

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

# **Основи теорії електропривода**

**Конспект лекцій**

для студентів спеціальності 151

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

денної та заочної форм навчання

Утверджено  
на засіданні  
кафедри АВП  
Протокол № 3от 03.01.2018

Краматорськ 2018

### **УДК 669.18.621.3**

Основи теорії електропривода. Конспект лекцій для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / Укл. О.В. Разживін – Краматорськ: ДДМА, 2018.– 112 с.

Містить конспект лекцій по курсу «Основи теорії електроприводу». Описані методики проектування основних елементів еластичних і кранових електроприводів, а також імітаційне моделювання динамічних характеристик електроприводу.

Укладач

О.В. Разживін, доц.,

Відпов. за випуск

О.В. Субботин, доц.

Редактор

Н. А. Хахина

Підп. к друку

Формат 60×84/16

Ризографіч. друк. Умов. друк. л. 3,5.

Навч.-вид. л. 2,54.

Тираж 80 екз.

Замовлення. №

---

**ДДМА. 84313, Донецька обл., г. Краматорськ, ул. Академічна,72**

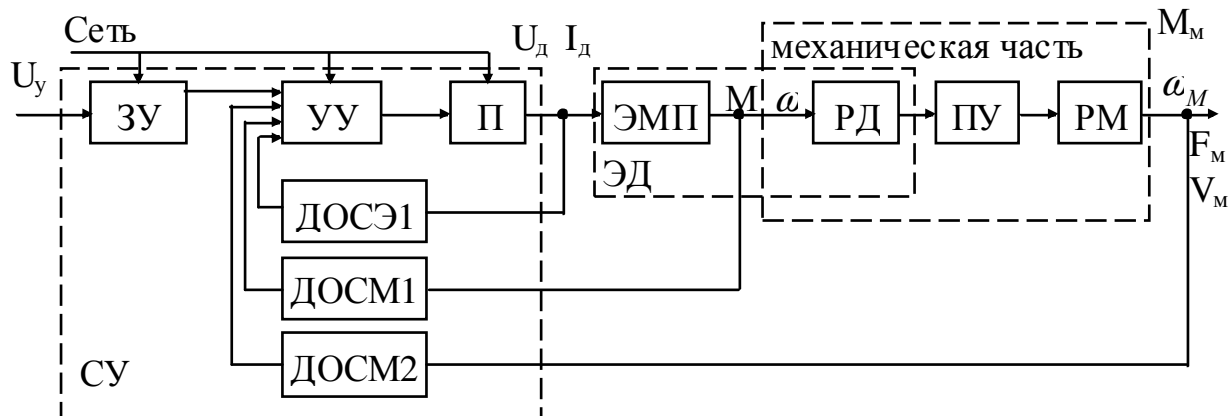
## СОДЕРЖАНИЕ

	стр
1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ АЭП	7
2 МЕХАНИКА ПРИВОДА	8
3 МНОГОМАССОВЫЕ СИСТЕМЫ	16
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	19
5 ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДТП НЕЗАВИСИМОГО (ПАРАЛЛЕЛЬНОГО) ВОЗБУЖДЕНИЯ	23
6 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	34
7 ЭП С ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	39
8 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	41
9 ЭП С ДТП СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	44
10 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	46
11 ЭП С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ (АД)	47
12 ТОРМОЖЕНИЕ АД	55
13 ЭП С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ	62
14 ТОРМОЖЕНИЕ СД	65
15 ПОНЯТИЕ О РЕГУЛИРОВАНИИ КООРДИНАТ	66
16 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ ГД	73
17 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ УВП-Д	77
18 МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ ТП-Д	78
19 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА И РАБОТА ДВУХПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ДИП)	85
20 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АД	86
21 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	93
22 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ	101
23 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ	

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ(УП-Д)	107
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	110

# 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ АЭП

**АЭП**, называется электромеханическая система состоящая из электродвигательного, передаточного, преобразовательного и управляющего устройств служащих для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.



- ЗУ – задающее устройство;
- УУ – устройство управления;
- ДОСЭ – датчик обратной связи электрический;
- ДОСМ – датчик обратной связи механический;
- П – преобразователь;
- СУ – система управления;
- ЭД – электродвигатель;
- ЭМП – электромеханический преобразователь;
- РД – ротор двигателя;
- ПУ – передаточное устройство;
- РМ – рабочий механизм.

## Тема: Типы ЭП

ЭП разделяют на три типа:

- групповой;
- индивидуальный;
- взаимосвязанный.

*Групповой* – называется иногда и трансмиссионным приводом, обладает низким КПД.

*Индивидуальный* – предусматривается на каждом органе производственного механизма по двигателю.

*Взаимосвязанный привод* – называется привод состоящий из двух и более двигателей, которые связаны между собой.

### Разделяют:

1) По степени управляемости привод делится на:

- регулируемый;
- нерегулируемый;
- программно-регулируемый;
- следящий;

– адаптивный.

*Регулируемый* – с элементарными устройствами регулирования (без обратной связи).

*Программно-регулируемый* – наиболее совершенный привод, регулируемый с помощью программы.

*Следящий* – автоматически обрабатывает произвольно изменяющийся сигнал управления.

*Адаптивный* – изменение параметров управления, автоматически избирает структуры систем управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

2) По роду передаточного устройства:

- редукторный;
- безредукторный.

3) По роду тока и напряжения:

- постоянный;
- переменный.

4) По степени автоматизации:

- автоматизированный;
- неавтоматизированный;
- автоматический (без оператора).

## 2 МЕХАНИКА ПРИВОДА

### 1. Силы и моменты действующие в ЭП

При работе механизма двигатель преодолевает сопротивление.

Электродвигатель должен преодолевать статические и динамические моменты.

Вредные моменты создаются силами трения.

*Активным* – называется момент, который при изменении направления движения не изменил направления действия, к таким относятся моменты обусловленные наличием потенциальных сил веса, упругих деформаций.

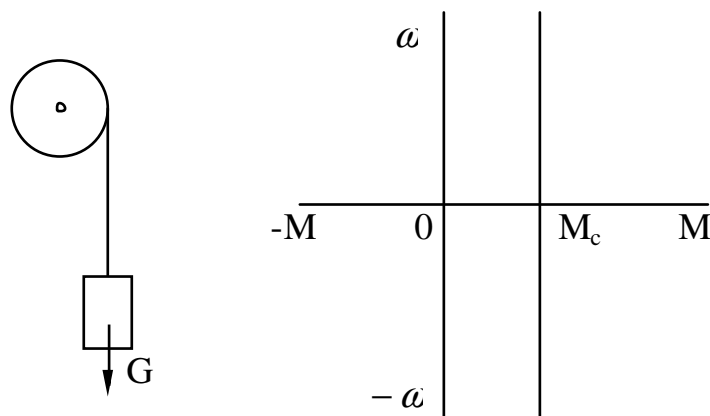
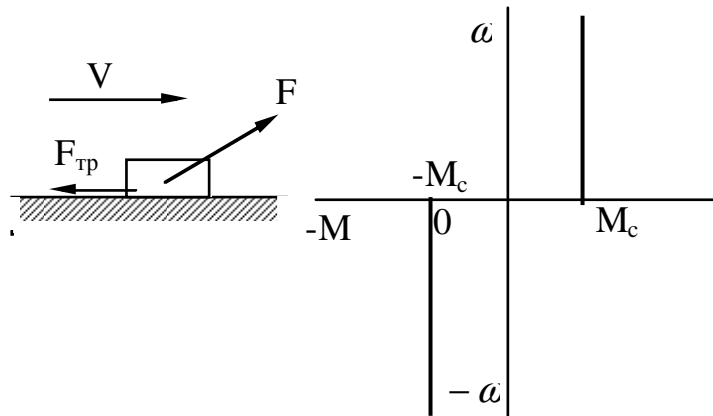


График активного момента

*Реактивным* – называется момент, который при изменении направления движения изменяет свое действие (обусловленное силами трения, неупругих сил).



*Динамический момент* – обусловлен наличием инерционных масс (запасом кинетической энергии), проявляет себя при ускорении, регулировании скорости, изменении направления скорости.

### Уравнение движения ЭП без учета упругих деформаций и зазоров

Запас кинетической энергии всех движущихся элементов:

$$A = A_c + A_\partial; \quad (1.1)$$

$A_c$  – кинетическая энергия статических нагрузок;

$A_\partial$  – кинетическая энергия инерционных сил.

Продифференцировав – получим мощность:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA_c}{dt} + \frac{dA_\partial}{dt}; \quad (1.2)$$

$$A_\partial = J \frac{\omega^2}{2}; \quad (1.3)$$

$$\frac{dA_\partial}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}; \quad (1.4)$$

С учетом 1.1 и 1.2:

$$P = P_c + P_\partial;$$

$$P = P_c + J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}; \quad (1.5)$$

$$P = M \cdot \omega \Rightarrow M = \frac{P}{\omega};$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}; \quad (1.6)$$

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \Rightarrow dt = \frac{d\alpha}{\omega};$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\alpha}; \quad (1.7)$$

Уравнения 1.6 и 1.7 – уравнения движения ЭП.

В механизмах, где  $J = const$ :

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.8)$$

1.8 – упрощенное уравнение движения ЭП.  
Проанализируем 1.8:

$$\frac{M - M_c}{J} = \frac{d\omega}{dt},$$

если  $M > M_c$ , то  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ;

если  $M < M_c$ , то  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  – разгружаем электродвигатель (маховик);

если  $M = M_c$ , то  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  – установившееся движение.

$$P = \frac{M \cdot \omega}{1000} \quad (\text{кВт}); \quad (1.9)$$

$$M - H \cdot m, \quad \omega - \frac{\text{рад}}{c}.$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}; \quad (1.10)$$

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} \quad (\text{кВт}); \quad (1.11)$$

$$M - H \cdot m, \quad n - \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

$$M(H \cdot m) = 9,8 \cdot M(\text{кг} \cdot \text{м});$$

$$P = \frac{M \cdot n}{975},$$

$$M - (\text{кг} \cdot \text{м});$$

$$n - \left( \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right).$$

$$J = m \cdot \rho^2,$$

$m$  – масса (кг),  $\rho$  – радиус инерции ( $\text{м}^2$ ).

$$[J] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 = H \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 = \text{Дж} \cdot \text{с}^2;$$

$$J = m \cdot \rho^2 = \frac{G}{g} \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{G \cdot D^2}{4g} = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \right] = [\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2];$$

$G \cdot D^2$  – маховый момент.

$$J_{\text{сн}} = \frac{G \cdot D_{(\text{мск})}^2}{4};$$

$$\pm M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (2.1)$$



## Уравнение движения при поступательно перемещающихся элементах

$$A_{\partial} = m \frac{V^2}{2};$$

$$P_{\partial} = \frac{dA_{\partial}}{dt} = m \cdot V \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dV}{dt}; \quad (2.2)$$

$$F_{\partial} = \frac{P_{\partial}}{V} = m \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dV}{dt}; \quad (2.3)$$

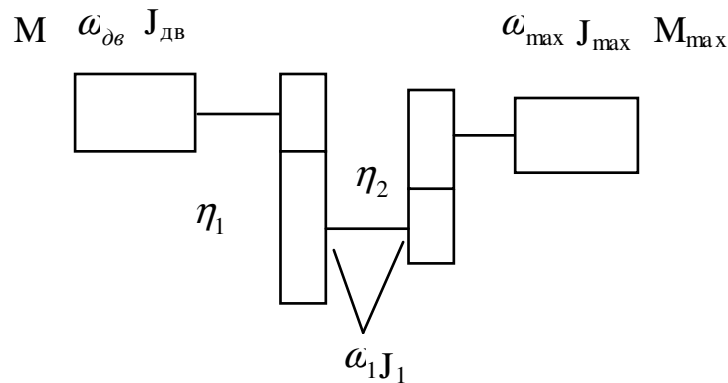
$$V = \frac{dL}{dt}; \quad dt = \frac{dL}{V};$$

$$F_{\partial} = m \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dm}{dL}; \quad (2.4)$$

$$F = F_c + m \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dm}{dL}; \quad (2.5)$$

$$F = F_c + m \frac{dV}{dt}; \quad (2.6)$$

## Приведение статического момента сопротивления к одной оси



Приведенный статический момент сопротивления определяется исходя из того, что мощность необходимая для производственного механизма в установившемся режиме должна отличаться от мощности двигателя на величину потерь в передачах в КПД ( $\eta$ ).

$$M_{c \text{ пр}} \cdot \omega_{\partial} = \frac{M_{\max} \cdot \omega_{\max}}{2}; \quad (2.7)$$

$$M_{c \text{ пр}} = \frac{M_{\max}}{\eta \cdot \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\max}}};$$

$$u = \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\max}} = \frac{\omega_{\partial}}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{\max}} = u_1 \cdot u_2;$$

$u$  – передаточное число.

$$M_{c \text{ пр}} = \frac{M_{\max}}{\eta \cdot u}; \quad (2.8)$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2.$$

### Приведение моментов инерции к валу двигателя

Приведенный момент инерции определяются исходя из того, что запас кинетической энергии всех движущихся элементов системы электропривода до и после применения должен оставаться неизменным.

$$J_{np} \frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{2} = J_{\partial\epsilon} \frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_{\max} \frac{\omega_{\max}^2}{2}; \quad (2.9)$$

$$J_{np} = J_{\partial\epsilon} + J_1 \frac{1}{\frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{\omega_1^2}} + J_{\max} \frac{1}{\frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{\omega_{\max}^2}};$$

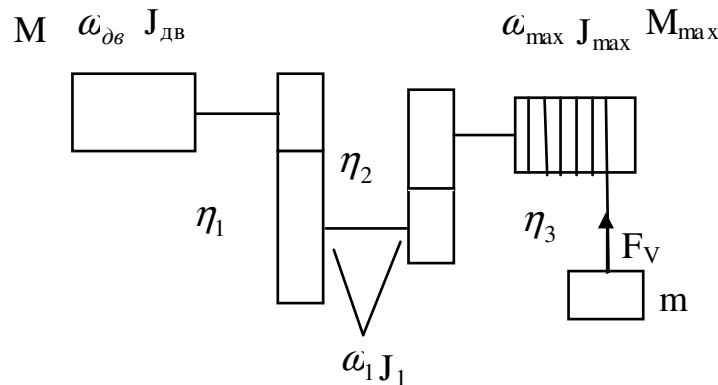
$$J_{np} = J_{\partial\epsilon} + J_1 \frac{1}{u_1^2} + J_{\max} \frac{1}{u_1^2 \cdot u_2^2}; \quad (2.10)$$

Приведенный момент инерции к валу производственных механизмов.

$$J'_{np} \frac{\omega_{\max}^2}{2} = J_{\max} \frac{\omega_{\max}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_{\partial\epsilon} \frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{2}; \quad (2.11)$$

$$J'_{np} = J_{\max} + J_1 \cdot u_2^2 + J_{\partial\epsilon} \cdot u_1^2 \cdot u_2^2 \quad (2.12)$$

### Приведение статического момента сопротивления при наличии поступательного перемещения элементов



$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3;$$

$$M_{\partial\epsilon} \cdot \omega_{\partial\epsilon} = \frac{F_c \cdot V}{\eta};$$

$$M_{c\ np} = \frac{F_c \cdot V}{\omega_{\partial\epsilon} \cdot \eta}; \quad (2.13)$$

### Приведенный момент инерции к одной оси при наличии поступательно перемещающейся массы

$$J_{np} \frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{2} = J_{\partial\epsilon} \frac{\omega_{\partial\epsilon}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_{\max} \frac{\omega_{\max}^2}{2} + m \frac{V^2}{2}; \quad (2.14)$$

$$J_{np} = J_{\partial\delta} + J_1 \frac{1}{u_1^2} + J_{\max} \frac{1}{u_1^2 \cdot u_2^2} + m \frac{V^2}{\omega_1^2}. \quad (2.15)$$

Определение времени пуска и торможения из уравнения движения ЭП.

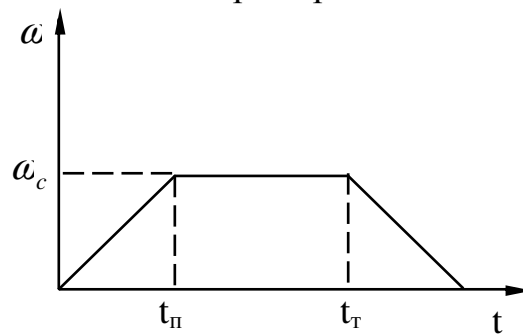
$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt};$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M - M_c} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M - M_c}; \quad (2.16)$$

$$J = const; \quad M_c = const.$$

Пример



$$M = M_{ncp};$$

$$M_{ncp} = \frac{M_1 + M_2}{2};$$

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_2 = \alpha_c;$$

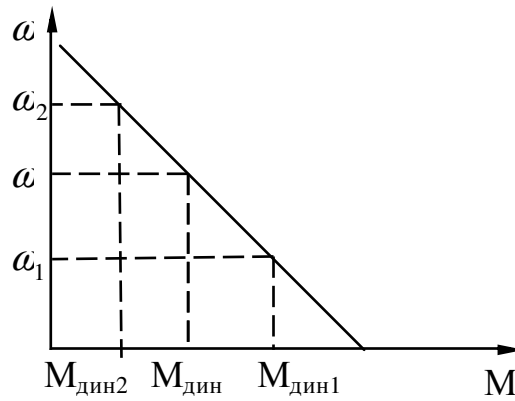
$$t_n = J \frac{\alpha_c}{M_{ncp} - M_c}; \quad (2.17)$$

$$M = 0; \quad \alpha_1 = \alpha_c; \quad \alpha_2 = 0 \text{ (условие торможения)}$$

$$t_m = J \frac{-\alpha_c}{-M_c} = J \frac{\alpha_c}{M_c}; \quad (2.18)$$

$$t_m = J \frac{\alpha_c}{M_m + M_c}. \quad (2.19)$$

**Определение времени пуска, если динамический момент изменяется по зависимости.**



$$M_{\text{дин}} = a - b\alpha \quad (2.20)$$

$$\frac{M_{\text{дин}} - M_{\text{дин}2}}{\omega_2 - \omega} = \frac{M_{\text{дин}1} - M_{\text{дин}2}}{\omega_2 - \omega_1}; \quad (2.21)$$

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{дин}2} + \frac{M_{\text{дин}1} - M_{\text{дин}2}}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \omega_2 - \frac{M_{\text{дин}1} - M_{\text{дин}2}}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \omega = a - b\omega;$$

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{a - b\omega} = J \frac{1}{b} \ln \frac{a - b\omega_1}{a - b\omega_2}; \quad (2.22)$$

$$t = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\text{дин}1} - M_{\text{дин}2}} \ln \frac{M_{\text{дин}1}}{M_{\text{дин}2}}; \quad (2.23)$$

**Определение пути проходимого рабочим органом механизма**

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt};$$

$$d\alpha = \omega dt; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{д}} = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{д}}}; \quad (2.25)$$

