x_c,$$

где $-x_c$ - реактивное сопротивление КБ.

Поскольку $x_{CB(c)} < x_{CB}$, то $P_{M(c)} > P_M$, и, следовательно

подключение конденсаторной батареи повышает предел передаваемой мощности электропередачи.

КОНЕЦ РАЗДЕЛА № 2

**Статическая устойчивость
простейшей энергосистемы**

РАЗДЕЛ № 3

Статическая устойчивость нагрузки

1. Общие сведения о нагрузке

синхронные (АД) и асинхронные (АД)

СД
режим. АД *перехода в асинхронный*
их останов. *является*

2. Статическая устойчивость асинхронного двигателя

Статическая устойчивость асинхронного двигателя определяется относительным движением, обусловленного взаимодействием вращающего момента АД ($M_{ад}$) и момента сопротивления приводного механизма ($M_{мех}$).

Статической устойчивостью асинхронных двигателей называется способность АД самопроизвольно восстанавливать исходное или близкое к исходному состояние после незначительного и кратковременного возмущения.

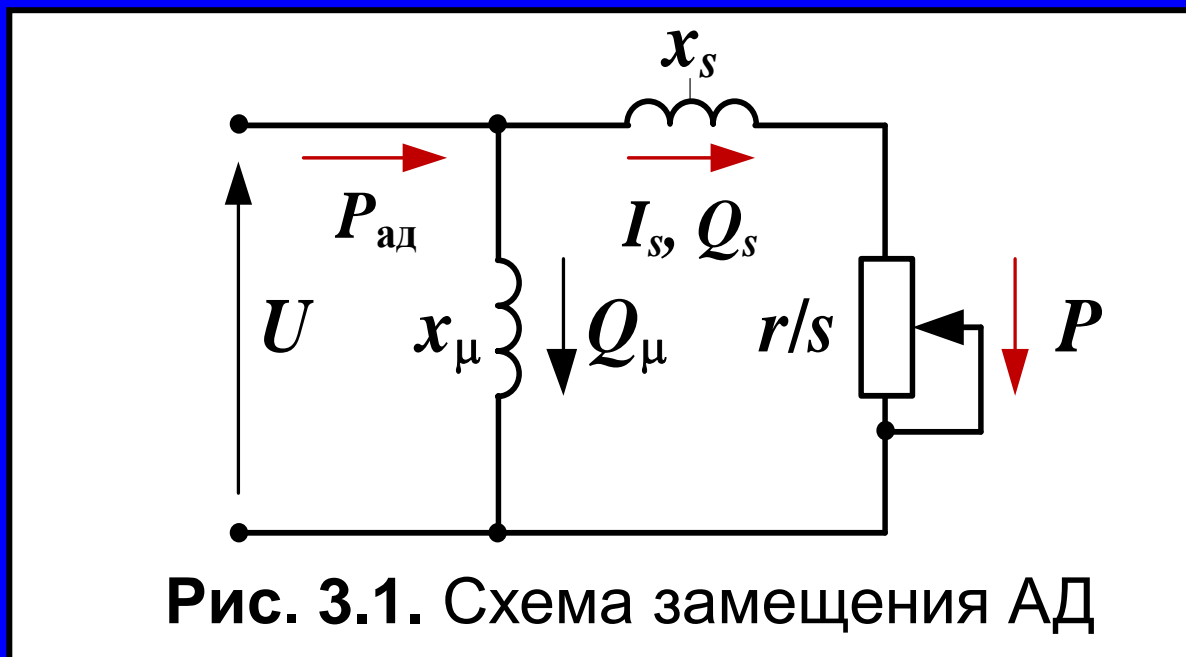
Принципиальное отличие асинхронного двигателя от синхронного двигателя заключается в том, что его ротор вращается несколько медленнее ($\omega_{ад}$), чем электромагнитное поле статора (ω_c), т. е. имеет место скольжение (S)

$$S = \frac{\omega_c - \omega_{ад}}{\omega_c}.$$

В системе относительных единиц справедливо равенство:

$$M_{мех} = P_{мех}; \quad M_{ад} = P_{ад}.$$

Характеристика электромагнитной мощности двигателя определяется параметрами его схемы замещения. В упрощенном виде такая схема приведена на **рис. 3.1**.



x_s

– сопротивление рассеяния ;

r / s

– активное сопротивление ;

x_μ

– сопротивление намагничивания;

Выражение электромагнитной мощности вытекает из схемы замещения и соответствует активной мощности, выделяемой на сопротивлении r / s

$$P_{\text{ад}} = I_s^2 \frac{r}{s} = \frac{U^2}{x_s^2 + (r/s)^2} \cdot \frac{r}{s}$$

или

$$P_{\text{ад}} = \frac{U^2 sr}{(x_s^2 s^2 + r^2)} \quad (3.1)$$

Как следует из (3.1), электромагнитная мощность АД является функцией напряжения и скольжения $P_{\text{ад}}(U, s)$.

На **рис.3.2.** приведены две характеристики: электромагнитной мощности АД ($P_{\text{ад}}(s)$ при фиксированном значении напряжения $U = \text{const}$) и тормозной мощности приводного механизма $P_{\text{мех}}(s)$.

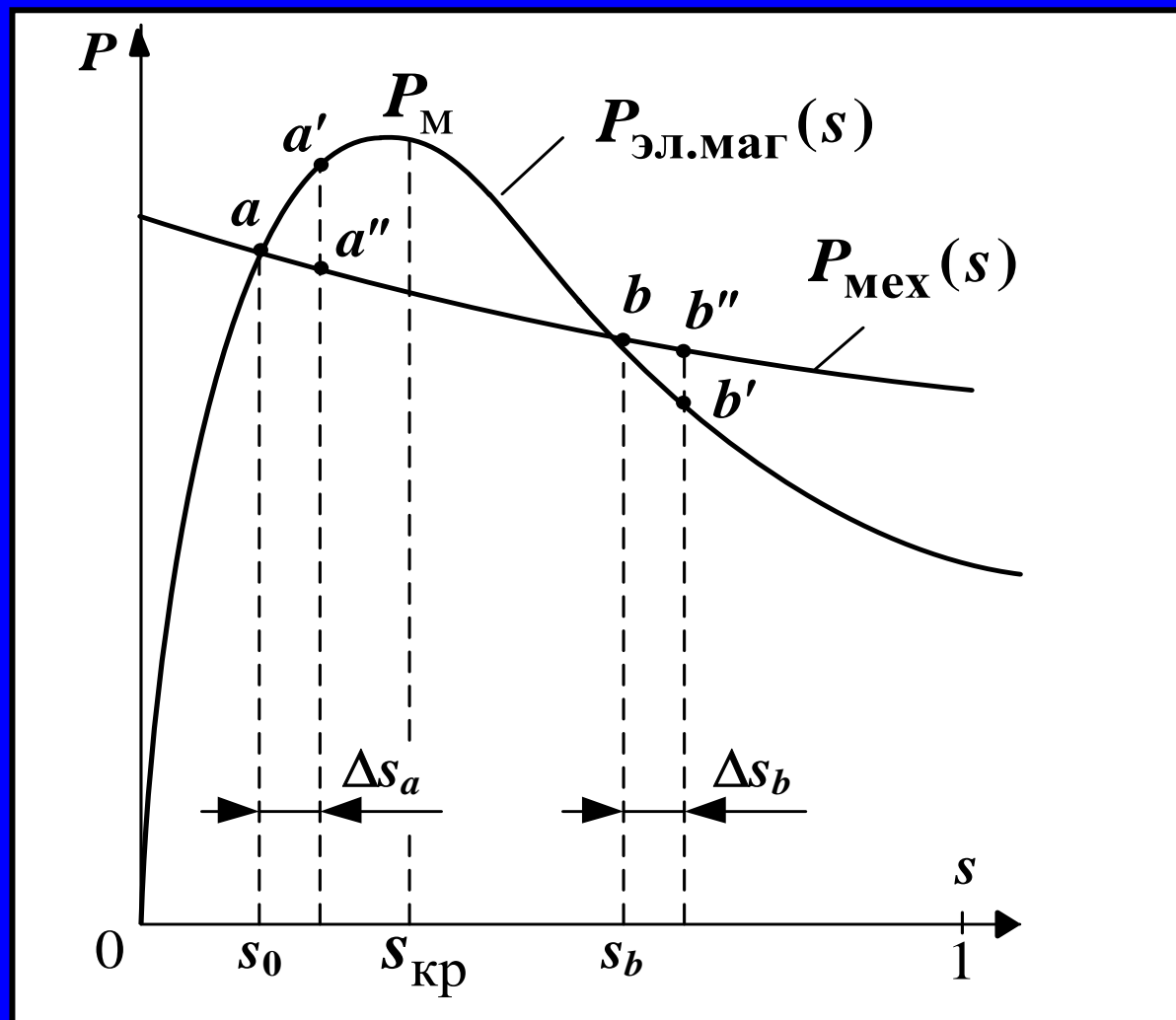


Рис. 3.2. Характеристики АД: $P_{\text{ад}}(s), P_{\text{мех}}(s)$

Условию стационарности отвечает равенство: $P_{ад}(s) = P_{мех}(s)$, которое выполняется в двух точках « a » и « b » на рис.3.2 ; однако устойчивому состоянию отвечает только точка « a », расположенная на восходящей ветви характеристики электромагнитной мощности $P_{ад}(s)$.

Действительно, если в точке « a » произойдет незначительное случайное отклонение скольжения на величину Δs_a , то на валу ротора двигателя возникнет избыточный ускоряющий момент $\Delta P_a = P_{a'} - P_{a''}$, который приведет к увеличению скорости вращения ротора и соответствующему уменьшению скольжения до величины s_0 .

В точке «*b*» при отклонении s на величину Δs_b избыточный момент будет тормозящим $\Delta P_b = P_{b'} - P_b''$ вследствие превышения $M_{\text{мех}}$ над электромагнитным $M_{\text{ад}}$ и, поэтому, скорость ротора двигателя будет уменьшаться, скольжение - увеличиваться и двигатель остановится. Следовательно, **в точке «*b*» режим двигателя неустойчив.**

Отметим, что небаланс мощностей при отклонениях скольжения относительно значений s_0 образуется за счет $\Delta P_{\text{ад}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$ и составляет: $\Delta P_{\text{нб}} = \Delta P_{\text{ад}} - \Delta P_{\text{мех}}$.

В точке «*a*» приращения $\Delta P_{\text{нб}}$ и Δs положительны, поэтому

$$\Delta P_{\text{нб}} / \Delta s = (\Delta P_{\text{ад}} - \Delta P_{\text{мех}}) / \Delta s > 0.$$

При бесконечно малых приращениях получаем **критерий статической устойчивости асинхронного двигателя:**

$$\left(\frac{d P_{\text{ад}}}{ds} - \frac{d P_{\text{мех}}}{ds} \right) \geq 0. \quad (3.2)$$

На практике используется **упрощённый критерий статической устойчивости АД**, соответствующий условию $P_{\text{мех}} = \text{const}$

$$\boxed{\frac{dP_{\text{ад}}}{ds} = \frac{dP}{ds} \geq 0.} \quad (3.3)$$

Границе устойчивости отвечает условие $dP/ds = 0$:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{U^2 sr}{x_s^2 s^2 + r^2} \right) = U^2 r \frac{(x_s^2 s^2 + r^2) - 2x_s^2 s^2}{(x_s^2 s^2 + r^2)^2} = 0 \quad \text{откуда} \quad (r^2 - x_s^2 s^2) = 0,$$

что дает **критическое скольжение** $s_{\text{кр}}$ (рис.3.3), которое определяется **параметрами схемы замещения**

$$\boxed{s = s_{\text{кр}} = r / x_s.} \quad (3.4)$$

Подставляя $s_{\text{кр}}$ в $P_{\text{ад}}(U, s)$, получаем **максимальную мощность**