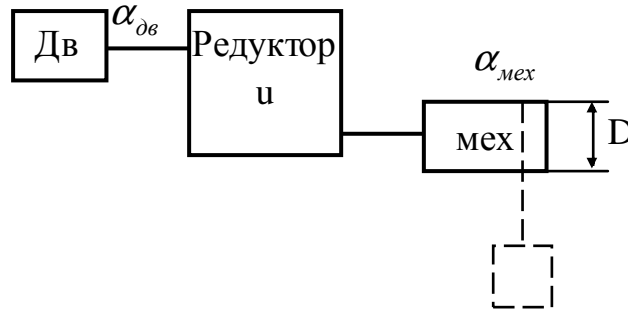
$$d\alpha = J\omega \frac{d\omega}{M_{\text{д}}}; \quad (2.26)$$

$$\alpha = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{\omega d\omega}{M_{\text{д}}} = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2M_{\text{д}}}; \quad (2.27)$$

$$\alpha_{\text{мех}} = \frac{\alpha_{\text{дв}}}{u}.$$

$$N = \frac{\alpha_{\text{мех}}}{2\pi} - \text{число оборотов.}$$

$$L = N \cdot \pi \cdot D_{\delta} = \frac{\alpha_{\text{мех}}}{2 \cdot \pi} \cdot \pi \cdot D_{\delta} = \alpha_{\text{мех}} \cdot \frac{D_{\delta}}{2} = \alpha_{\text{мех}} \cdot R_{\delta}$$



### Определение оптимального передаточного числа

$$M = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad M = \frac{M_{\text{мех}}}{u \cdot \eta};$$

$$M_{\text{мех}} = M \cdot u \cdot \eta; \quad (2.28)$$

$$J' = J_{\delta\delta} + \frac{J_{\text{мех}}}{u^2};$$

$$J' = J_{\delta\delta} \cdot u^2 + J_{\text{мех}}; \quad (2.29)$$

$$M \cdot u \cdot \eta = M_c + (J_{\delta\delta} \cdot u^2 + J_{\text{мех}}) \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt}; \quad (2.30)$$

$$t_{\text{пуска}} = \frac{J_{\delta\delta} \cdot u^2 + J_{\text{мех}} \cdot \omega_{\text{мех}}}{M \cdot u \cdot \eta - M_c}; \quad (2.31)$$

$$\frac{dt_{\text{н}}}{du} = \frac{2 \cdot u \cdot J_{\delta\delta} (M \cdot u \cdot \eta - M_c) - (J_{\delta\delta} \cdot u^2 + J_{\text{мех}}) \cdot M \cdot \eta}{(M \cdot u \cdot \eta - M_c)^2} \cdot \omega_{\text{мех}};$$

$$\frac{2 \cdot u \cdot J_{\delta\delta} (M \cdot u \cdot \eta - M_c) - (J_{\delta\delta} \cdot u^2 + J_{\text{мех}}) \cdot M \cdot \eta}{(M \cdot u \cdot \eta - M_c)^2} \cdot \omega_{\text{мех}} = 0;$$

$$2 \cdot u^2 \cdot J_{\delta\delta} \cdot M \cdot \eta - 2 \cdot u \cdot J_{\delta\delta} \cdot M_c - J_{\delta\delta} \cdot u^2 \cdot M \cdot \eta - J_{\text{мех}} \cdot M \cdot \eta = 0;$$

$$u^2 \cdot J_{\delta\delta} \cdot M \cdot \eta - 2 \cdot u \cdot J_{\delta\delta} \cdot M_c - J_{\text{мех}} \cdot M \cdot \eta = 0.$$

Разделим обе части уравнения на  $M \cdot \eta$ , получим:

$$u^2 - 2 \cdot u \cdot \frac{M_c}{M \cdot \eta} - \frac{J_{\text{мех}}}{J_{\delta\delta}} = 0; \quad (2.32)$$

$$u = \frac{M \cdot \eta}{M_c} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M \cdot \eta}\right)^2 + \frac{J_{\text{мех}}}{J_{\delta\delta}}}; \quad (2.33)$$

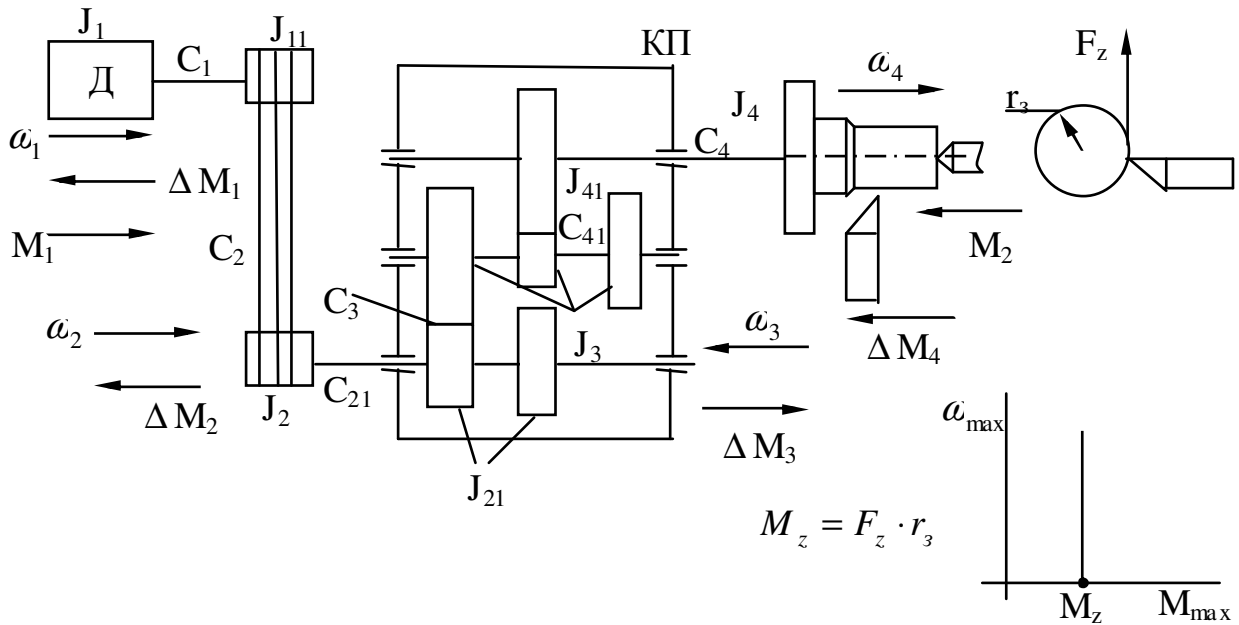
Уравнение 2.33 при пуске.

$$u_0 = \frac{M_c \cdot \eta}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M \cdot \eta}\right)^2 + \frac{J_{\text{мех}}}{J_{\delta\delta}}}; \quad (2.34)$$

Уравнение 2.34 при торможении.

### 3 МНОГОМАССОВЫЕ СИСТЕМЫ

Основные элементы кинематической схемы:



$M_z$  – момент резания, при точении  $M_z = const$ , а при отрезке, подрезке  $M_z = var$ .  $\Delta M_i$  – момент потерь на  $i$  валу.

#### Понятие о многомассовых системах. Жесткость упругих связей. Податливость

$C$  – жесткость.

$C_3$  – жесткость зубьев.

При вращательном движении:

$$C_i = \frac{M_{крi}}{\Delta\varphi_i},$$

$M_{кр}$  – крутящий момент приложенный к вращающемуся элементу.

$\Delta\varphi_i$  – деформации.

При поступательном перемещении жесткость:

$$C_j = \frac{F_j}{\Delta S_j},$$

где  $F_j$  – нагрузка;

$\Delta S_j$  – деформации.

Величина обратная жесткости, называется податливость.

#### Приведение моментов инерции, деформации, жесткости

$J_{прi} = \frac{J_i}{u_{1i}^2}$  – для элемента осуществляющего вращательное движение.

$$u_{1i} = \frac{\omega_1}{\omega_i}.$$

При поступательном движении:

$$J_{npi} = m_j \cdot \rho_{1j}^2; \quad \rho = \frac{V_j}{\omega_1}.$$

$\rho$  – радиус инерции.

$$\varphi_{npi} = \varphi_i \cdot u_{1i}; \quad C_{npi} = \frac{C_i}{u_{1i}^2}; \quad M_{npi} = \frac{M_i}{u_{1i}};$$

$$\varphi_{npj} = \frac{\Delta S_j}{\rho_{1j}}; \quad C_{npj} = C_j \cdot \rho_{1j}^2; \quad M_{npj} = F_j \cdot \rho_{1j}.$$

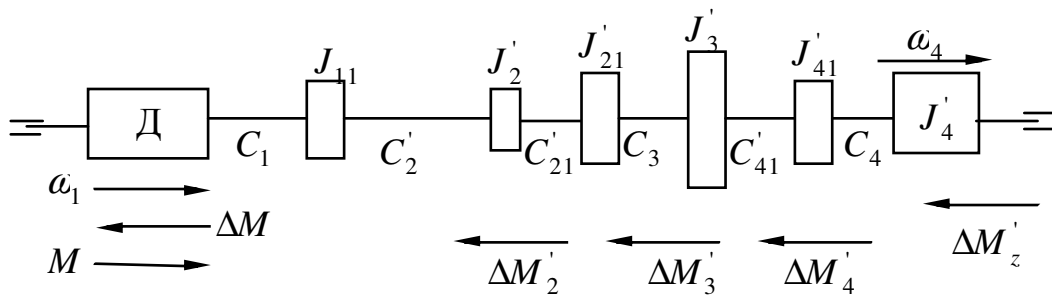
При параллельном расположении жесткости:

$$C_{\text{Э}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

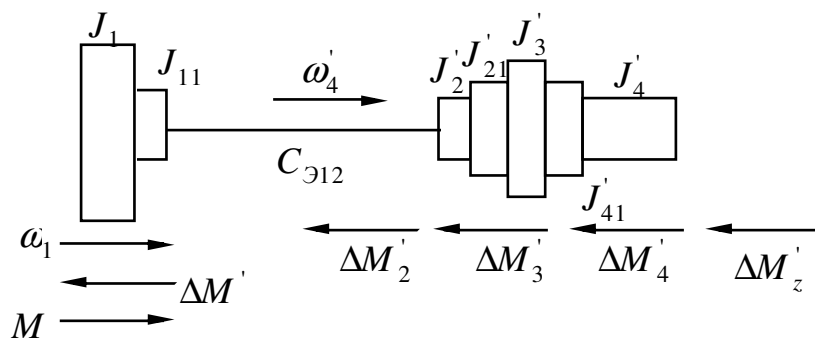
При последовательном расположении жесткости:

$$\frac{1}{C_{\text{Э}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

### Составление расчетной схемы механической части ЭП



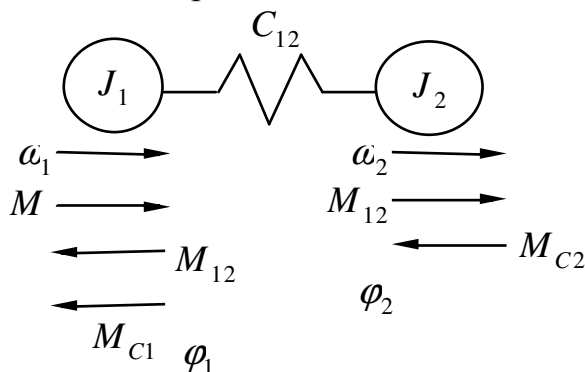
Приведем к двухмассовой системе.



В практике имеют место  $3^x$ -массовые системы (механизм передвижного крана).

## Обобщенная $2^x$ -массовая схема ЭП. Уравнение движения $2^x$ -массовой системы

Обобщенные схемы имеют проще вид.



$J_1$  – суммарно приведенная масса элементов жестко связанных с валом двигателя.

$J_2$  – суммарно приведенная масса элементов жестко связанных с механизмом.

$C_{12}$  – приведенная эквивалентная жесткость.

$\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости (обобщенные) соответствующие обобщенным угловым перемещениям  $\varphi_1, \varphi_2$ .

$M$  – электромагнитный момент развиваемый двигателем.

$M_{C1}, M_{C2}$  – суммарные моменты сопротивления на валу двигателя и механизма соответственно.

$M_{12}$  – момент упругого взаимодействия между массами  $m_1$  и  $m_2$ .

$$M_{12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); \quad M_{C1} = \Delta M;$$

$$M_{C2} = \Delta M'_2 + \Delta M'_3 + \Delta M'_4 + \Delta M'_z.$$

### Уравнение движения $2^x$ -массовой системы

$$M - M_{C1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_1 p \omega_1,$$

$p$  – оператор дифференцирования.

$$M_{12} - M_{C2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 p \omega_2;$$

$$C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_{12},$$

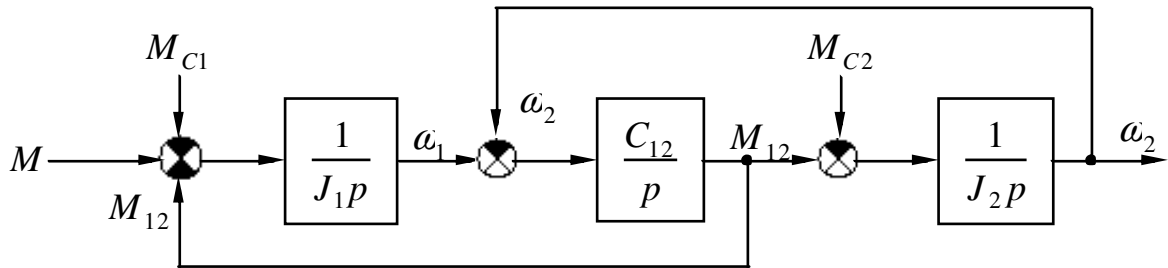
где  $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = p\varphi \Rightarrow \varphi = \frac{\omega}{p},$

тогда  $\frac{C_{12}}{p}(\omega_1 - \omega_2) = M_{12}.$



$$\begin{cases} (M - M_{C1} - M_{12}) \frac{1}{J_1 p} = \omega_1 \\ (M_{12} - M_{C1}) \frac{1}{J_2 p} = \omega_2 \\ (\omega_1 - \omega_2) \frac{C_{12}}{p} = M_{12} \end{cases}$$

### Структурная схема 2<sup>x</sup>-массовой упругой механической системы



Передаточная функция по управляющему воздействию  $M$  при выходной величине  $\omega_1$  имеет вид:

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{p^2 + \frac{J_1}{J_1 + J_2} \Omega_{12}^2}{J_1 p (p^2 + \Omega_{12}^2)},$$

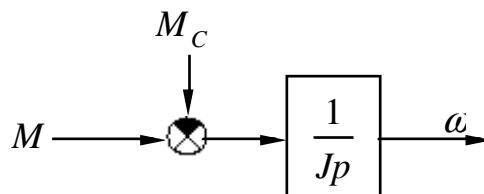
где  $\Omega_{12}$  – это частота свободных колебаний 2<sup>x</sup>-массовой упругой системы.

$$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}}.$$

Из этой системы можно получить одномассовую систему (жесткую) для этого:

$$M_{C1} = M; \quad M_{12} = 0; \quad J_1 = J_{\Sigma}; \quad J_2 = 0;$$

$$(M - M_C) \frac{1}{J_{\Sigma} p} = \omega.$$



## 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Характеристики могут быть двух типов: электромеханические и механические; естественные и искусственные.

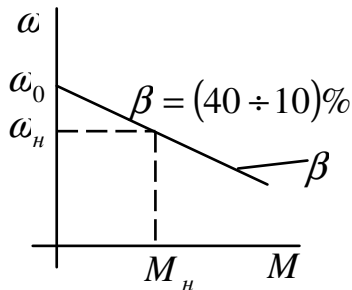
Естественная характеристика – полученная при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателей, нормальной схемой включения и

номинальных параметрах питающей сети. При несоблюдении одного из этих условий характеристика называется искусственной.

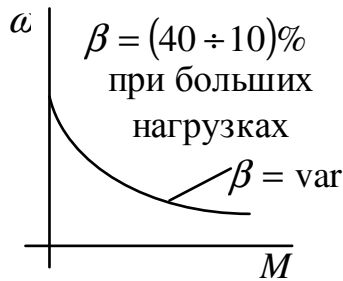
Электромеханической характеристикой называется зависимость скорости вращения вала от тока якорной цепи.

Механической характеристикой называется зависимость скорости вала от момента на валу двигателя.

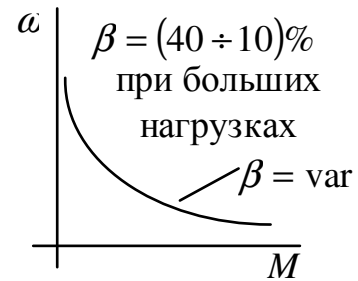
ДТП:



1 – независимое возбуждение

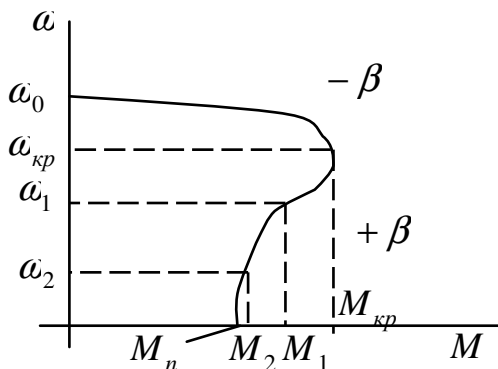


2 – смешанное возбуждение



3 – последовательное возбуждение

АД:



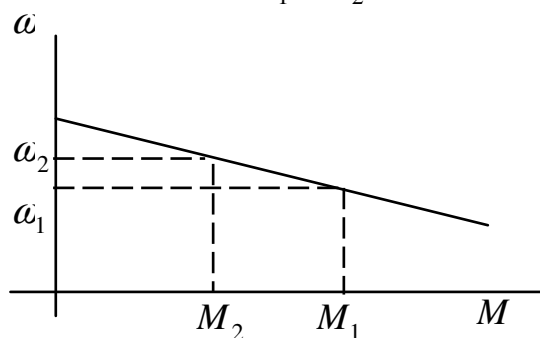
СД:



По жесткости характеристики делятся:

- на абсолютно жесткие  $\beta = \infty$ ;
- жесткие  $\beta = (40 \div 10)\%$ ;
- мягкие  $\beta < 10\%$  (двигатели ДТП смешанного и последовательного возбуждения при малых нагрузках, а также АД на нерабочем участке);
- абсолютно мягкие  $\beta = 0$  (параллельно оси  $\omega$ )

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$



Все двигатели могут работать в двигательном и тормозном режиме.