$$\boxed{P_{\text{м}} = \frac{U^2}{2x_s}.} \quad (3.5)$$

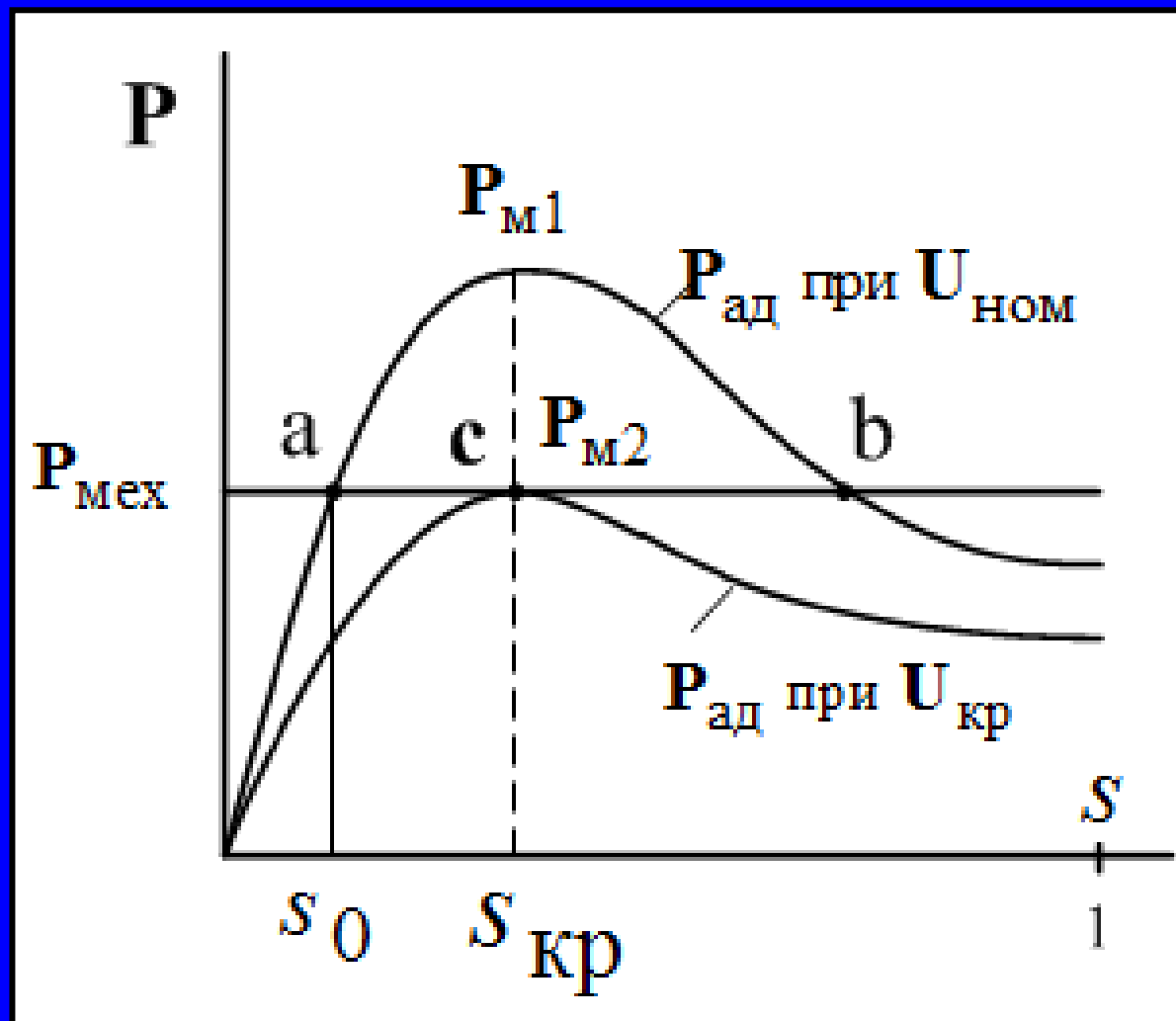


Рис. 3.3. К определению критического напряжения АД

При $U = U_{\text{ном}}$ максимальная мощность АД $P_{\text{М1}}$ (рис.3.3) приблизительно вдвое превышает $P_{\text{мех}}$, что обеспечивает достаточный запас статической устойчивости.

С уменьшением напряжения величина $P_{\text{М}}$ быстро падает по квадратичной зависимости (3.5). При некотором напряжении $U = U_{\text{кр}}$ характеристика электромагнитной мощности касается механической характеристики, т.е. $P_{\text{М2}} = P_{\text{мех}}$. Двигатель оказывается на пределе статической устойчивости (рис. 3.3).

Критическое напряжение находится из (3.5), при условии: $P_M = P_{\text{мех}}$, что дает

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2P_{\text{мех}}x_s}. \quad (3.6)$$

Оценим величину критического напряжения, считая, что в режиме $U_{\text{ном}}$ имеется **100 %** запас, т.е.

$$P_{M(\text{ном})} / P_{\text{мех}} = 2.$$

В соответствии с этим $P_{M(\text{ном})} / P_{M(\text{кр})} = \frac{U_{\text{ном}}^2 / 2x_s}{U_{\text{кр}}^2 / 2x_s} = 2,$

которое дает

$$U_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{2}} \approx 0,71U_{\text{ном}}.$$

3. Вторичный признак (критерий) статической устойчивости АД

Соответственно схеме замещения (рис. 3.4) реактивная мощность $Q_{ад}$, потребляемая асинхронным двигателем, представляет собой сумму двух составляющих (рис. 3.6.):

$$Q_{ад} = Q_{\mu} + Q_s = \frac{U^2}{x_{\mu}} + I_s^2 x_s$$

или

$$Q_{ад} = \frac{U^2}{x_{\mu}} + \frac{U^2 s^2 x_s}{(x_s^2 s^2 + r^2)}. \quad (3.7)$$

Составляющая Q_{μ} является квадратичной. При построении составляющей Q_s следует учитывать изменение скольжения S в зависимости от напряжения U (рис. 3.5).

При снижении напряжения до величины U_m , соответствующей точке « m », происходит нарушение статической устойчивости двигателя (останов двигателя). Этот процесс называется **опрокидыванием асинхронного двигателя**.

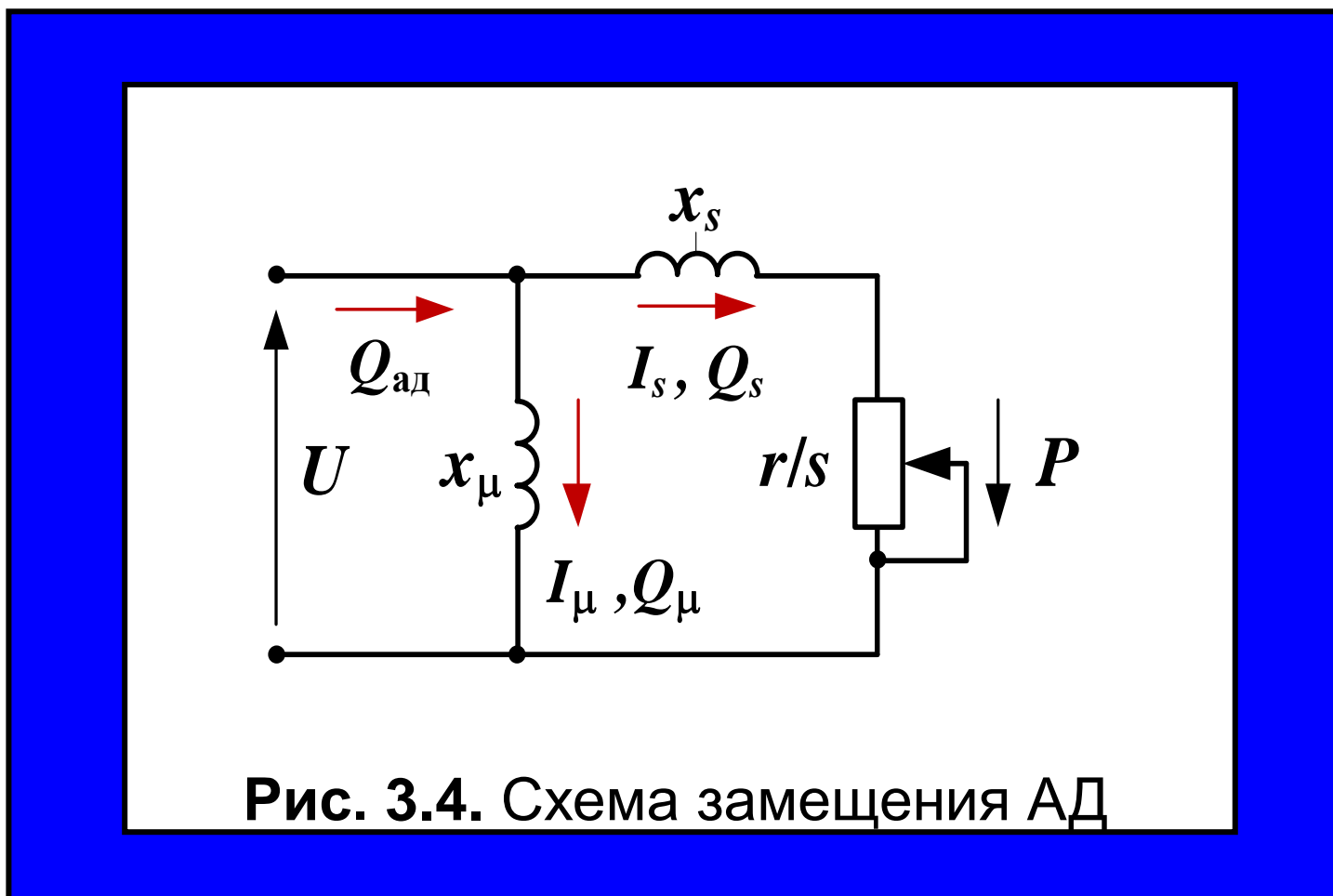


Рис. 3.4. Схема замещения АД

Полученный ранее критерий устойчивости $dP/ds \geq 0$ на деле приемлем только для одиночного АД. При наличии в узле нескольких одиночных АД замена их одним эквивалентным практически затруднено, поскольку не удастся для него определить эквивалентные параметры. Для решения такой задачи наиболее приемлемым является использование статических характеристик нагрузки $Q_{ад}(U)$ по напряжению. Использование этих характеристик не исключает из рассмотрения скольжений, характер изменения которых позволяет, в сущности, судить об устойчивости двигателей. Построение статической характеристики $Q_{ад}(U)$, как отмечалось ранее, учитывает изменение скольжения в соответствии с функционалом $P_{ад}(U, s)$ (рис.3.5).

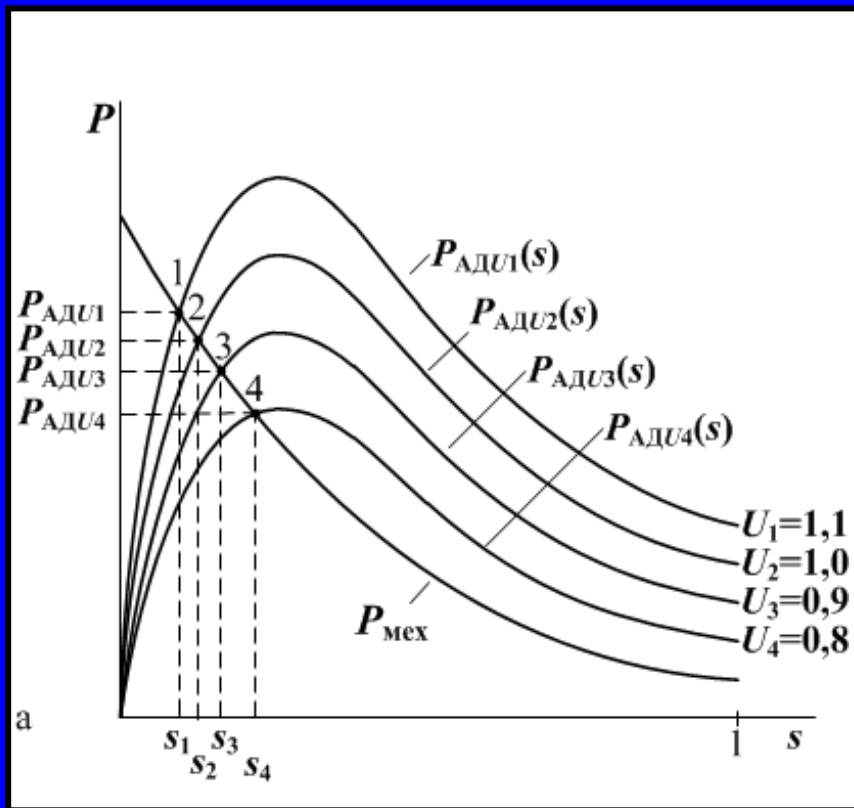


Рис. 3.5. Статические характеристики электромагнитной $P_{ад}(s)$ и механической $P_{мех}(s)$ мощностей АД;

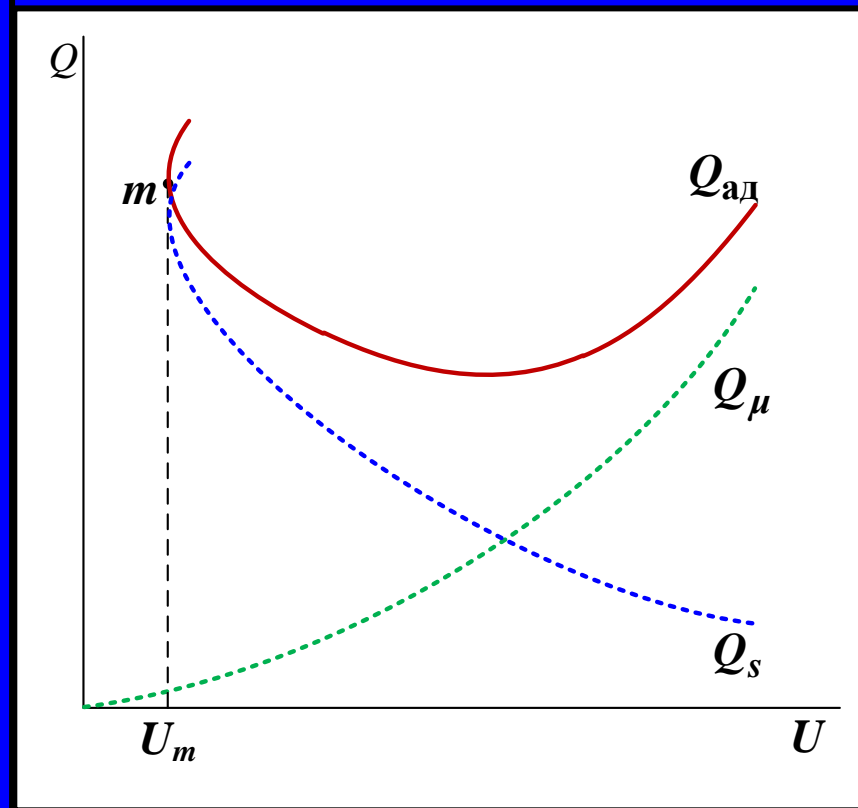


Рис. 3.6. Статические характеристика АД: $Q_{ад}(U)$ и её составляющие $Q_{μ}$, Q_s

Получение эквивалентной статической характеристики реактивной мощности от напряжения не встречает принципиальных затруднений, т.к.

$$Q_{\Sigma}(U) = \Sigma Q_i(U). \quad (3.8)$$

Принципиальным в этом вопросе является то, что имеется соответствие между **особыми** или **критическими** точками характеристик $Q_{ад}(U)$ и $P_{ад}(s)$.

Особыми на этих характеристиках является экстремальная точка «**c**» на **рис. 3.8**, в которой $dP/ds = 0$ при $U = U_{кр}$ и точка «**c'**» на **рис. 3.7**, в которой $dQ_{адU}/dU \rightarrow \infty$ также при $U = U_{кр}$.