### Характеристики производственных механизмов

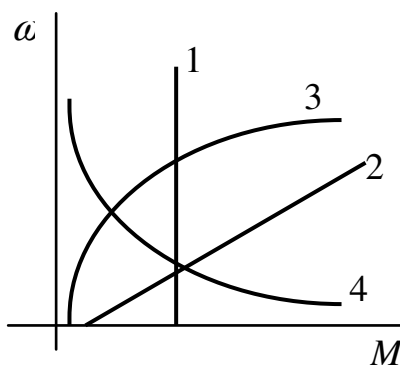
$$M = M_{тр} + (M_{с.н.} - M_{тр}) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (4.1)$$

$M_c$  – момент сопротивления соответствующий  $\omega$ ;

$M_{тр}$  – момент трения;

$M_{с.н.}$  – номинальный момент статического сопротивления соответствующий  $\omega_n$

$x$  – показатель характеризующий к какому классу механизмов относится данная характеристика.



1.  $x = 0$ ,  $M_c = M_{с.н.}$  – независимо от  $\omega$  (подъемные установки, механизмы подачи, конвейеры с не изменяющейся массой транспортируемого материала, а также все механизмы, в которых основным моментом является момент трения);

2.  $x = 1$ ,  $M_c = M_{тр} + \frac{M_{с.н.} - M_{тр}}{\omega_n^2} \cdot \omega$  – обладают генераторы с независимым возбуждением.

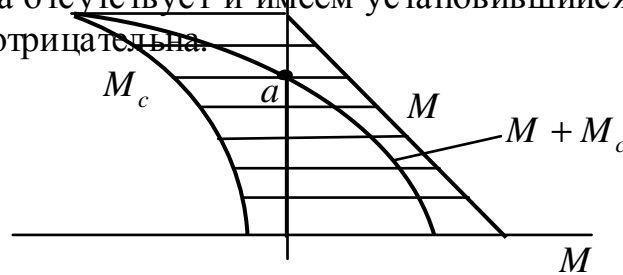
3.  $x = 2$ ,  $M_c = M_{тр} + \frac{M_{с.н.} - M_{тр}}{\omega_n^2} \cdot \omega^2$  – обладают вентиляторы, центробежные насосы, гребные винты.

4.  $x = -1$ ,  $M_c = M_{mp} + \frac{M_{c.n.} - M_{mp}}{\omega} \cdot \omega_n$  – моталки, а также механизмы главного движения обработки торца детали.

**Совместная характеристика двигателя и производственного механизма.  
Условие устойчивости работы в установившемся режиме**

Совместная характеристика получается путем сложения характеристик механизма и двигателя при одинаковой скорости с учетом знака момента.

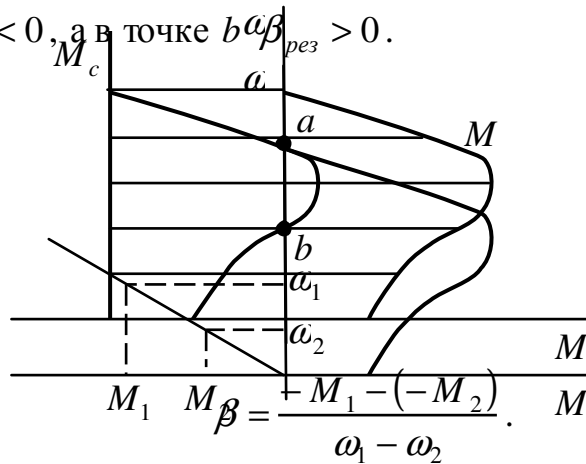
В точке  $a$  имеем равенство  $M = M_c$  или же  $M - M_c = 0$ , то есть динамическая нагрузка отсутствует и имеем установившийся режим. Жесткость в окрестности точки  $a$  отрицательна.



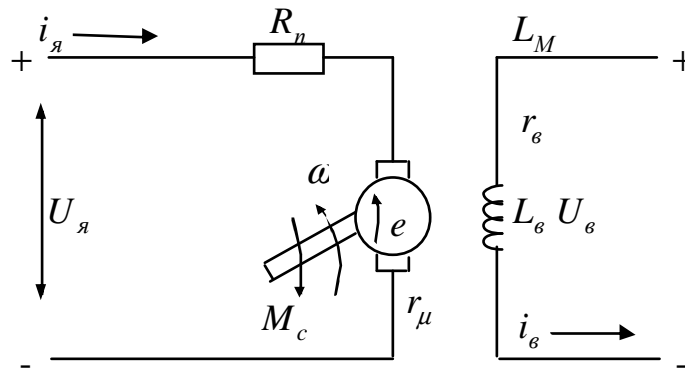
$\beta_{рез} = \beta_1 + \beta_2$ , если  $\beta_{рез} < 0$  – работа устойчива, если  $\beta_{рез} > 0$  – то неустойчива.

Если жесткость одной характеристики положительна, а другой характеристики отрицательна и по абсолютной величине больше положительной, жесткость результирующей характеристики будет отрицательна и работа привода будет устойчивой.

В точке  $a$   $\beta_{рез} < 0$ , а в точке  $b$   $\beta_{рез} > 0$ .



## 5 ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДТП НЕЗАВИСИМОГО (ПАРАЛЛЕЛЬНОГО) ВОЗБУЖДЕНИЯ



Уравнение электрического равновесия к якору:

$$U = E + IR + L \frac{di}{dt}. \quad (4.2)$$

Уравнение механического равновесия:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.3)$$

$U$  – напряжение приложенное к якору;

$E$  – ЭДС вращения:

$$E = k\Phi\omega;$$

$k$  – конструктивный коэффициент:

$$k = \frac{p\omega}{2a\pi};$$

$p$  – число пар полюсов;

$\omega$  – число активных проводников якора;

$a$  – число пар параллельных ветвей;

$\Phi$  – магнитный поток на полюс;

$R$  – сопротивления якорной цепи:

$$R = R_{\text{ов}} + R_n,$$

$$R_{\text{ов}} = R_{\text{я}} + R_{\text{он}} + R_{\text{к0}} + R_{\text{щ}};$$

$L$  – индуктивность якора;

$M$  – электромагнитный момент двигателя:

$$M = k\Phi i_{\text{я}}$$

$M_c$  – момент статического сопротивления;

$J$  – момент инерции приведенный к валу двигателя.

$$i = I_c + \frac{J}{k\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad (4.4)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{J}{k\Phi} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}; \quad (4.5)$$

$$U = E + I_c R + \frac{JR}{k\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{JL}{k\Phi} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}. \quad (4.6)$$

Разделим обе части выражения 4.6 на  $k\Phi$ :

$$I_c = \frac{M_c}{k\Phi};$$

$$\frac{U}{k\Phi} = \frac{E}{k\Phi} + \frac{I_c R}{k\Phi} + \frac{JR}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{JL \cdot R}{(k\Phi)^2 \cdot R} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}; \quad (4.7)$$

$$T_M \cdot T_Y \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_c R}{k\Phi}, \quad (4.8)$$

$T_M$  – механическая постоянная времени;

$T_Y$  – электромагнитная постоянная якорной цепи.

$$T_M = \frac{JR}{(k\Phi)^2};$$

$$T_Y = \frac{L}{R};$$

$$(T_M T_Y p^2 + T_M p + 1)\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_c R}{k\Phi},$$

если  $I_c = 0$  – звено совершает колебания.

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{\frac{1}{k\Phi}}{T_M T_Y p^2 + T_M p + 1} = \frac{K_\omega}{T_M T_Y p^2 + T_M p + 1}; \quad (4.9)$$

если  $L_Y = 0$  – апериодическое звено.

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_\omega}{T_M p + 1}, \quad (4.10)$$

если  $U = 0$ .

$$(T_Y T_M p^2 + T_M p + 1)\omega = -\frac{M_c R}{(k\Phi)^2}; \quad (4.11)$$

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{K_\omega^2 R}{(T_Y T_M p^2 + T_M p + 1)}. \quad (4.12)$$

### Построение структурной схемы с учетом одного управляющего воздействия (напряжения по якорной цепи)

$$u - e = iR + L \frac{di}{dt} = iR(1 + T_Y p); \quad (4.13)$$

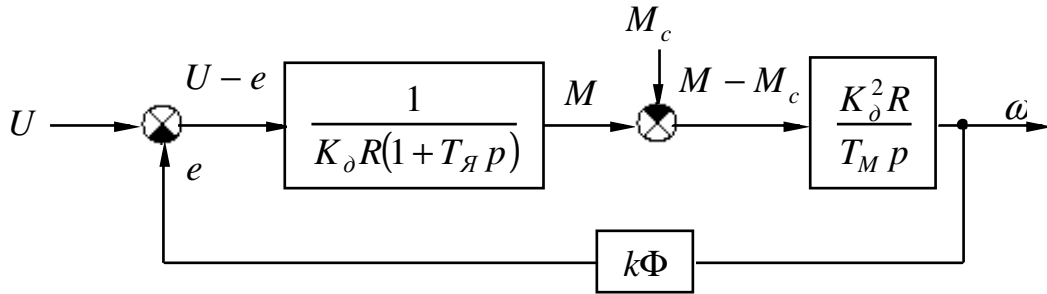
$$u - e = \frac{ik\Phi}{k\Phi} \cdot R(1 + T_Y p) = M \cdot K_\omega R(1 + T_Y p);$$

$$(u - e) \frac{1}{K_\omega R(1 + T_Y p)} = M; \quad (4.14)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = Jp = \frac{JR}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{(k\Phi)^2}{R} \cdot p \cdot \omega = T_M \cdot \frac{p \cdot \omega}{K_\omega^2 R}; \quad (4.15)$$

$$(M - M_c) \frac{K_\partial R}{T_M p} = \omega; \quad (4.16)$$

По уравнениям 4.14 и 4.16 можно построить структурную схему двигателя.



**Построение структурной схемы с учетом двух управляющих воздействий**

$$\begin{cases} U_\partial = e + i_\partial R_\partial + L \frac{di_\partial}{dt} & (4.17) \end{cases}$$

$$\begin{cases} M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} & (4.3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_\epsilon = i_\epsilon R_\epsilon + L_\epsilon \frac{di_\epsilon}{dt} & (4.18) \end{cases}$$

$$U_\partial = e + i_\partial R_\partial + L \frac{di_\partial}{dt} = i_\partial R_\partial (1 + T_\partial p); \quad (4.19)$$

$$(U_\partial - e) \frac{1}{R_\partial (1 + T_\partial p)} = i_\partial; \quad (4.20)$$

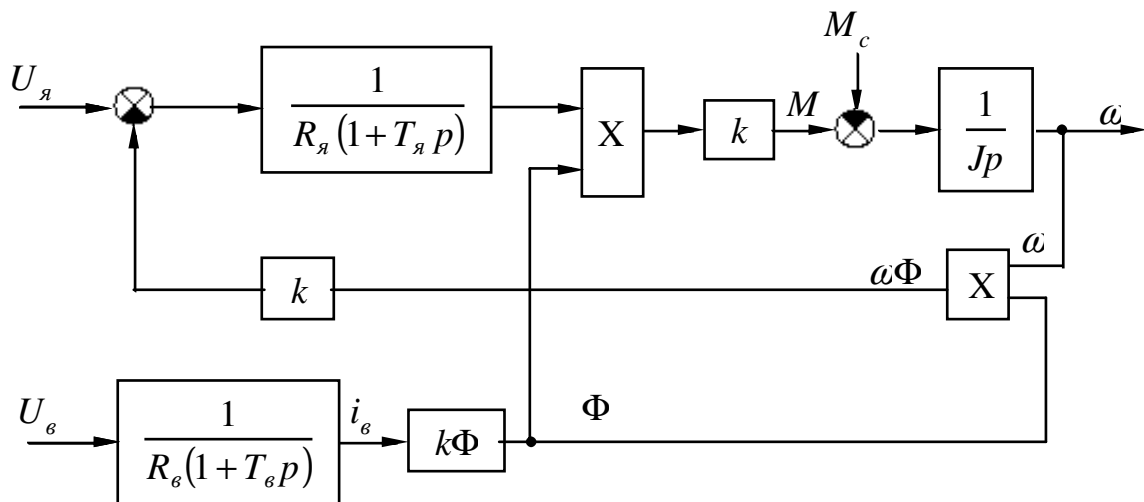
$$i - I_c = \frac{J}{k\Phi} p \omega;$$

$$(i - I_c) \frac{k\Phi}{Jp} = \omega; \quad (4.21)$$

$$U_\epsilon = i_\epsilon R_\epsilon (1 + T_\epsilon p); \quad (4.22)$$

$$i_\epsilon = \frac{U_\epsilon}{R_\epsilon (1 + T_\epsilon p)} \quad (4.23)$$

Пользуясь 4.20, 4.21, 4.23 или 4.3.



$$U_{\text{я}} = e + i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt};$$

$$(U_{\text{я}} - e) \frac{K_{\text{я}}}{1 + T_{\text{я}} p} = i_{\text{я}};$$

$$U_{\text{б}} = i_{\text{б}} R_{\text{б}} + L_{\text{б}} \frac{di_{\text{б}}}{dt};$$

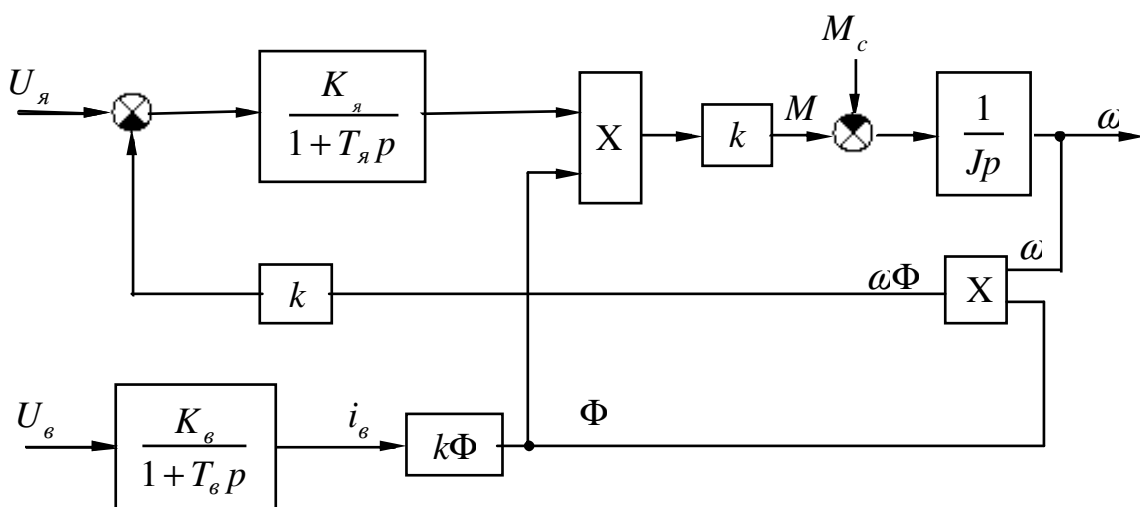
$$U_{\text{б}} \frac{K_{\text{б}}}{1 + T_{\text{б}} p} = i_{\text{б}};$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$(M - M_c) \frac{1}{Jp} = \omega;$$

$$M = k\Phi i_{\text{я}}; \quad e = k\Phi \omega;$$

$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = K_{\text{я}}; \quad \frac{1}{R_{\text{б}}} = K_{\text{б}}.$$





## Электромеханические и механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением

$$(T_{я} + T_{м} p^2 + T_{м} p + 1)\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_c R}{k\Phi}; \quad (5.1)$$

$$\omega = const;$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_c R}{k\Phi}; \quad (5.2)$$

Уравнение 5.2 – электромеханическая характеристика.

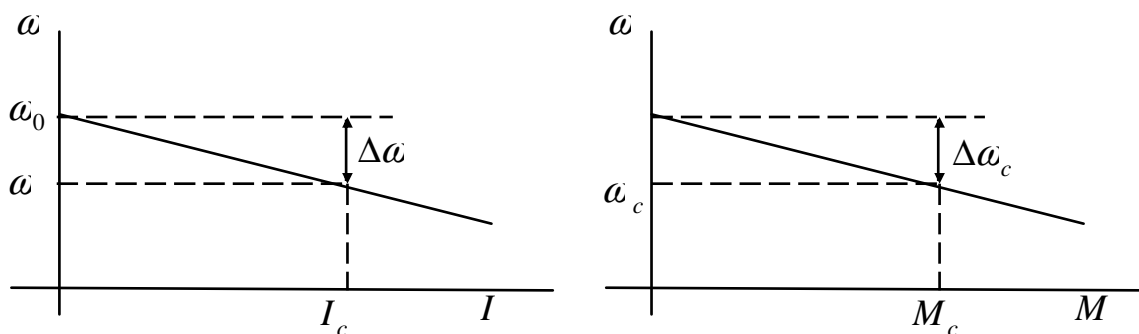
$$\frac{U}{k\Phi} = \omega_0 \text{ – скорость холостого хода.}$$

$$\frac{I_c R}{k\Phi} = \Delta\omega \text{ – перепад скорости.}$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_c R}{(k\Phi)^2}. \quad (5.3)$$

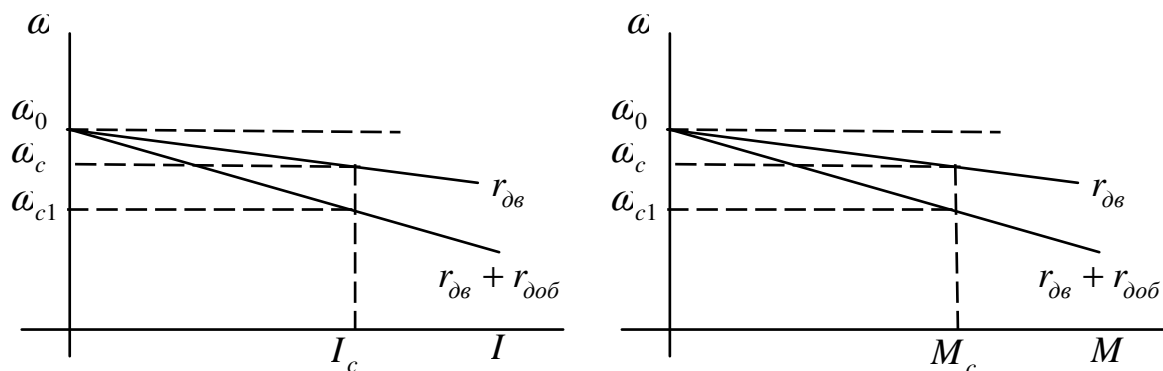
Уравнение 5.3 – механическая характеристика.

$$\frac{U}{k\Phi} = \omega_0; \quad \frac{M_c \cdot R}{(k\Phi)^2} = \Delta\omega.$$