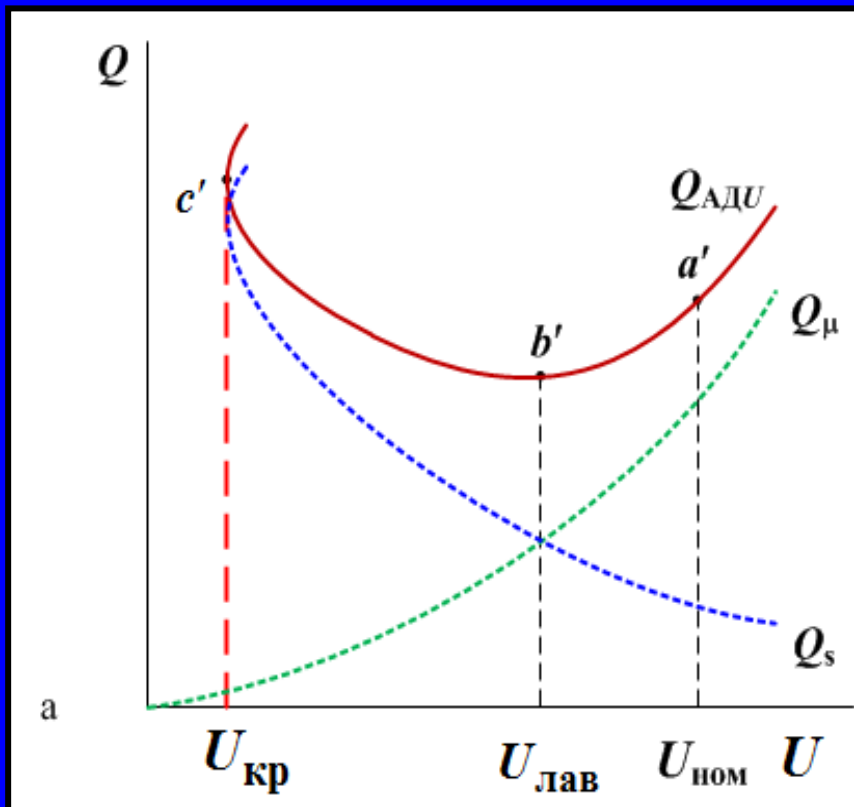


Рис. 3.7. Статическая характеристика $Q_{ад}(U)$ АД

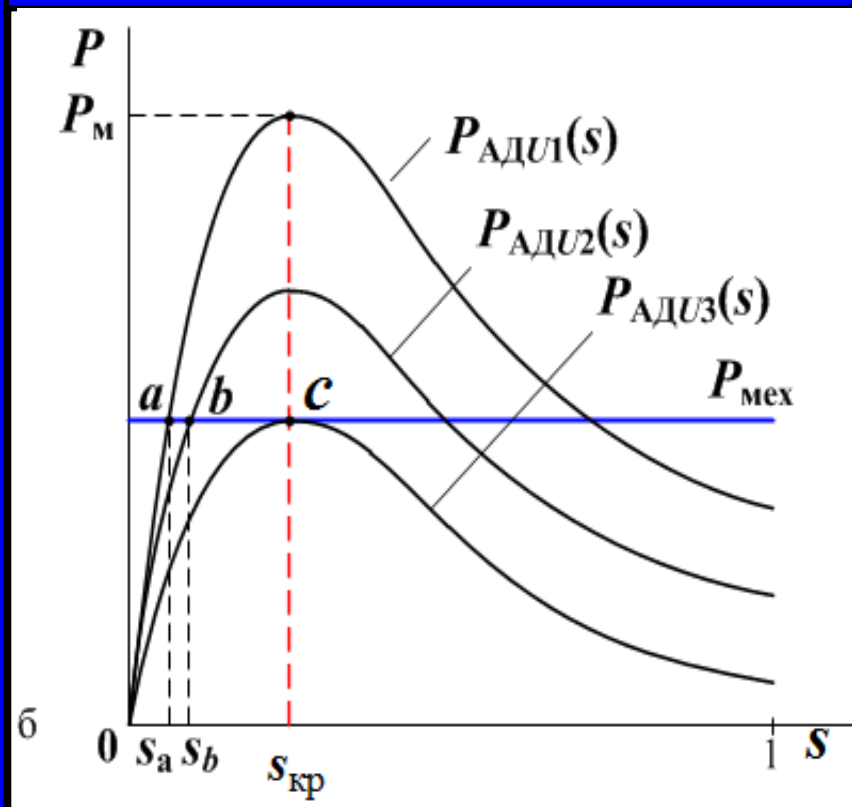


Рис. 3.8. Статические характеристики $P_{ад}(s)$ АД

Поэтому в качестве вторичного условия для определения предела статической устойчивости асинхронного двигателя может использоваться **практический критерий**

$$\boxed{dQ_{адU} / dU \rightarrow \infty.} \quad (3.9)$$

Принципиально важной на характеристике $Q_{ад}(U)$ является точка « b' » (рис. 3.7), в которой $dQ_{ад} / dU = 0$ при $U = U_{лав}$ т.е. в этой точке меняется знак производной $dQ_{*ад} / dU_{*}$ (**регулирующего эффекта**). В результате чего дальнейшее снижение напряжения сопровождается увеличением потребляемой реактивной мощности **АД**. Это, в свою очередь, приводит к увеличению потери напряжения в элементах питающей электрической сети и, как следствие, к дальнейшему снижению U в узле нагрузки.

Такая взаимосвязь между увеличением потребляемой реактивной мощности и увеличением потерь напряжения может привести к явлению, известному как **лави́на напряжения**. При значительной мощности АД в нагрузочном в узле появление лавины напряжения может спровоцировать нарушение статической устойчивости асинхронных двигателей.

Устойчивость узла нагрузки со значительным составом асинхронных двигателей оценивается коэффициентом запаса устойчивости по напряжению, определяемому как:

$$k_U = \frac{U - U_{кр}}{U}, \quad (3.10)$$

где $U_{кр}$ - длительно поддерживаемое напряжение в узловой точке системы.

Регламентируемая величина этого коэффициента в нормальных режимах должна быть не менее **15 %**

КОНЕЦ РАЗДЕЛА № 3

**Статическая устойчивость
нагрузки**

РАЗДЕЛ № 4

Переходные процессы в узлах нагрузки при больших возмущениях

1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Коммутационные переключения на шинах трансформаторных подстанций, питающих системы электроснабжения, **КЗ** в электроустановках и внутренних распределительных сетях, отключения и пуски крупных электродвигателей, действие мощных электроустановок с повторно - кратковременной нагрузкой являются **большим возмущающим воздействием**.

При таких сильных и длительных возмущениях поведение **СД** и **АД** следует рассматривать **в функции времени**, что собственно, и характеризует **динамический процесс**.

Устойчивостью АД двигателей при больших возмущающих воздействиях является способность возвращаться в исходное, или близкое к исходному, состояние.

2. УСЛОВИЯ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Самозапуском асинхронного двигателя называют процесс восстановления нормальной работы после кратковременного исчезновения или снижением напряжения питания.

Рассмотрим процесс движения АД при кратковременном снижении питающего напряжения, которому соответствует характеристика $P_{\text{АД}(U_2)}(s)$ (рис.4.1).

Под воздействием избыточного момента тормозящего характера $\Delta P = [P_{\text{мех}} - P_{\text{АД}(U_2)}(s)]$ скорость АД снижается, а скольжение (s) увеличивается; процесс идет по характеристике $P_{\text{АД}(U_2)}(s)$ в направлении точки « b' ».

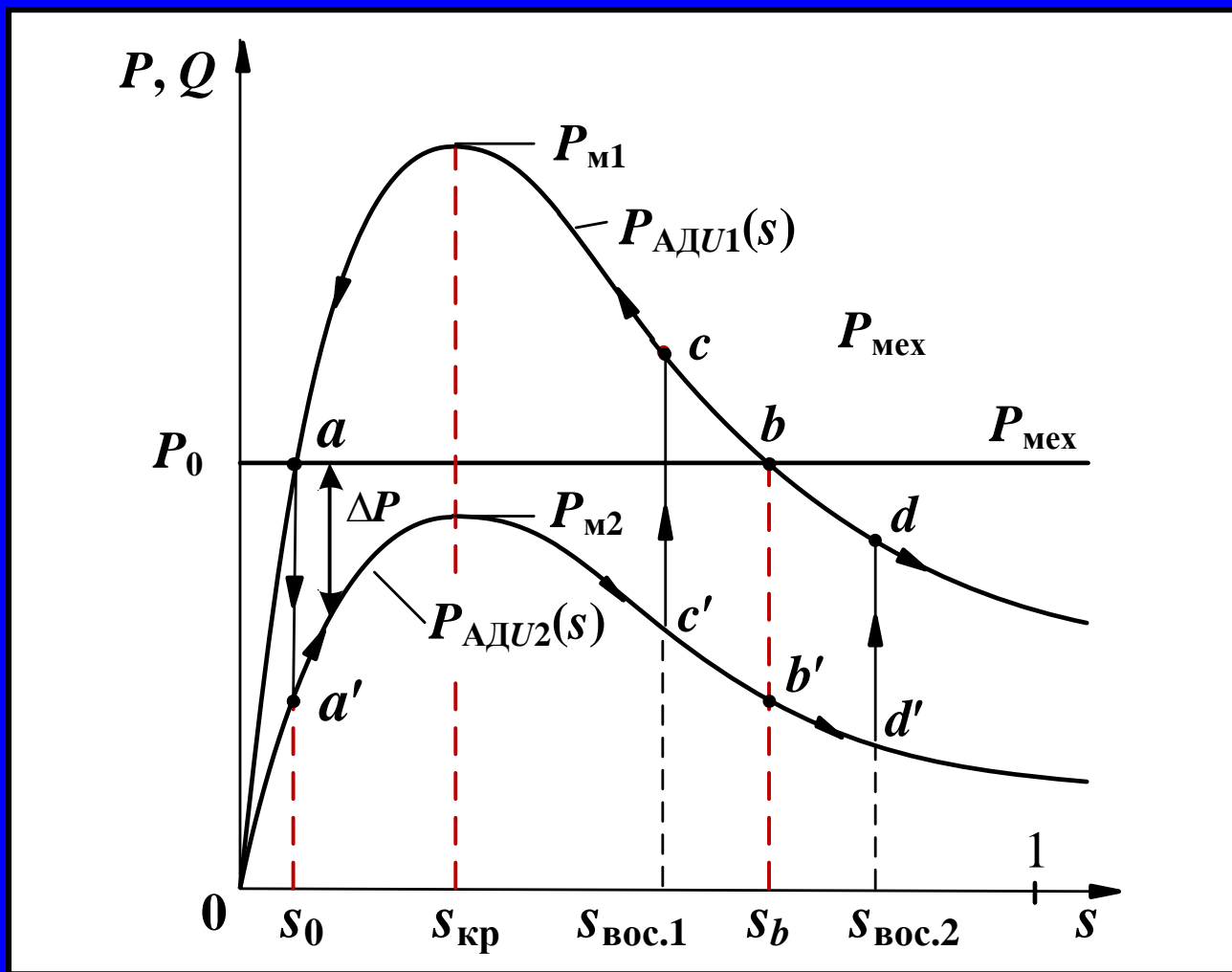


Рис. 4.1. Работа АД при кратковременном снижении питающего напряжения

Если к моменту восстановления напряжения (U_1) достигнута точка « d' », в которой $S_{\text{вос.2}} > S_b$, то **самозапуск не возможен**, поскольку двигатель попадает на неустойчивую часть характеристики $P_{\text{АД}(U_1)}(s)$ (рис.4.1) и останавливается.

Условия самозапуска выполняются если к моменту восстановления напряжения (U_1) скольжение было $S_{\text{вос.1}} < S_b$. В следствие этого, электромагнитный момент $P_{\text{АД}(U_1)}(s)$ в точке « c » является больше механического $P_{\text{мех}}$.

Из этих рассуждений следует, что **математическим условием успешного самозапуска асинхронного двигателя может служить неравенство:**

$$S_{\text{вос.1}} \leq S_b.$$

3. СХЕМЫ ПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Пуск двигателей - это процесс перехода двигателей из неподвижного состояния в состояние вращения с номинальной скоростью. Пуск двигателей относится к числу нормальных переходных процессов.

При проектировании электропривода и выборе соответствующего двигателя проверяют его возможность «развернуть» присоединенный к нему механизм, т.е из состояния покоя при $\omega = 0$ достичь номинальной скорости $\omega = \omega_{ном}$, для этого:

- определяют время пуска двигателя;
- проверяют допустимость продолжительности процесса пуска;
- проверяют плавность пуска (что особенно важно, например, для подъёмных кранов и печатных машин);
- определяют нагрев двигателя при пуске;
- находят величину ускорения и или его постоянство при пуске (что желательно для ряда механизмов, например, для пассажирских лифтов).

Во время пуска двигатель должен развивать вращающий момент, необходимый, во-первых, для преодоления момента сопротивления механизма, и, во вторых, для создания определенной кинетической энергии вращающихся масс агрегата.

Кратность пускового тока у АД при **реостатном пуске** (для двигателей с фазным ротором) составляет $I^*_{\text{пус.}} = 1,5 - 2,0$ и $I^*_{\text{пус.}} = 5 - 8$ – при пуске АД **с короткозамкнутым ротором**.

Условия пуска обычно разделяют на **лёгкие, нормальные и тяжёлые.**

При **лёгких условиях пуска** требуемый момент в начале вращения двигателя составляет

$$M_{(0)\text{пус.}} = (10 - 50)\% M_{\text{пус.}(\text{ном})}.$$

К **нормальным условиям пуска** относят такие, при которых механизм требует

$$M_{(0)\text{пус.}} = (50 - 75)\% M_{\text{пус.}(\text{ном})}.$$

При **тяжелых условиях пуска**

$$M_{(0)\text{пус.}} = (75 - 100)\% M_{\text{пус.}(\text{ном})}.$$

Тяжелые условия пуска имеют такие механизмы как компрессоры, дробильные барабаны, различные устройства для перемешивания, а также насосы с открытой задвижкой и приводы со значительным моментом инерции.

Для облегчения тяжёлых условий пуска в некоторых приводах применяются специальные механические средства: центробежные, сцепные ферромагнитные или гидравлические муфты, с помощью которых двигатель принимает нагрузку лишь после того, как он достиг нужной скорости и стал развивать надлежащий вращающий момент.

Для управления пуском и ограничения пускового тока может применяться пускорегулирующая аппаратура и специальные схемы пуска.

Автотрансформаторный пуск АД

осуществляется по схеме, показанной на рис. 4.2,а. Сначала включается нулевой выключатель **В1**, затем **В2**, присоединяющий автотрансформатор к сети. Так как на двигатель подается пониженное через автотрансформатор напряжение, он разгоняется, потребляя сравнительно небольшой ток. При достижении **АД** близкую к номинальной скорость, отключается выключатель **В1** и включается шунтирующий выключатель **В3**, который подаёт на двигатель нормальное напряжение.

Пуск через автотрансформатор применяется редко, поскольку наличие пускового автотрансформатора является дополнительной причиной возникновения аварий и такая установка довольно дорога.

Реакторный пуск асинхронного двигателя

осуществляется по схеме (рис. 4.2,б). Пусковой реактор ограничивает величину пускового тока и снижает напряжение на двигателе при пуске за счёт падения напряжения в реакторе. В начале пуска шунтирующий выключатель **В2** отключен.

Включением **В1** асинхронный двигатель подключается к сети через реактор. По мере разгона **АД** ток снижается, что приводит к уменьшению падения напряжения на реакторе и, следовательно, напряжение на двигателе повышается. При достижении скорости близкую к номинальной включением **В2** шунтируется реактор.