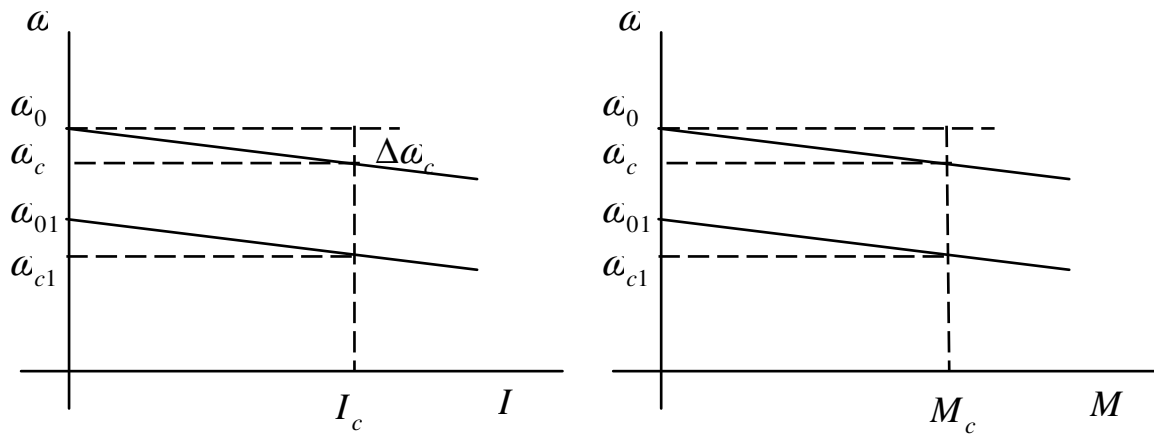


### Влияние $R_{я}$ , $U$ , $\Phi$ на внешний вид характеристик.

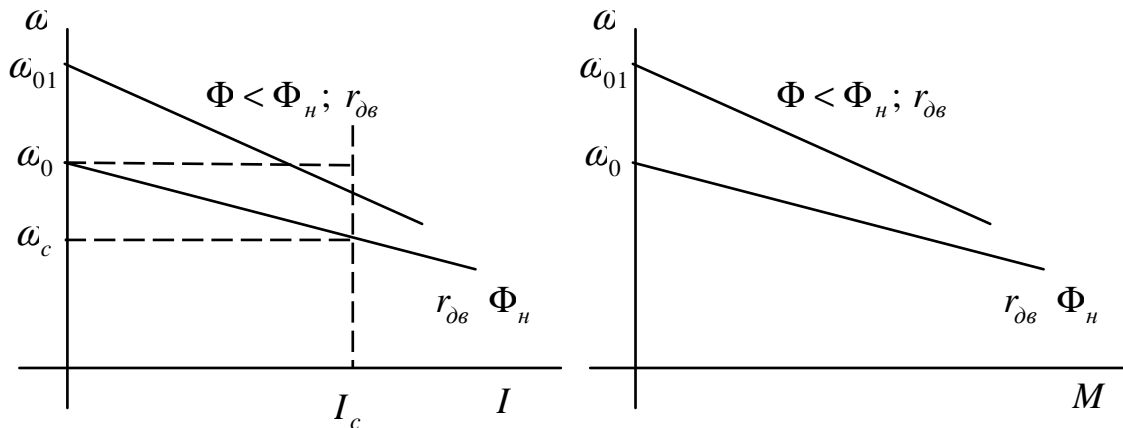
Если увеличим сопротивление якорной цепи:



Влияние  $U$ :



Влияние магнитного потока  $\Phi$ :



### Жесткость механической характеристики

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_c R}{(k\Phi)^2}; \quad \frac{M_c R}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \omega;$$

$$M = \omega_0 \frac{(k\Phi)^2}{R} - \omega \frac{(k\Phi)^2}{R}; \quad (5.4)$$

$$\beta = \frac{du}{d\omega};$$

$$\beta = \frac{-(k\Phi)^2}{R}; \quad (5.5)$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}; \quad (5.6)$$

### Построение характеристик ДПТ независимого возбуждения

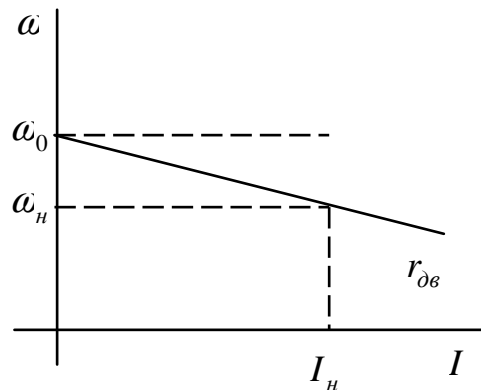
Построение электромеханических характеристик.

Дано:  $U_n, P_n, I_n, n_n, r_{\delta в}$ :

$$1) \quad \omega_n = \frac{\pi n_n}{30}.$$

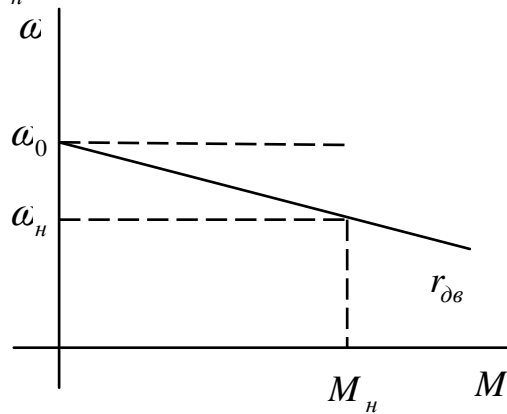
$$2) \quad k\Phi_H = \frac{U_H - I_H r_{\partial\delta}}{\omega_H}.$$

$$3) \quad \omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}.$$



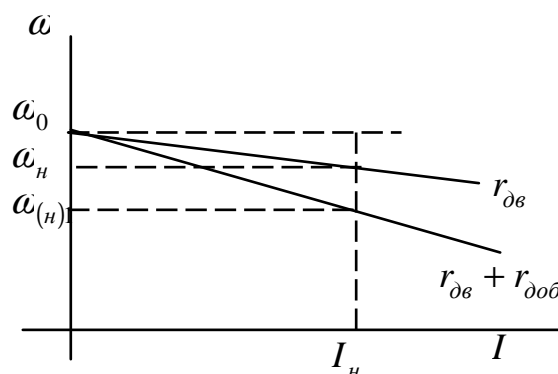
Для построения естественной механической характеристики 1 и 2 повторяются и дополнительно определяется  $M_H$ .

$$4) \quad M_H = k\Phi_H I_H.$$

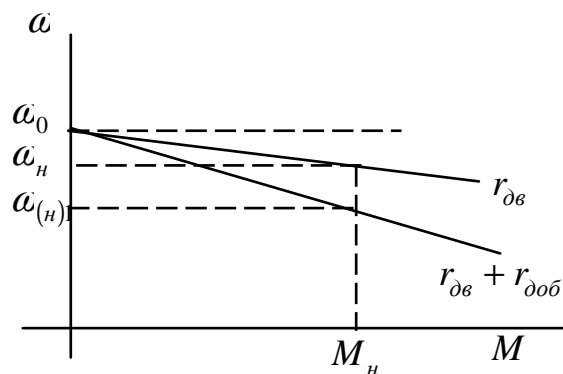


Построение искомой характеристики, при введении  $R_{\partial\partial\delta}$  в якорную цепь,

$$4) \quad \omega = \omega_0 - \frac{I_H (r_{\partial\delta} + r_{\partial\partial\delta})}{k\Phi_H}.$$



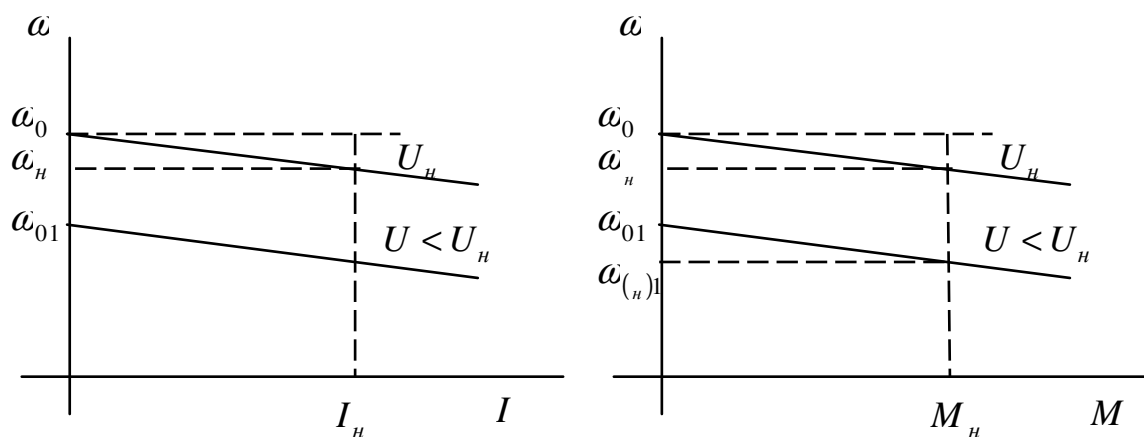
$$5) \quad \omega = \omega_0 - \frac{M_H (r_{\partial\delta} + r_{\partial\partial\delta})}{(k\Phi_H)^2}.$$



При построении искомым характеристик изменением  $U_{я}$  определяют  $\omega_0$ , так как перепад скорости от напряжения не зависит.

$$\omega_0 = \frac{U_{н}}{k\Phi_{н}};$$

$$U < U_{н}.$$



Пуск относительно единицы

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{\omega}}{\omega_0}; \quad \dot{U} = \frac{U}{U_{н}}; \quad \dot{M} = \frac{M}{M_{н}};$$

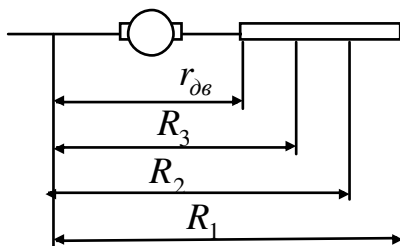
$$\dot{\Phi} = \frac{\Phi}{\Phi_{н}}; \quad \dot{R} = \frac{R}{R_{н}}; \quad \omega = \omega_0 - \Delta\omega;$$

$$\dot{\omega} = 1 - \dot{r}_{\delta в}; \quad (5.7)$$

$$\Delta\omega = \frac{I_{н} r_{\delta в}}{k\Phi_{н}}; \quad \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{I_{н} r_{\delta в}}{U_{н}} = \frac{r_{\delta в}}{R_{н}};$$

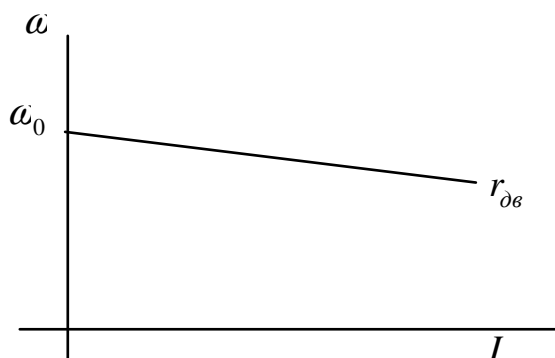
$$\omega_0 = \frac{U_{н}}{k\Phi_{н}}; \quad \Delta\dot{\omega} = \dot{r}_{\delta в}.$$

## Пуск. Расчет пускового реостата ДПТ независимого возбуждения



1. Расчет пускового реостата графоаналитическим методом:

1) Строится естественная характеристика  $\omega = f(I)$ .

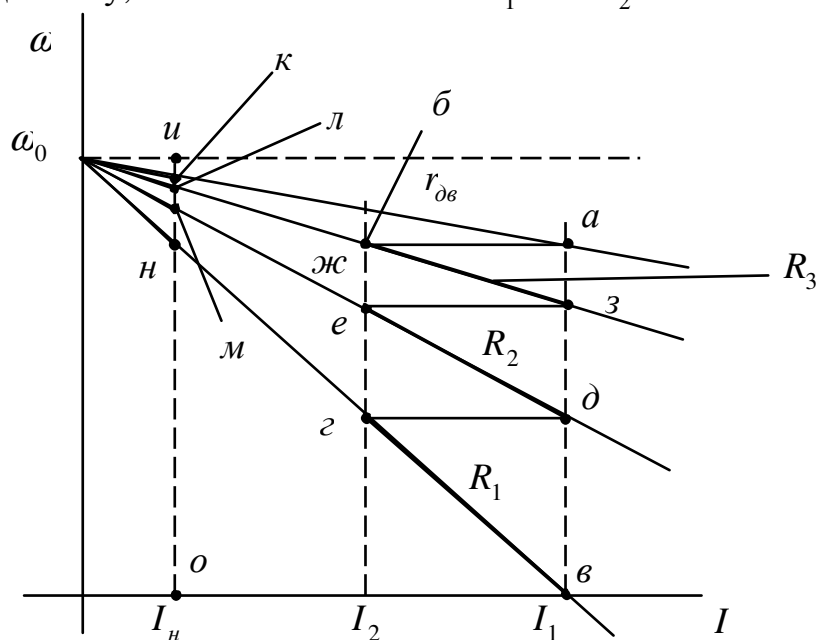


Задаются токами:

$$I_1 = (2 \div 2,5)I_n;$$

$$I_2 = (1,1 \div 1,2)I_c.$$

Пусковая диаграмма считается правильна в том случае, если диаграмма построенная снизу пройдет через точку  $a$ , при этом число ступеней должно равняться заданному, если иначе изменить  $I_1$  или  $I_2$ .



$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n}; \quad \Delta\omega = \frac{I_n R}{k\Phi_n};$$

$$R = R_n \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \quad (5.8)$$

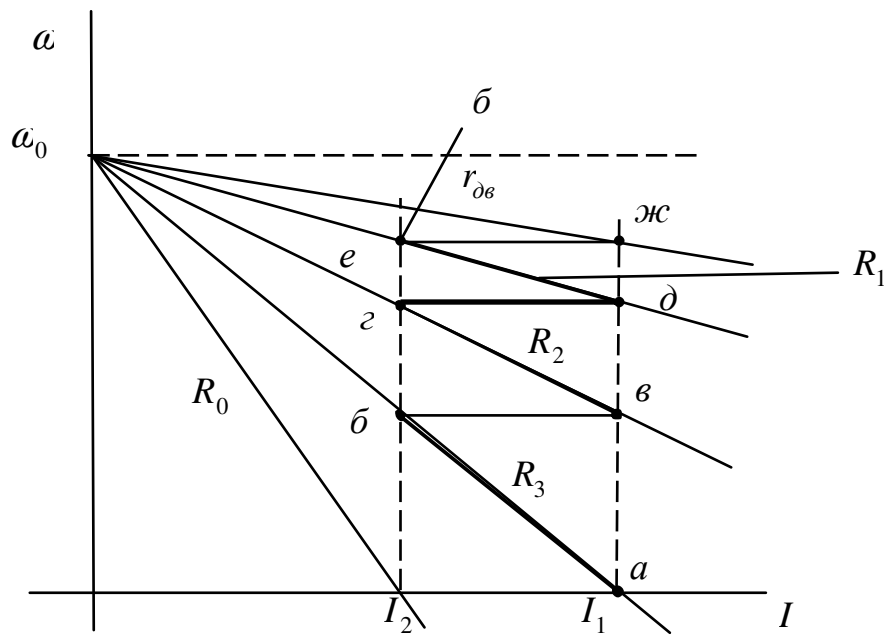
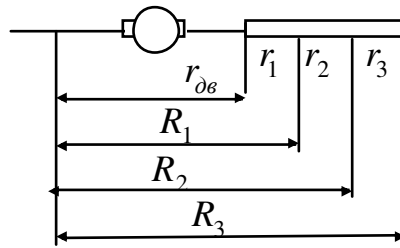
$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{I_H R}{U_H} = \frac{R}{R_H};$$

$$R_1 = R_H \frac{uH}{uO}; \quad r_1 = R_1 - R_2 = R_H \frac{uH - uM}{uO} = R_H \frac{HM}{uO};$$

$$R_2 = R_H \frac{uM}{uO}; \quad r_2 = R_2 - R_3 = R_H \frac{uM - uL}{uO} = R_H \frac{LM}{uO};$$

$$R_3 = R_H \frac{uL}{uO}; \quad r_3 = R_3 - r_{\partial\delta} = R_H \frac{uL - uK}{uO} = R_H \frac{KL}{uO}.$$

2. Расчет сопротивления пускового реостата аналитически:



2) Запишем уравнение тока  $I_1, I_2$  в точке ж:

$$I_1 = \frac{U_H - E_{ж}}{r_{\partial\delta}}; \quad (6.1)$$

$$I_2 = \frac{U_H - E_e}{R_1}, \quad (6.2)$$

так как скорость в точке e равна скорости в точке ж, то:

$$I_1 r_{\partial\delta} = I_2 R_1; \quad (6.3)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{r_{\partial\delta}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = \dots = \frac{R_m}{R_{m-1}}; \quad (6.4)$$

$\frac{I_1}{I_2} = \lambda$  – кратность тока при пуске.

$$\begin{cases} R_1 = r_{\partial\partial} \cdot \lambda \\ R_2 = R_1 \cdot \lambda = r_{\partial\partial} \cdot \lambda^2 \\ R_3 = R_2 \cdot \lambda = r_{\partial\partial} \cdot \lambda^3 \\ \dots \\ R_m = R_{m-1} \cdot \lambda = r_{\partial\partial} \cdot \lambda^m \end{cases} ; \quad (6.5)$$

Различают пуски:

1) форсированный пуск – задаются током  $I_1$  и числом ступеней  $m$ ;

2) нормальный пуск – задаются  $I_2$ .

При форсированном пуске при известном  $I_1$  и  $m$  находят  $I_2$ ,  $\lambda$ .

$$R_m = r_{\partial\partial} \cdot \lambda^m \quad \text{или} \quad R_m = \frac{U_H}{I_1};$$

$$r_{\partial\partial} \lambda^m = \frac{U_H}{I_1};$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda}; \quad (6.6)$$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{U_H}{I_1 r_{\partial\partial}}}; \quad (6.7)$$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2};$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda}; \quad (6.8)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\sqrt[m]{\frac{U_H}{I_1 r_{\partial\partial}}}} = I_1 \sqrt[m]{\frac{I_1 r_{\partial\partial}}{U_H}}; \quad (6.9)$$

Из формулы 6.6 можно найти число ступеней ( $m$ ):

$$m \ln \lambda = \ln \frac{U_H}{I_1 r_{\partial\partial}};$$

$$m = \frac{\ln \frac{U_H}{I_1 r_{\partial\partial}}}{\ln \lambda}. \quad (6.10)$$

При нормальном пуске задается  $I_2$  и  $m$  и находят  $I_1$  и  $\lambda$ . Для этого проводят характеристику через  $I_2$  и она имеет  $R_0$ .

$$R_0 = \frac{U_H}{I_2}; \quad (6.11)$$

$$R_m = \frac{U_H}{I_1};$$

$$\begin{aligned}
 R_0 I_2 &= U_H; & R_m I_1 &= U_H; \\
 R_0 I_2 &= R_m I_1; \\
 \frac{I_1}{I_2} &= \frac{R_0}{R_m}; & (6.12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_0 = R_m \cdot \lambda = r_{\partial\delta} \cdot \lambda^m \cdot \lambda = r_{\partial\delta} \lambda^{m+1}; & (6.13) \\
 r_{\partial\delta} \lambda^{m+1} &= \frac{U_H}{I_2};
 \end{aligned}$$

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{U_H}{I_2 \cdot r_{\partial\delta}}}; \quad (6.14)$$

$$I_1 = \lambda \cdot I_2 = I_2 \sqrt[m+1]{\frac{U_H}{I_2 \cdot r_{\partial\delta}}}. \quad (6.15)$$

## 6 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

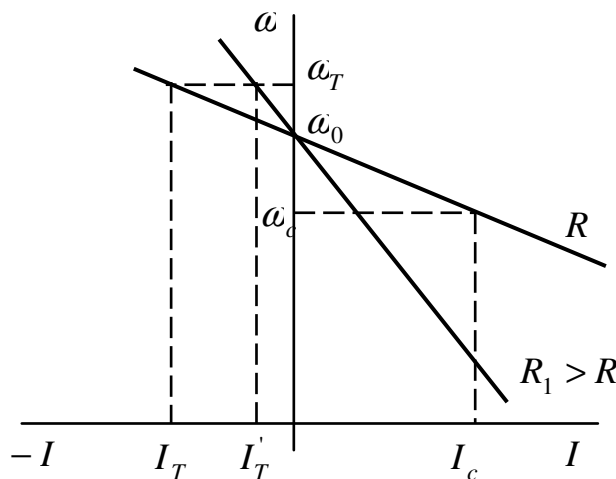
ДПТ может работать в трех режимах торможения:

– генераторное, с отдачей электроэнергии в сеть (рекуперативное торможение);

– динамическое торможение;

– торможение противовключением (работает последовательно с сетью).