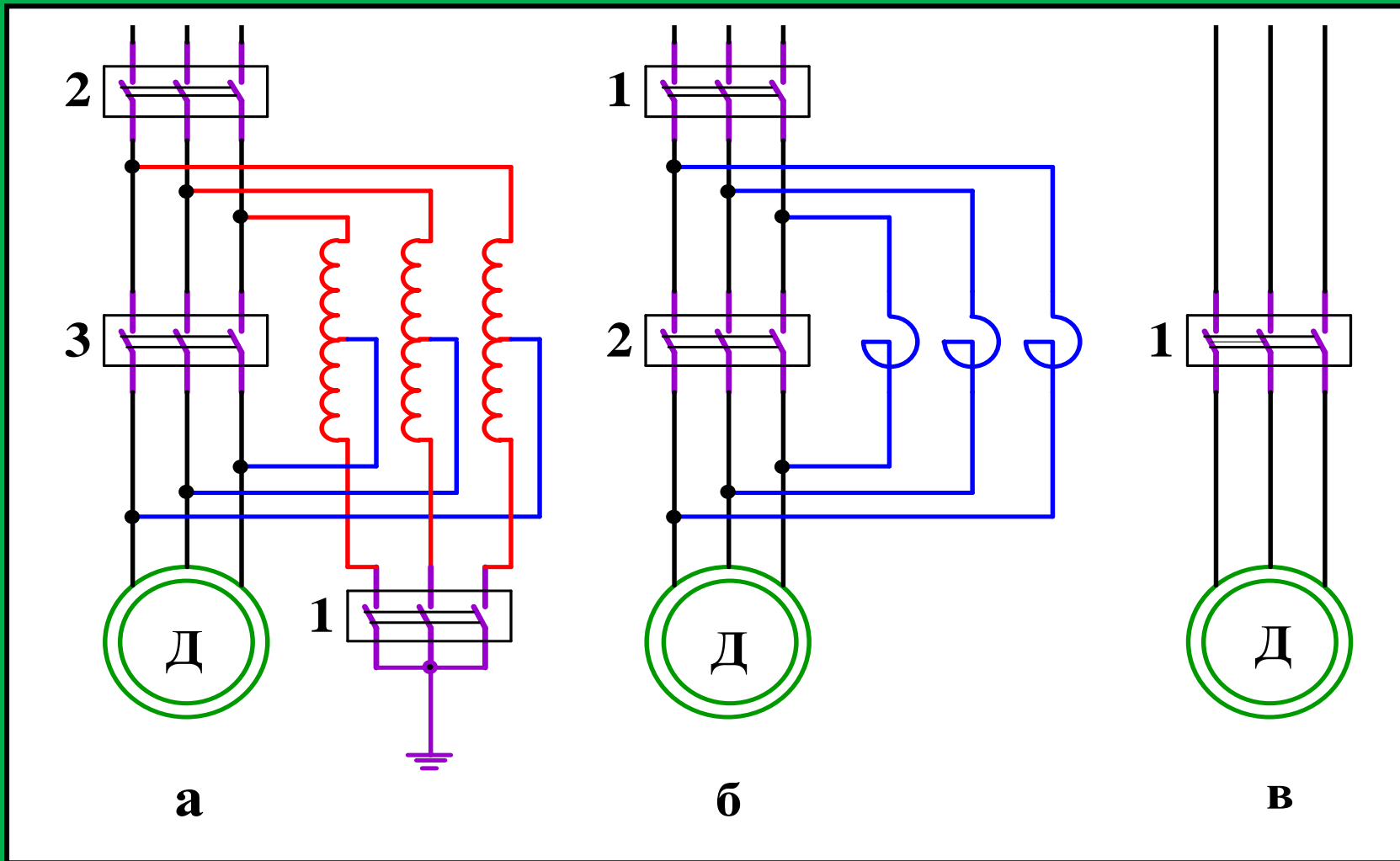


Рис. 4.2. Схемы пуска двигателей:

а – автотрансформаторный пуск;

б – реакторный пуск; в – прямой пуск

Величина сопротивления реактора x_P определяется по выражению:

$$x_P = U_{\text{НОМ}} \left(\frac{1}{I_{\text{пуск. (мин)}}} - \frac{1}{I_{\text{пуск. (НОМ)}}} \right), \quad (4.1)$$

где $I_{\text{пуск. (мин)}}$ – величина, до которой необходимо ограничить реактором пусковой ток ;
 $I_{\text{пуск. (НОМ)}}$ – номинальный пусковой ток двигателя;
 $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети.

Реакторный пуск приводит не только к снижению пускового тока, но и пускового момента $M_{\text{пуск. (с/р)}}$ Вследствии снижения напряжения на клеммах **АД** в момент пуска до уровня U_D за счет падения напряжения на реакторе $\Delta U_P = x_P \cdot I_{\text{п(с/р)}}$ (рис.4.3).

В соответствии со схемой замещения при реакторном пуске (рис.4.3) напряжение на выводах асинхронного двигателя составляет:

$$U_{\text{Д}} = U_{\text{НОМ}} - x_{\text{Р}} \cdot I_{\text{пуск.}(с/р)}$$

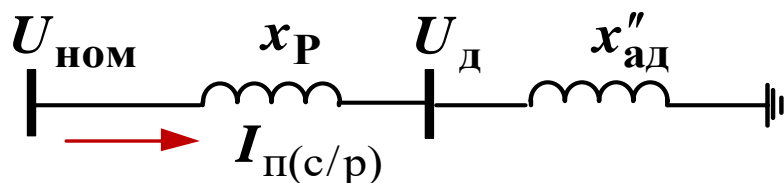


Рис.4.3. Схема замещения пуска АД с реактором

Связь пускового момента при реакторном пуске $M_{\text{пуск.}(с/р)}$ с номинальным пусковым моментом $M_{\text{пуск.}(ном)}$ определяется соотношением:

$$M_{\text{пуск.}(с/р)} = M_{\text{пуск.}(ном)} \left(\frac{U_{\text{Д}}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2. \quad (4.2)$$

Реакторный пуск применяют при необходимости значительного снижения пускового тока и достаточности для пуска $M_{\text{пуск}(с/р)} \approx M_{\text{мех}}$ при $s = 1$.

Прямой пуск асинхронного двигателя

осуществляется по схеме, показанной на **рис. 4.2,в.** Двигатель включается на полное напряжение сети с помощью выключателя **В1**. Под действием асинхронного момента двигатель выходит на рабочий режим.

4. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрим общий подход к расчёту времени пуска двигателя как к одному из важнейших процессов в системе электроснабжения.

Движение ротора асинхронного двигателя описывается дифференциальным уравнением, которое, подобно дифференциальному уравнению (1.1) для генератора, записывается так:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta M, \quad (4.3)$$

где $\Delta M = M_{\text{эм}} - M_{\text{мех}}$, T_j - *постоянная инерции агрегата.*

С учётом того, что $\omega = \omega_0 - s$, уравнение (4.3) приводится к виду:

$$-T_j \frac{ds}{dt} = \Delta M. \quad (4.4)$$

Поскольку электромагнитный момент $M_{\text{эм}}(s)$ и механический момент приводного механизма $M_{\text{мех}}(s)$ являются нелинейными функциями от s , то и их разность $\Delta M(s) = M_{\text{эм}}(s) - M_{\text{мех}}(s)$ также есть нелинейная функция от скольжения (рис. 4.4).

Решение уравнения (4.4) проводится численным интегрированием по интервалам. Для этого график функции $\Delta M = f(s)$ разбивается на n равных интервалов по скольжению (рис. 4.4):

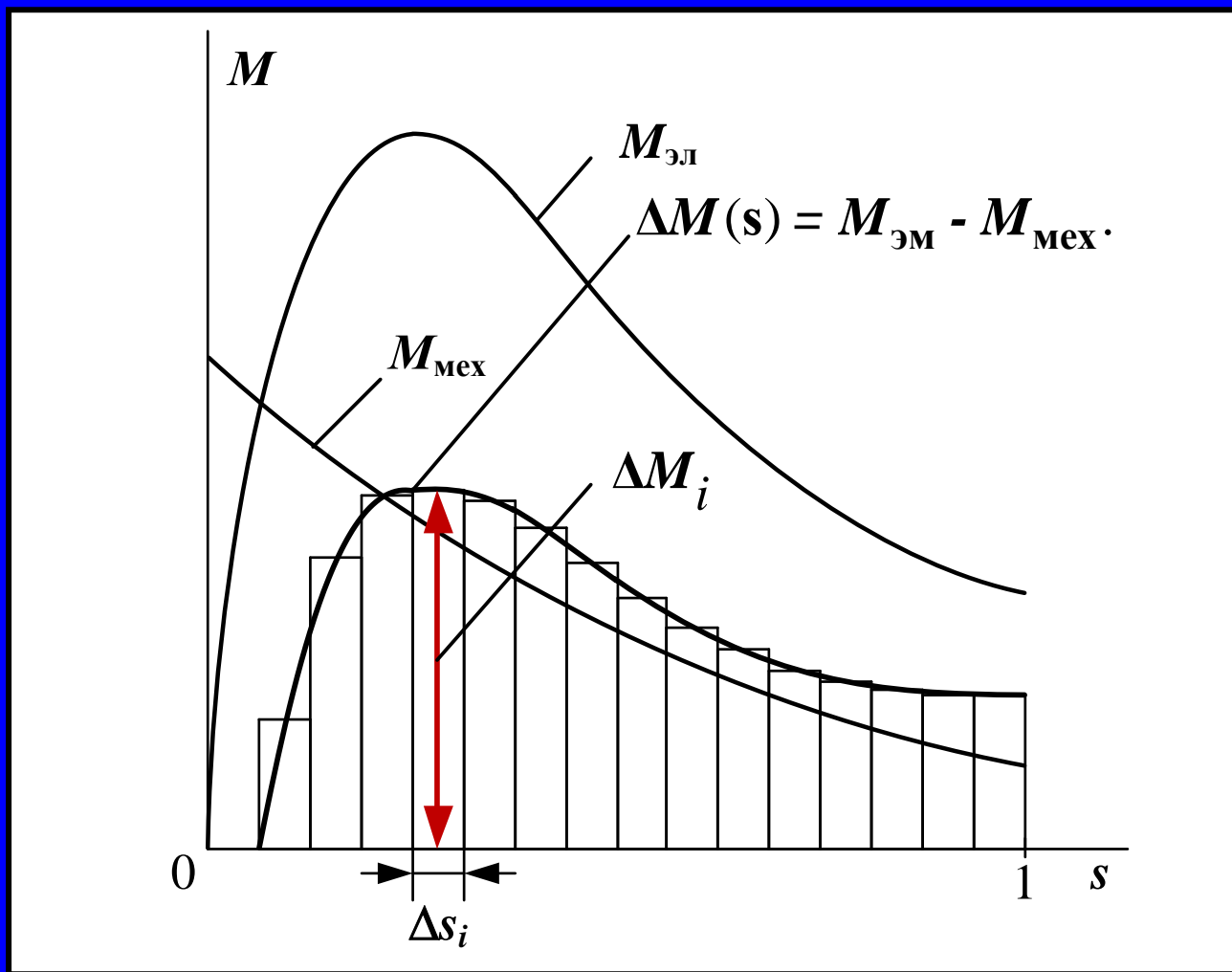


Рис. 4.4. К расчёту времени пуска двигателя

$$\Delta s_1 = \Delta s_2 = \dots = \Delta s_i = \dots = \Delta s_n; \quad i = 1 \dots n \quad (4.5)$$

и строится ступенчатая функция (рис.4.4), в которой принято $\Delta M_i = \text{const}$.

Тогда уравнение движения (4.4) на любом интервале будет иметь вид:

$$T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} = \Delta M_i, \quad (4.6)$$

где ΔM_i – среднее значение небаланса моментов на i -м интервале.

Из (4.6) находим промежуток времени Δt_i на произвольном интервале

$$\Delta t_i = T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}. \quad (4.7)$$

Суммируя все n промежутков времени получаем время пуска двигателя:

$$t_{\text{пуск}} = T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}, \quad i = 1 \dots n \quad (4.8)$$

Точность расчёта по (4.8) возрастает с уменьшением величины Δs_i и, соответственно, с увеличением количества интервалов.

КОНЕЦ РАЗДЕЛА № 4

**Переходные процессы в узлах
нагрузки при больших
возмущениях**

В соответствии со схемой замещения при реакторном пуске (рис.4.3) напряжение на выводах асинхронного двигателя составляет:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ном}} - x_{\text{р}} \cdot I_{\text{пуск.}(с/р)}$$

Связь пускового момента при реакторном пуске $M_{\text{пуск.}(с/р)}$ с номинальным пусковым моментом $M_{\text{пуск.}(ном)}$ определяется соотношением

$$M_{\text{пуск.}(с/р)} = M_{\text{пуск.}(ном)} \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Реакторный пуск применяют при необходимости значительного снижения пускового тока и достаточности для пуска $M_{\text{пуск}(с/р)} \approx M_{\text{мех}}$ при $s = 1$.

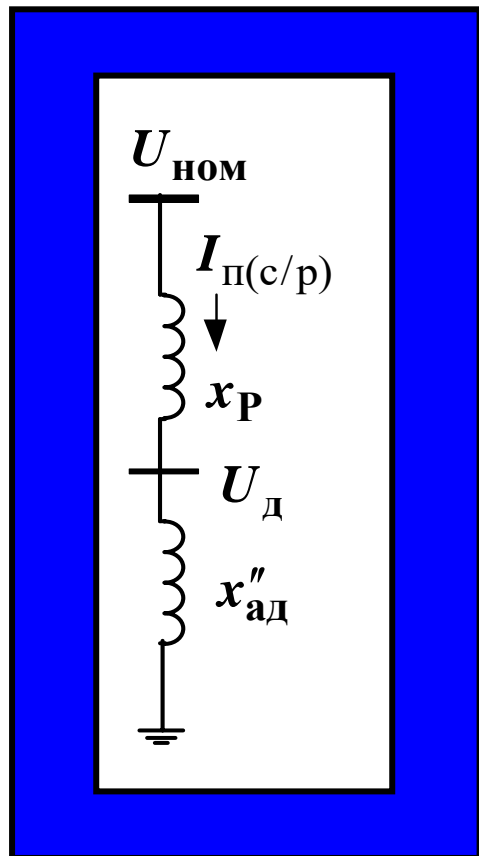


Рис.4.3. Схема замещения пуска АД с/р