1. Генераторное торможение с отдачей электроэнергии в сеть имеет место в том случае, когда якорь двигателя вращается со скоростью выше скорости идеального холостого хода, а ЭДС двигателя больше приложенного напряжения якоря. При этом двигатель может отдавать энергию в сеть за вычетом потерь.



$$\begin{aligned}
 -I &= \frac{U_H - E}{R}; \\
 E &> U_H; \\
 \omega_T &= \omega_0 + \frac{I_T \cdot R_T}{k\Phi_H}; & (6.16)
 \end{aligned}$$

Определение тормозного сопротивления для режима генераторного торможения.

Если известно  $\omega_T$  и  $I_1$ , то из 6.16 получим:



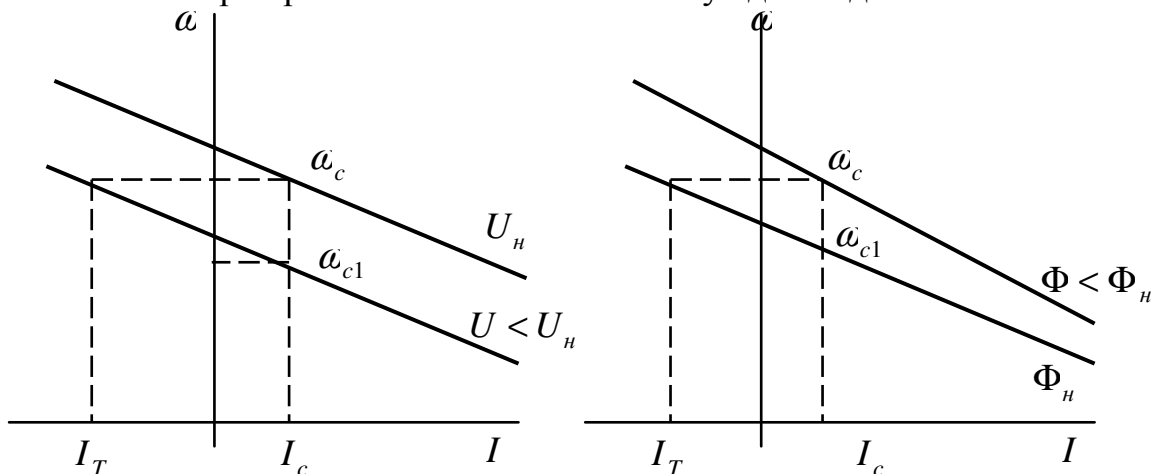
$$\omega_T = \omega_0 + \frac{I_T \cdot R_T}{k\Phi_H} = \omega_0 + \frac{U_H}{k\Phi_H} \cdot \frac{I_T \cdot R_T}{U_H}; \quad (6.17)$$

$$\omega_T - \omega_0 = \omega_0 \cdot \frac{I_T \cdot R_T}{U_H}; \quad \omega_T = \omega_0 + \omega_0 \cdot \frac{I_T \cdot R_T}{U_H};$$

$$\frac{\omega_T - \omega_0}{\omega_0} = \frac{I_T \cdot R_T}{U_H};$$

$$R_T = \frac{U_H}{I_T} \cdot \frac{\omega_T - \omega_0}{\omega_0}. \quad (6.18)$$

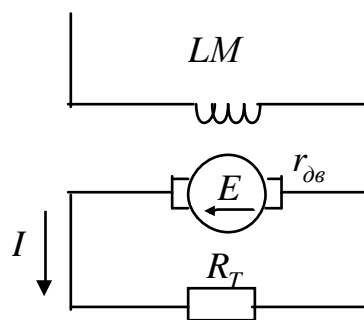
Этот вид торможения имеет вид при изменении скорости изменение напряжения на якоре при изменении потока возбуждения двигателя.



Особенности:

- 1) торможение сопровождается отдачей энергии в сеть;
- 2) с увеличением  $R_{я.ц.}$  при одной и той же скорости тормозной момент уменьшается, а при одном и том же тормозном моменте скорость растет;
- 3) этот вид торможения имеет место при регулировании скорости изменением напряжения приложенного к якору или изменением магнитного потока двигателя.

2. Динамическое торможение – имеет место в том случае, когда якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление тормозного реостата, а обмотка возбуждения остается включенной на сеть, при этом двигатель превращается в генератор с независимым возбуждением.



$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{IR}{k\Phi_H};$$

$$U_n = 0; \quad \omega = -\frac{IR}{k\Phi_n}. \quad (6.19)$$

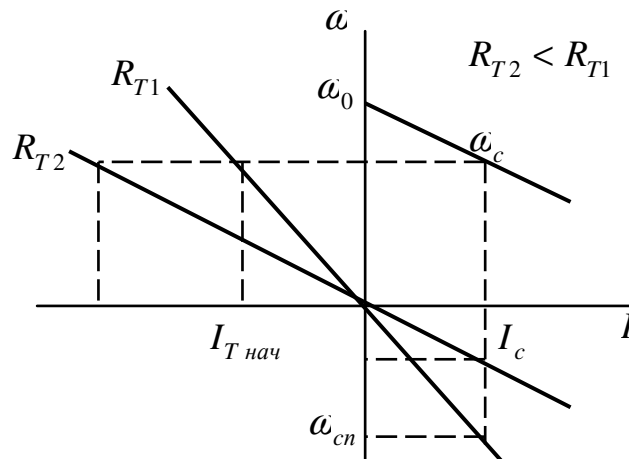
Уравнение 6.19 – электромеханическая характеристика.

$$\omega = -\frac{MR}{(k\Phi_n)^2}. \quad (6.20)$$

Уравнение 6.20 – механическая характеристика.

$\omega_{cn}$  – угловая скорость спуска.

Расчет сопротивления  $R_T$  – тормозного резистора (реостата) производится с использованием формулы 6.19.



режим динамического торможения при спуске

$$\omega_{T нач} k\Phi_n = I_{T нач} R_T; \quad \omega_{T нач} k\Phi_n = E_{T нач};$$

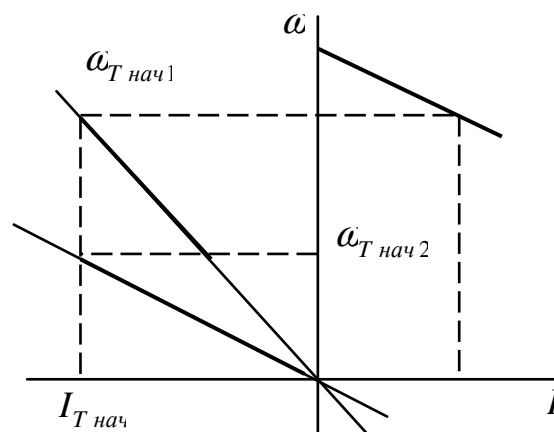
$$R_T = \frac{E_{T нач}}{I_{T нач}}; \quad (6.21)$$

$$\omega_{T нач} = \omega_0, \text{ а } \omega_0 k\Phi_n = U_n.$$

Величиной тока  $I_{T нач}$  или момента  $M_{T нач}$  задаются исходя из требуемого времени торможения или из допустимого начального тормозного момента.

Особенности:

- 1) экономичен, так как энергия из сети не потребляется;
- 2) обеспечивает высокую точность останова привода (точность останова выше, чем с меньшей скоростью тормозится двигатель, поэтому может применяться торможение в две или три ступени). Широко используется в приводах станков.



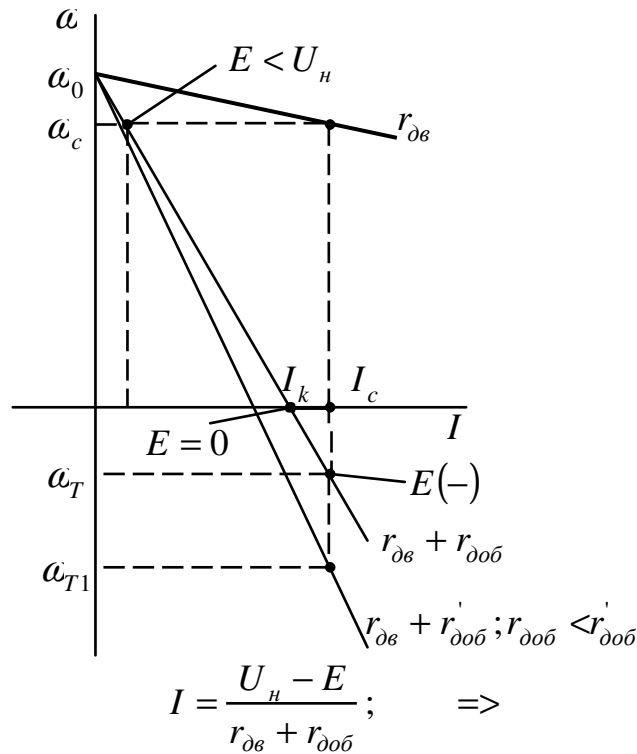
Недостатки: с уменьшением скорости тормозной момент (ток) уменьшается, что приводит к увеличению времени торможения.

3. Торможение противовключением – имеет место, в том случае, когда якорь двигателя включен для одного направления вращения, в действительности вращается в противоположном направлении.

Первый случай – режим тормозного спуска.

Второй случай – режим реверсивного торможения противовключением.

В первом случае, ни каких переключений в цепях двигателя не происходит.



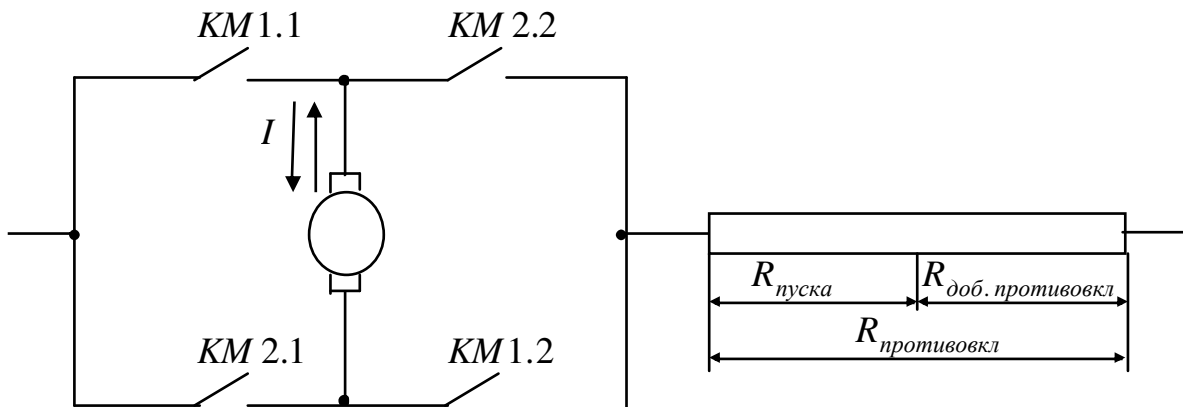
$M = k\Phi I$  – уменьшается, следовательно уменьшается скорость и ЭДС, уменьшается  $E = k\Phi\omega$  и двигатель реверсируется.

В точке  $E(-)$ , ток:

$$I = \frac{U_n + E}{r_{\delta в} + r_{\delta об}} .$$

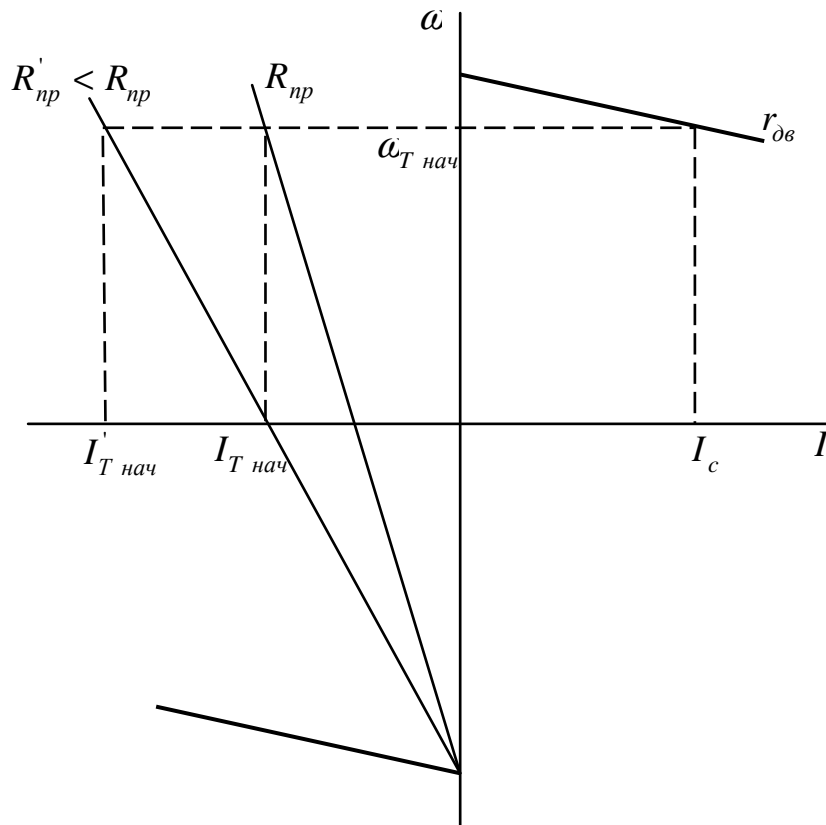
Этот способ имеет место при наличии активного момента сопротивления на валу двигателя.

Второй случай.



Надо применять знак момента развиваемого двигателем.

Сначала замкнуты  $KM1.1$  и  $KM1.2$ , а потом  $KM2.1$  и  $KM2.2$ , и отключаются  $KM1.1$  и  $KM1.2$ .



$$R_{np} = \frac{U_n + E_{T нач}}{I_{T нач}}; \quad (6.22)$$

$$E_{T нач} = k\Phi_n \omega_{T нач}.$$

В  $R_{np}$  входит  $R_{np} = R_{пуск} + R_{д. np}$

$$R_{д. np} = R_{np} - R_{пуск}; \quad (6.23)$$

$$I = \frac{U + E}{R};$$

$$IR = U + E$$

Умножим обе части уравнения на  $I$ :

$$I^2 R = IU + IE;$$

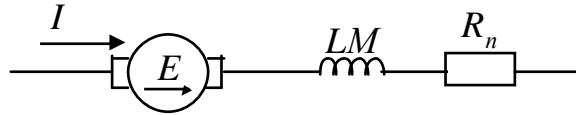
$$\Delta P = P_1 + P_2,$$

где  $\Delta P$  – потери энергии при торможении противовключением.

Особенности:

- 1) Торможение противовключением не экономично.
- 2) Торможение быстротечно.
- 3) При наличии активного момента на валу двигатель надо отключить после его останова и наложить тормоз, так как он начнет разгоняться в обратную сторону.

## 7 ЭПС ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ



$$r_{\text{дв}} = r_{\text{я}} + r_{\text{с}};$$

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}; \quad (7.1)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} + \frac{MR}{(k\Phi)^2}; \quad (7.2)$$

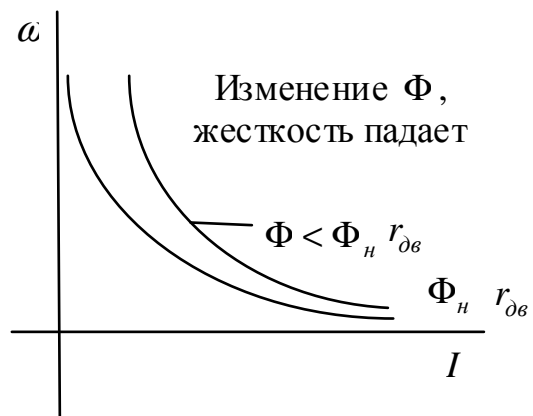
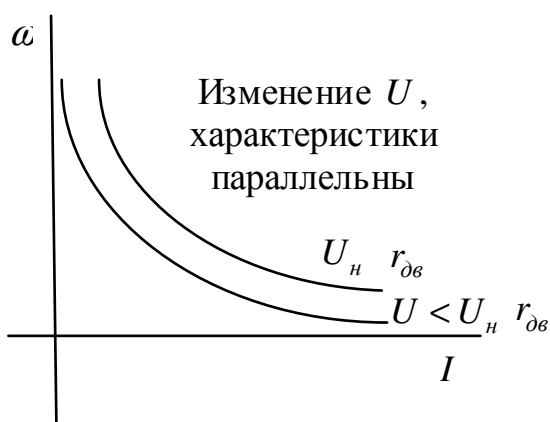
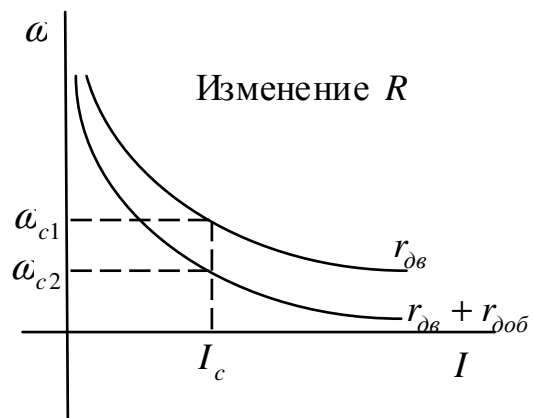
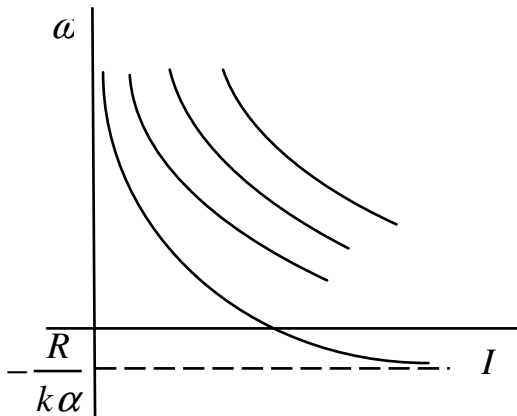
$$\Phi = \alpha I; \quad (7.3)$$

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{IR}{k\alpha I} = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}; \quad (7.4)$$

$$I \rightarrow 0; \quad \omega \rightarrow \infty;$$

$$I \rightarrow \infty; \quad \omega \rightarrow \frac{R}{k\alpha}.$$

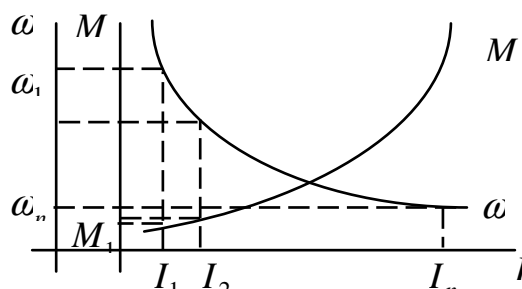
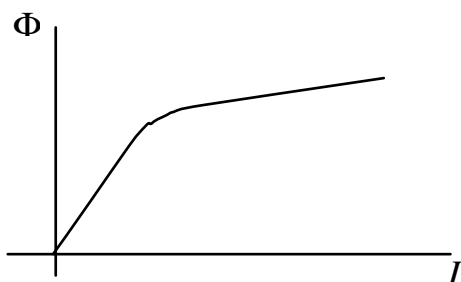
Влияние  $R, U, \Phi$  на вид характеристик:



С увеличением нагрузки ( $R$ ) жесткость растет (используется на всех металлургических кранах).

Построение характеристик:

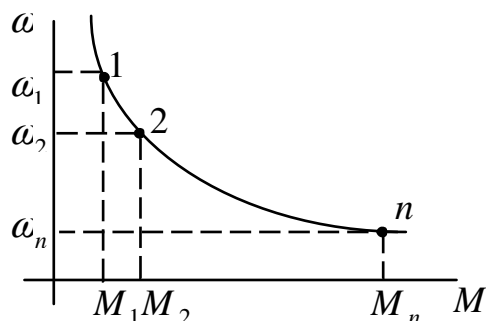
$$\dot{M} = \frac{M}{M_n} \Rightarrow M = \dot{M} \cdot M_n.$$



Построение естественных характеристик:

Механические характеристики строятся по данным каталога.

По графику находят  $\omega_1$  и  $M_1$  задаваясь током  $I_1$  и откладывают  $\omega_1$  и  $M_1$ , и так далее ( $\omega_2, M_2 \leftarrow I_2; \dots$ ).



Построение искомой электромеханической характеристики:

Уравнение для естественной характеристики:

$$\omega_e = \frac{U_n - I r_{\partial \partial \partial}}{k\Phi}; \quad (7.5)$$

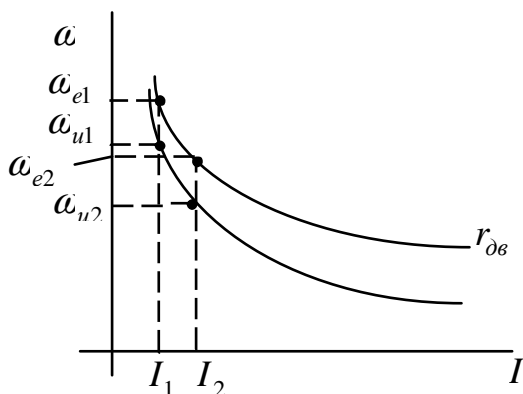
Уравнение искусственной характеристики:

$$\omega_u = \frac{U_n - I(r_{\partial \partial \partial} + r_{\partial \partial \partial \partial})}{k\Phi}; \quad (7.6)$$

Разделим уравнение 7.6 на 7.5, получим:

$$\omega_u = \omega_e \frac{U_n - I(r_{\partial \partial \partial} + r_{\partial \partial \partial \partial})}{U_n - I \cdot r_{\partial \partial \partial}}; \quad (7.7)$$

Для построения искусственной характеристики надо построить естественную, затем задаться значениями и тока найти скорость из формулы 7.7.



Построение искусственной механической характеристики осуществляется так же, как и естественной механической характеристики, с той разницей, что пользуются не естественной электромеханической характеристикой, а искусственной электромеханической характеристикой.

### Расчет сопротивлений пускового реостата

Чаще всего используют графоаналитический метод расчета.

1. Строится естественная электромеханическая характеристика:

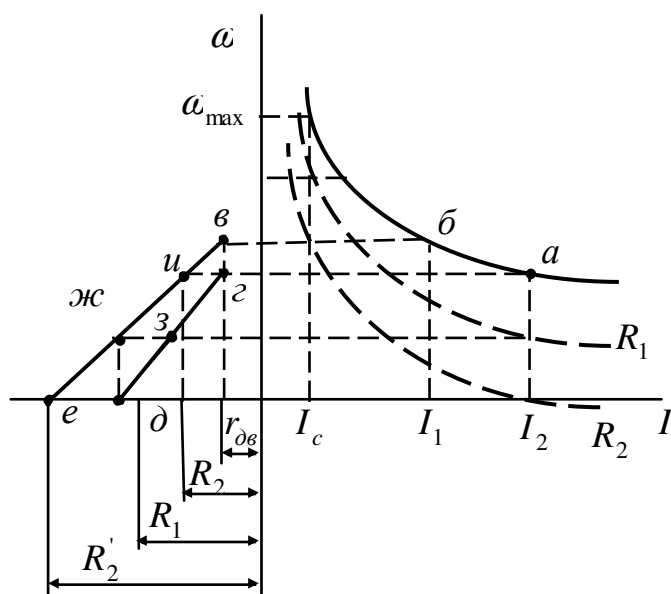


Рисунок 7.8 – естественная электромеханическая характеристика.

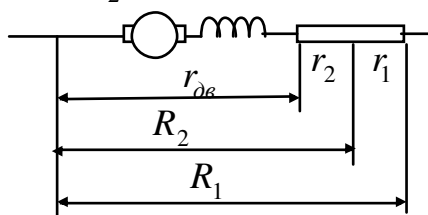
2. Задаются токами  $I_1$  и  $I_2$ , откладывают их.

$$I_1 = (2 \div 2,5)I_n;$$

$$I_2 = (1,1 \div 1,2)I_c.$$

3. Откладывают  $r_{дв}$  влево от характеристики.

4. Находим  $R_1 = \frac{U_n}{I_1}$ ;  $R_2 = \frac{U_n}{I_2}$ .



## 8 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

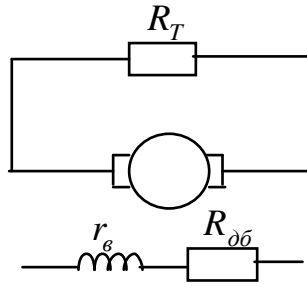
Может работать в двух тормозных режимах:

- динамическое торможение;
- торможение противовключением.

1. Динамическое торможение может осуществляться по двум схемам:

1) С независимым возбуждением – обмотка возбуждения отключается от двигателя и включается на сеть через добавочное сопротивление выбранное такой

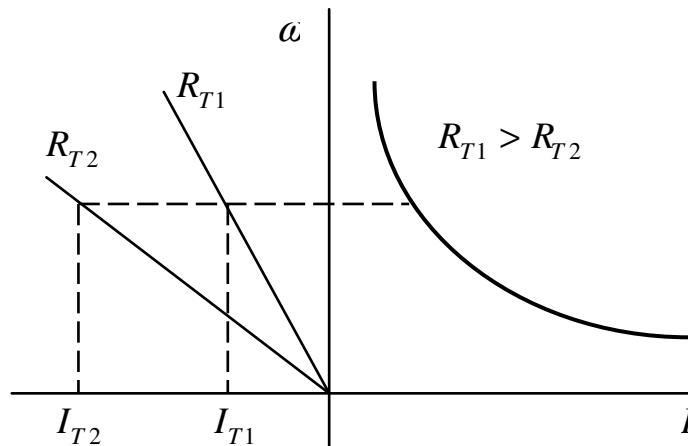
величины, чтобы получить номинальный магнитный поток. Якорь двигателя замыкается на сопротивление тормозного резистора.



$$R_n = \frac{U_n}{I_n};$$

$$R_n = r_e + R_{об};$$

$R_{об} = R_n - r_e$  – в этом случае получим  $\Phi_n$ .

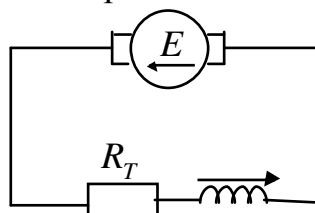


Характеристика такая же, как с ДПТ с независимым возбуждением, особенности те же, но так как  $I_n$  большой – то он неэкономичен.

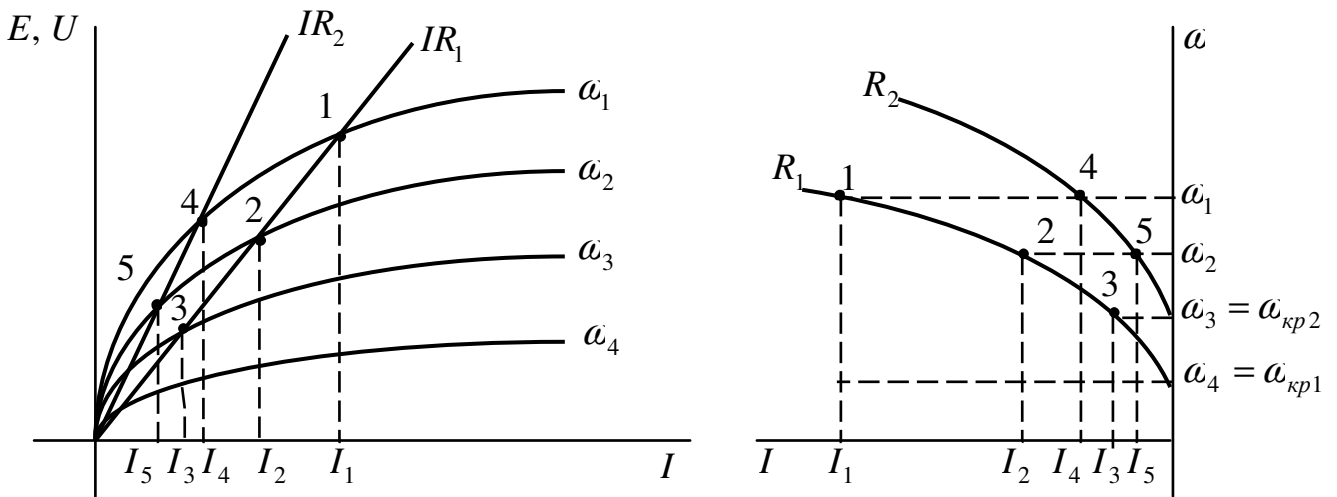
2) динамическое торможение с самовозбуждением – двигатель отключается от сети постоянного тока и замыкается на сопротивление тормозного реостата, таким образом, чтобы через обмотку возбуждения ток проходил в том же направлении что и в двигательном режиме во избежание размагничивания машины.

Сущность процесса заключается в том, что остаточным магнитным потоком в обмотках вращения якоря будет наводиться ЭДС – эта ЭДС вызовет появление дополнительного тока, который складываясь с током наведенным остаточным потоком увеличивает поток, что приведет к увеличению ЭДС, а следовательно к увеличению тока и так далее.

Установившийся режим при какой-то скорости наступает, когда ЭДС станет равной падению напряжения в якорной цепи.





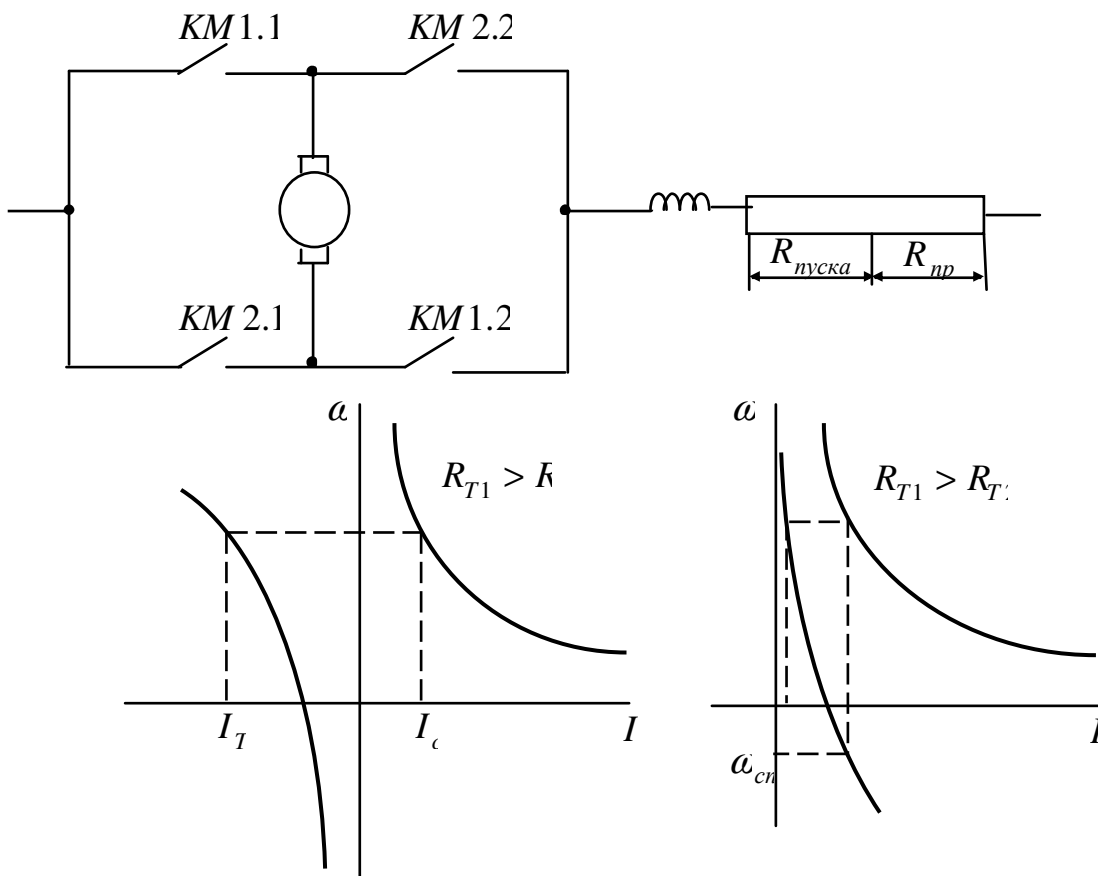


Особенности – самовозбуждение двигателя начинается при скорости выше критической, это приводит к тому, что в результате быстрого нарастания тормозящего момента при незначительном изменении скорости появляется динамический удар, который может привести к поломке зубьев, срезу шпонки, обрыву каната, поэтому такой вид торможения применяется, как аварийный, а именно, когда с установки будет снято напряжение, но груз опустить надо.

Экономично, так как энергия из сети не потребляется.

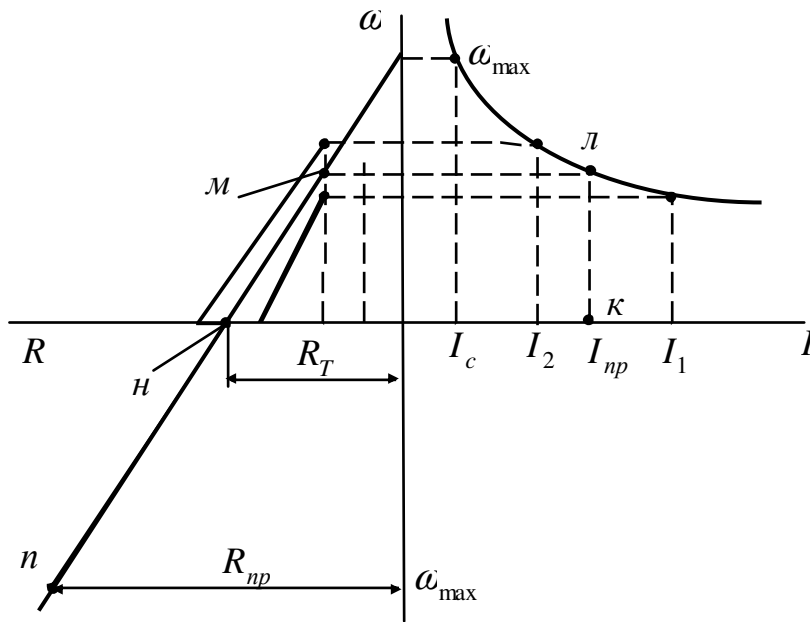
2. Торможение противовключением может осуществляться в режиме тормозного спуска или же реверсивного торможения противовключением.

Реверсивное торможение противовключением:



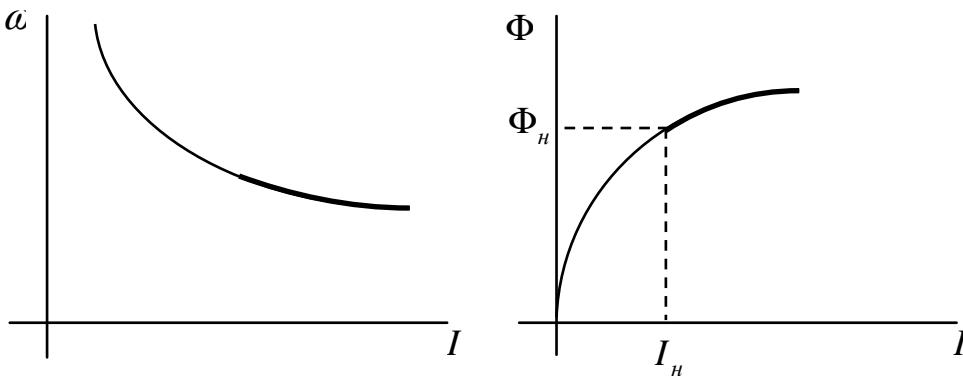
Расчет ступеней пускового реостата: (смотреть рис. 7.8) ток противовключения:  $I_1 > I_{np} > I_2$ .

$$R_r = \frac{U_H}{I_{np}}$$

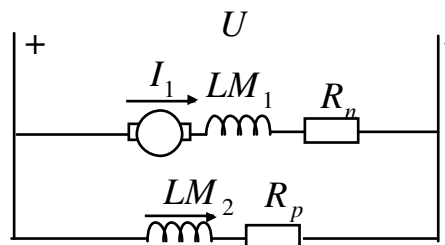


Особенности двигателя с последовательным возбуждением:

- большая жесткость при больших токах;
- эти двигатели могут иметь самые разнообразные характеристики при разных схемах включения.



### 9 ЭП С ДТП СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ



Уравнение электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U_H - I_{я} r_{\partial в}}{k(\Phi_M + \alpha I_{я})}; \quad (8.1)$$

$\Phi_M$  – магнитный поток параллельной обмотки возбуждения;

$\Phi_{\text{пос}} = \alpha I$  – магнитный поток последовательной обмотки возбуждения

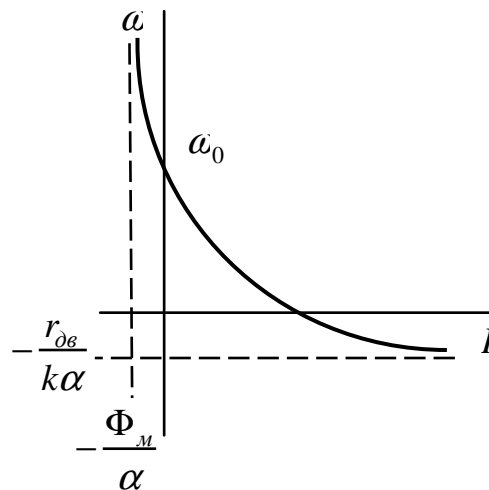
$$\omega = \frac{\frac{U_H}{I_{\text{я}}} - r_{\text{дв}}}{\frac{k\Phi_M + k\alpha}{I_{\text{я}}}}; \quad (8.2)$$

Если  $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ , то  $\omega = \frac{U_H}{k\Phi_M} = \omega_0$  – холостой ход.

Если  $I_{\text{я}} \rightarrow \infty$ , то  $\omega = -\frac{r_{\text{дв}}}{k\alpha}$ .

Если  $I_{\text{я}} \rightarrow -\frac{\Phi_M}{\alpha}$ , то  $\omega = \infty$ .

Если  $I_{\text{я}} \rightarrow \frac{U_H}{r_{\text{дв}}}$ , то  $\omega \rightarrow 0$ .



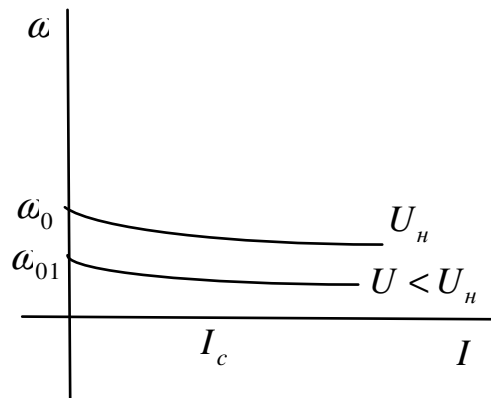
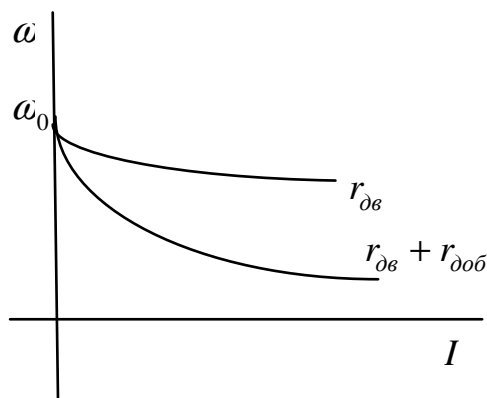
Уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}; \quad (8.3)$$

$$\Phi = \Phi_M + \Phi_{\text{пос}}$$

### Влияние на характеристику различных параметров

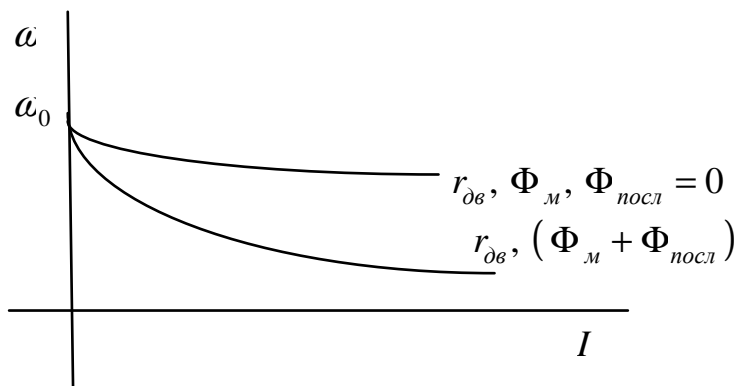
1) Влияние сопротивления якорной цепи



2) влияние напряжения, изменение скорости холостого хода.

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_m}; \quad (8.4)$$

3) меняем магнитный поток.



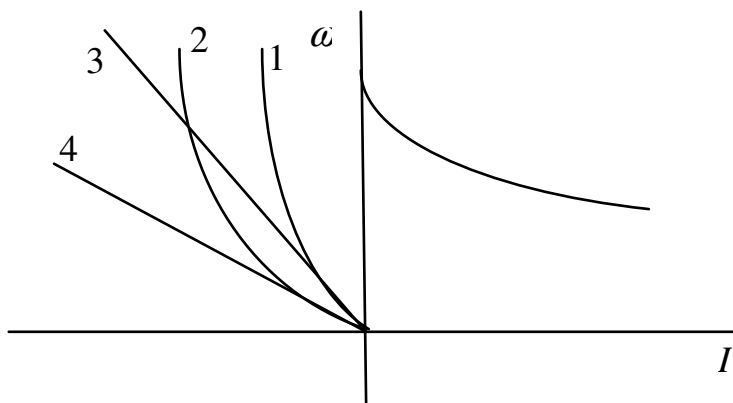
Построение характеристики осуществляется графоаналитически по данным каталога, как и для двигателя последовательного возбуждения.

## 10 ТОРМОЖЕНИЕ ДПТ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Возможны все три вида торможения:

- динамическое;
- противовключением;
- генераторное.

1. При динамическом – якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивления тормозного резистора.

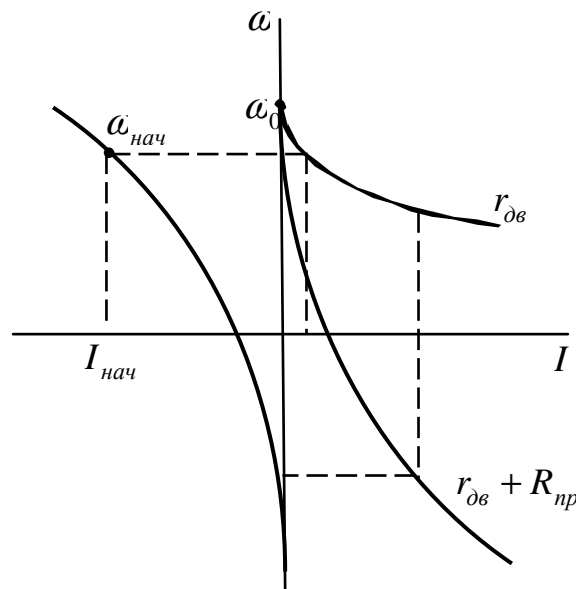


1 и 2 характеристики, полученные при замыкании тормозного резистора и последовательного возбуждения.

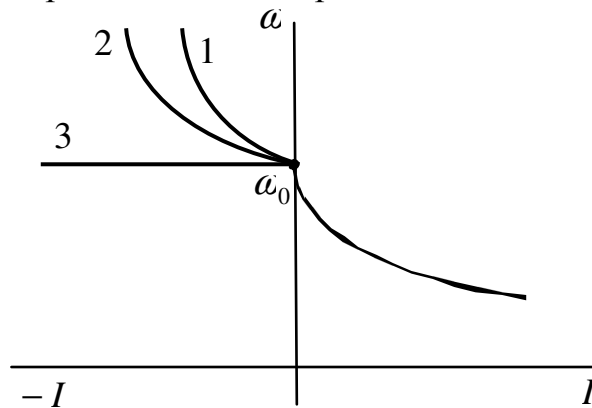
3 и 4 – полученные после закорачивания обмотки возбуждения.

2. Торможение противовключением:

- 1) реверсивное;
- 2) спуск-тормоз.



3. Генераторное торможение – закорачивается последовательная обмотка.



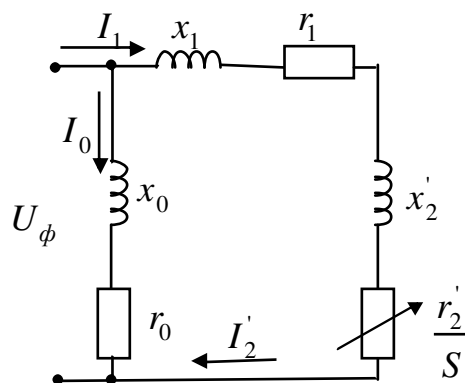
1 и 2 – при последовательной обмотке.

3 – закороченная последовательная обмотка.

## 11 ЭПС АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ (АД)

Схема замещения АД.

$\Gamma$  – образная:



$r_1, x_1$  – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора.

$r_2', x_2'$  – обмотки ротора приведенной к статору.

$I_1$  – ток статора.

$I_2'$  – ток ротора приведенный к статору.

$r_0, x_0$  – сопротивления (активное и индуктивное) контура намагничивания.

$I_0$  – ток контура намагничивания.

$U_\phi$  – напряжение на фазах.

$S$  – скольжение.

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

$\omega_0$  – скорость поля статора:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p};$$

$\omega$  – текущее значение скорости.

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

$n_0$  – скорость поля статора:

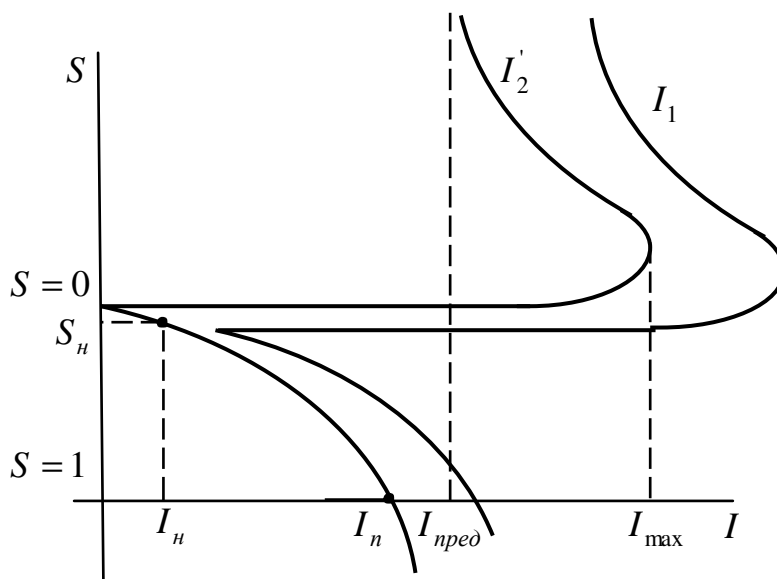
$$n_0 = \frac{60f}{p};$$

$$[n_0] = \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

### Уравнение тока и его анализ

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}}; \quad (9.1)$$

$$S \rightarrow 0 \quad I \rightarrow 0; \quad S \rightarrow 1 \quad I \rightarrow I_n; \quad S \rightarrow \infty \quad I \rightarrow I_{пред}; \quad S \rightarrow \frac{r_2'}{I} \quad I \rightarrow I_{\max}.$$



Ток статора получаем путем сложения  $I_1$  и  $I_0$ .

### Вывод момента АД и его анализ

Уравнение момента АД выводится исходя из предположения, что момент статора передается полностью ротору без потерь исходя из этого можно записать электромагнитную мощность:

$$P_{\text{эл. магн.}} = M\omega_0,$$

и мощность на валу:

$$P_g = M\omega.$$

Потери:

$$\Delta P = P_{\text{эл. магн.}} - P_g = M\omega_0 - M\omega = M \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \omega_0 = MS\omega_0; \quad (9.2)$$

$$\Delta P = m(I_2')^2 \cdot R_2', \quad (9.3)$$

где  $m$  – число фаз.

$$MS\omega_0 = m(I_2')^2 \cdot R_2';$$

$$M = \frac{m}{\omega_0} (I_2')^2 \cdot \frac{R_2'}{S} = \frac{m}{\omega_0} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{S}}{\left(r_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2};$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

$$M = \frac{m}{\omega_0} (I_2')^2 \cdot \frac{R_2'}{S} = \frac{mp}{2\pi f} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{S}}{\left(r_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (9.4)$$

Анализ:

$\frac{dM}{dS} = 0$ , то найдем условие существования экстремума, таким условием будет являться  $S_{кр}$ .

$$S_{кр} = \frac{R_2'}{\pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (9.5)$$

$x_k$  – индуктивное сопротивление двигателя.

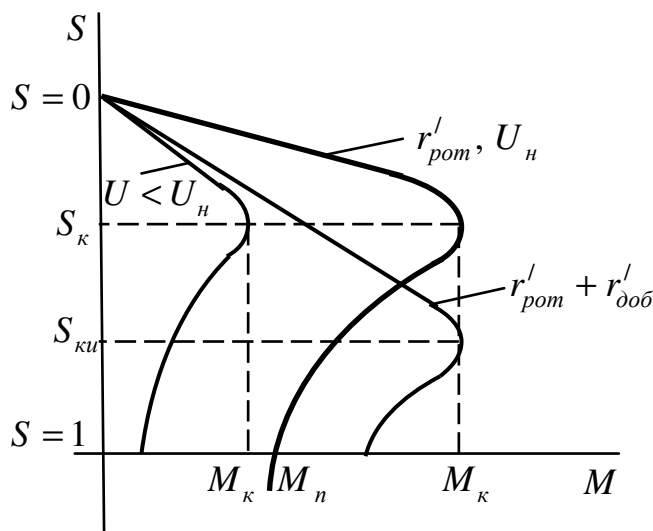
Если 9.5 подставить в 9.4, то получим  $M_{кр}$ .

$$M_{кр} = \frac{mp}{2\pi f} \frac{U_1^2}{2\left(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right)}; \quad (9.6)$$

$$x_k = x_1 + x_2'.$$

Если  $S = S_{кр}$        $M = M_{кр}$ ;

Если  $S = 1$        $M = M_n$ ;  
 Если  $S < 0$  – генераторное торможение;  
 Если  $S > 0$  – торможение противовключением.

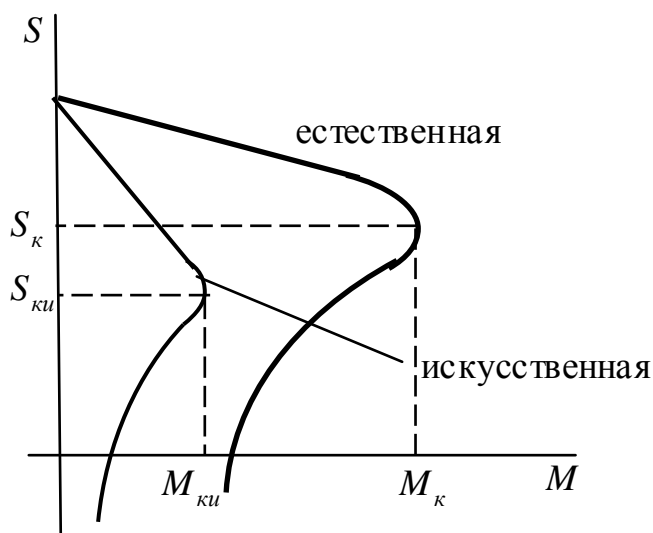


Из формулы 9.5 следует, что с активным сопротивлением роторной цепи  $S_k$  растёт.

Из формулы 9.6 следует, что  $M_{кр}$  от активного сопротивления ротора не зависит.

Если напряжение проводимое к статору будет отличаться от номинального, то тоже получим искусственную характеристику, то  $S_{кр}$  от напряжения не будет зависеть, а  $M_{кр}$  будет уменьшаться.

Если ввести добавочное сопротивление в цепь статора, то  $M_k$  и  $S_k$  уменьшатся.



### Уравнение Клосса, построение характеристик АД

Если раздели уравнения 9.4 на 9.6 и проведем некоторые преобразования, получим:



$$M = \frac{2M_k(1 + \varepsilon)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2\varepsilon}; \quad (9.7)$$

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}. \quad (9.8)$$

Упрощенная формула Клосса, если  $r_1 \approx 0$ :

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (9.9)$$

Построение естественных характеристик АД производят в последовательности:

Дано:  $P_n$ ,  $n_n$ ,  $\lambda_m$ .

1. Определим номинальное скольжение:

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0};$$

$$n_0 = \frac{60f}{p};$$

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0};$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}.$$

2. Определим скорость вращения  $\omega_n$ :

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}.$$

3. Определим номинальный момент:

$$M_n = \frac{1000P_n}{\omega_n}.$$

4. Определим критический момент:

$$M_k = M_n \cdot \lambda_m.$$

5. Определим критическое скольжение:

$$S_k = S_n \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right).$$

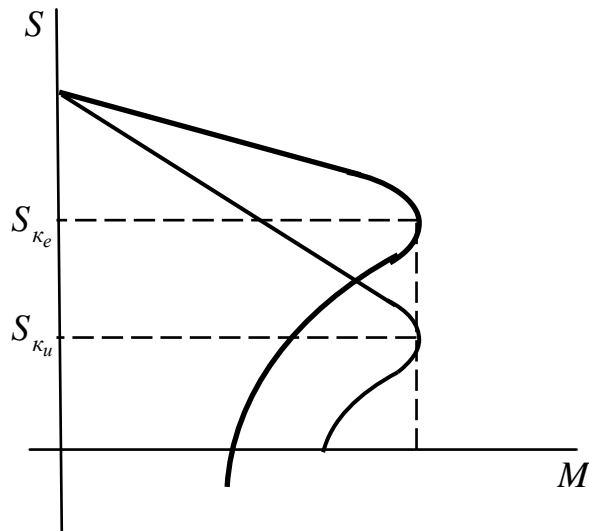
6.  $M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}$ , задавая значения  $S$  от 0 до 1 получим  $S = f(M)$ .

Построение искомой характеристики АД полученной введение добавочного сопротивления в цепь ротора.

Для этого также пользуются формулой Клосса, но вместо значения  $S_{ke}$  подставим значение  $S_{ku}$ .

$$S_{k_e} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}};$$

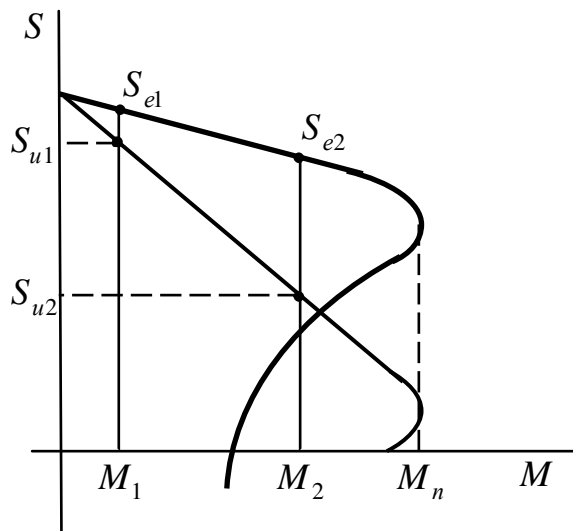
$$S_{k_u} = \frac{r_2' + r_{\partial\partial\partial}'}{\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}};$$



$$S_{k_u} = S_{k_e} \frac{r_2' + r_{\partial\partial\partial}'}{r_2'}; \quad (9.10)$$

$$\frac{S_u}{S_e} = \frac{S_{k_u}}{S_{k_e}};$$

$$S_u = S_e \frac{S_{k_u}}{S_{k_e}} = S_e \frac{r_2' + r_{\partial\partial\partial}'}{r_2'}. \quad (9.11)$$

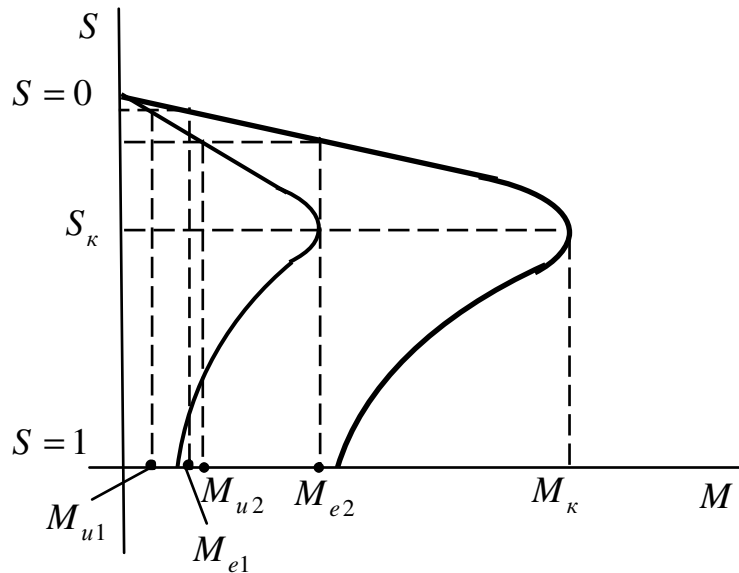


$$S_{u1} = S_{e1} \frac{r_2' + r_{\partial\partial\partial}'}{r_2'} = S_{e1} K;$$

$$S_{u2} = S_{e2} K.$$

Построение искомой характеристики АД при напряжении отличном от номинального.

Необходимо построить естественную характеристику:

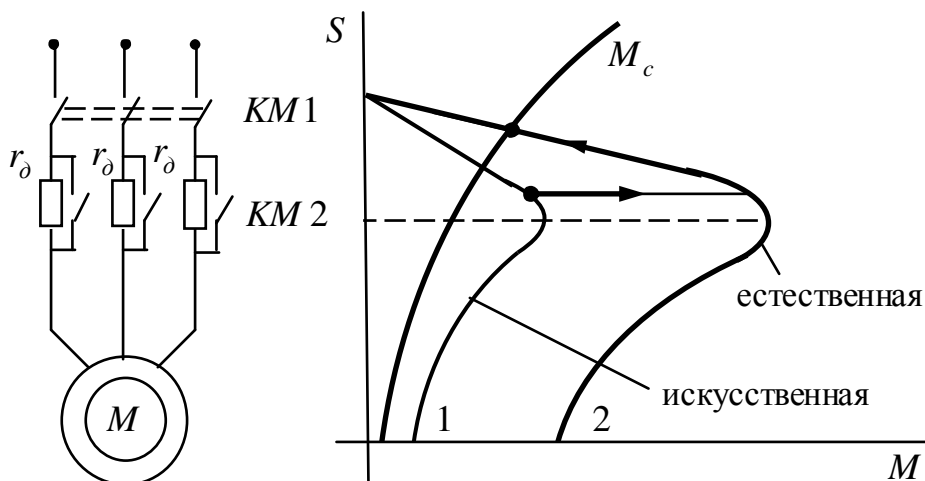


$$\begin{aligned}
 M_e &= U_n^2; \\
 M_u &= U^2; \\
 \frac{M_u}{M_e} &= \left( \frac{U}{U_n} \right)^2; \\
 M_u &= M_e \left( \frac{U}{U_n} \right)^2;
 \end{aligned} \tag{9.12}$$

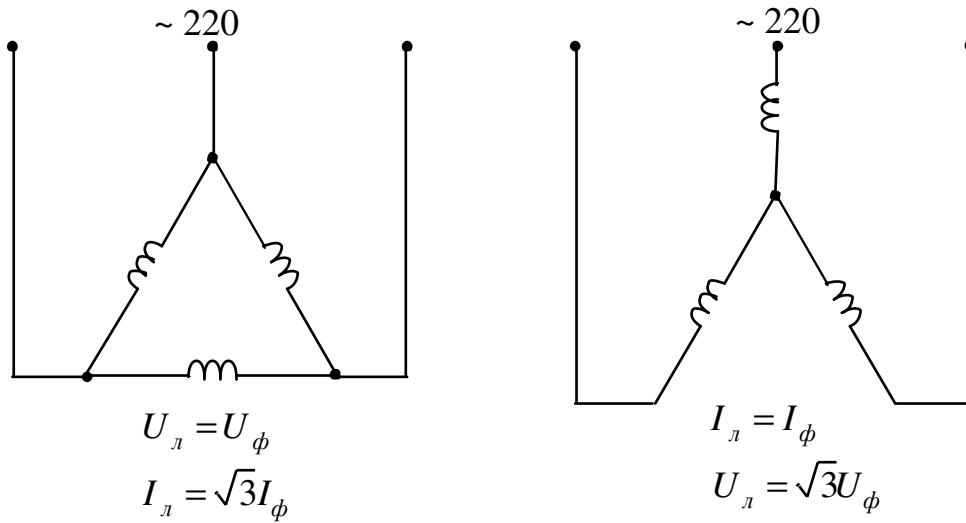
$$M_{u_1} = M_{e_1} \left( \frac{U}{U_n} \right)^2; \quad M_{u_2} = M_{e_2} \left( \frac{U}{U_n} \right)^2.$$

### Пуск АД с коротко замкнутым ротором

Если мощность коротко замкнутого АД соизмерима с мощностью питающего сеть трансформатора, то при включении АД за счет большого пускового тока в сети могут иметь место значительные потери напряжения, что приведет к опрокидыванию менее мощных двигателей питающихся от этой же сети. Для уменьшения пусковых токов на время пуска в цепь статора могут включаться активные сопротивления.



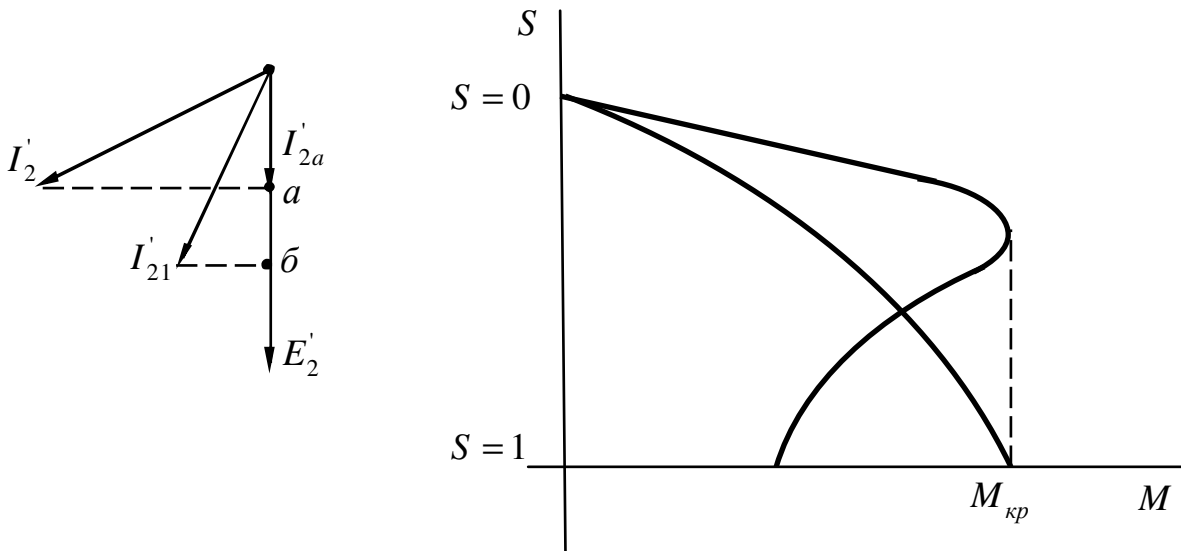
С этой же целью на время пуска могут включаться индуктивности, дроссели, автотрансформаторы. Имеет место также переключение двигателя с треугольника на звезду.



При переходе от треугольника к звезде уменьшается линейный ток в три раза и в эту же величину уменьшается момент.

### Пуск АД с фазным ротором

АД с фазным ротором имеет небольшой пусковой момент, иногда  $M_n$  настолько мал, что двигатель не может запуститься для увеличения  $M_n$  и уменьшения  $I_n$  в цепь ротора АД вводится  $R_{доб}$ . Кажущееся несоответствие легко объяснимо с помощью диаграммы:



$I'_{21}$  – ток с  $R_{доб}$ .

$$P = M\omega;$$

$$M = k\Phi I'_2 \cos \varphi = k\Phi I'_{2a};$$

$$r_2' < x_k;$$

Наибольшее значение  $M_n$  будет иметь в том случае, если  $S_k = 1$ .

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}; \quad r_1 \approx 0;$$

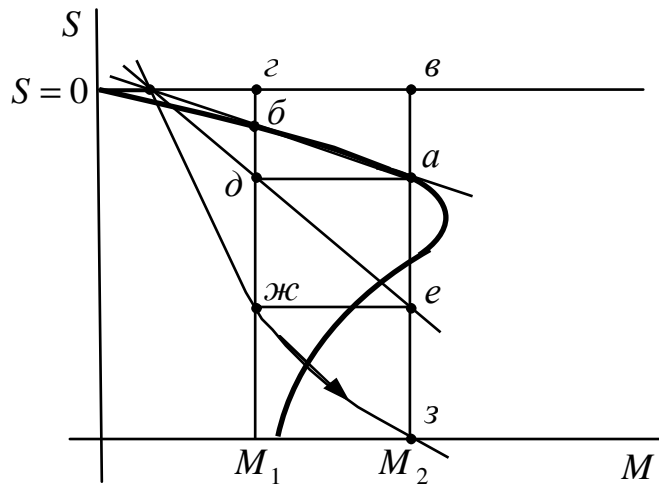
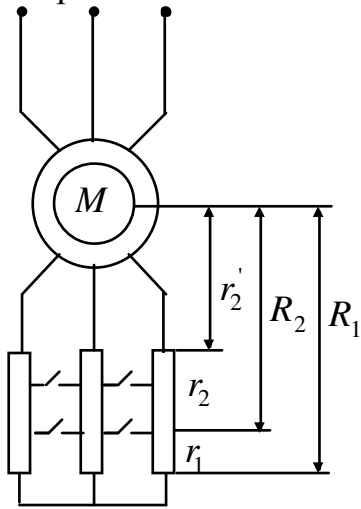
$$S_k = \frac{R_2'}{x_k} = 1;$$

$$R_2' = x_k;$$

### Расчет сопротивлений пускового реостата

Рассмотрим уточненный графоаналитический способ.

1. Строится естественная характеристика.



Задаются моментами:  $M_1 = 0,85M_n$  и  $M_2 = (1,1 \div 1,2)M_c$ , откладывают.

$$\frac{S_u}{S_e} = \frac{R}{r_p};$$

$$R = \frac{S_u}{S_e} r_p; \quad (10.1)$$

$$R_1 = \frac{S_1}{S_e} r_p = r_p \frac{e3}{ea};$$

$$R_1 = \frac{S_2}{S_e} r_p = r_p \frac{ee}{ea};$$

$$r_1 = R_1 - R_2 = r_p \frac{e3}{ea};$$

$$r_2 = R_2 - r_p = r_p \frac{ae}{ea}.$$

## 12 ТОРМОЖЕНИЕ АД

1. Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть в том случае, когда ротор АД вращается со скоростью выше скорости статора. В том случае АД

может отдавать активную энергию в сеть, а реактивная будет потребляться из сети, так как она ему необходима для создания магнитного поля.

$$I'_{2a} = I'_2 \cos \varphi_2 = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}} \cdot \frac{r_1 + \frac{r_2'}{S}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}} = \frac{U \left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}; \quad (10.2)$$

$$I'_{2реакт} = I'_2 \sin \varphi = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}} \cdot \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}} = \frac{U \cdot x_k}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}; \quad (10.3)$$

Из 10.2 следует, что при  $-\frac{r_2'}{S} < S < 0$ , активная энергия будет отдаваться в сеть.

При  $S < -\frac{r_2'}{S}$  – тормозной режим без отдачи энергии.

Реактивная энергия при любом  $S$  будет потребляться. Для построения характеристик в этом режиме используется формула Клосса, но в нее следует подставить критический момент для генераторного режима  $M_{кз}$ .

$$M_{кз} = \frac{mp}{\omega_0} \cdot \frac{U^2}{2\left(r_1 - \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right)}; \quad (10.4)$$

10.4 – генераторный режим.

$$M_{кд} = \frac{mp}{\omega_0} \cdot \frac{U^2}{2\left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right)}; \quad (10.5)$$

10.5 – двигательный режим.

$$\frac{M_{кз}}{M_{кд}} = \frac{\frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} + 1}{\frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} - 1} = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1};$$

$$M_{кз} = M_{кд} \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1}; \quad (10.6)$$

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \cdot \frac{r_1}{r_2} = S_{к} \cdot \frac{r_1}{r_2}; \quad (10.7)$$

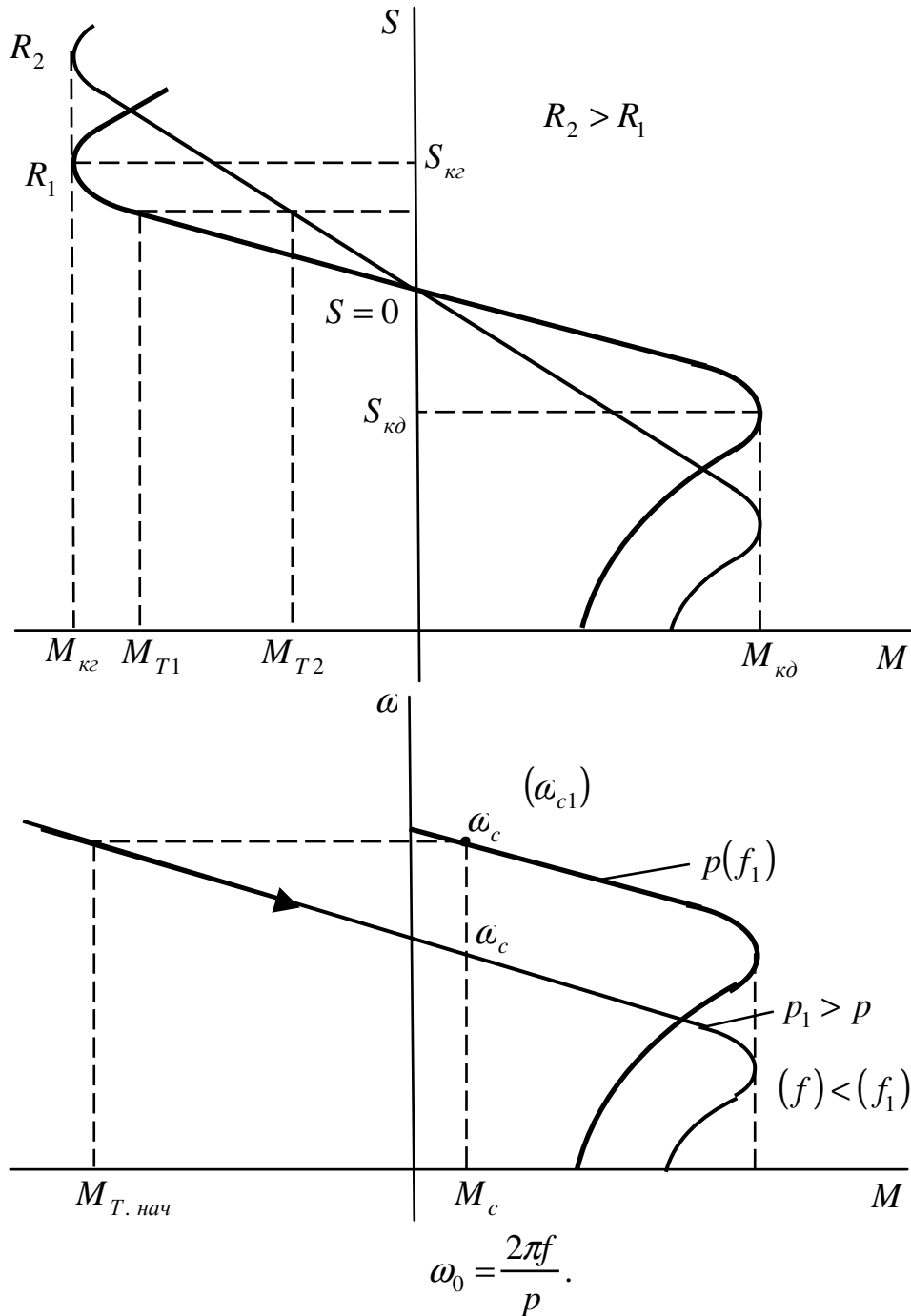
$$r_1 \approx r_2';$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{к}; \quad (10.8)$$

$$-S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0};$$

$$M = \frac{2M_{кГ}}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}; \quad (10.9)$$

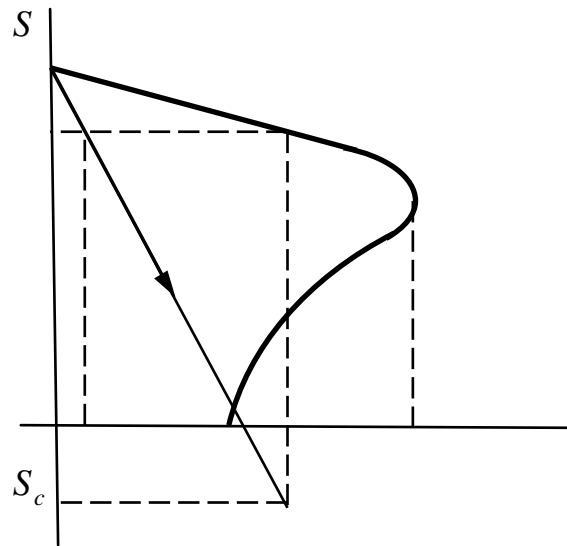
$$S_k = \frac{r_2'}{\pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2}}.$$



Этот режим также имеет место при регулировании скорости изменения числа пар полюсов и изменении частоты сети.

2. Торможение противовключением, имеет место в то случае, когда ротор вращается в одном направлении, а поле в противоположном.

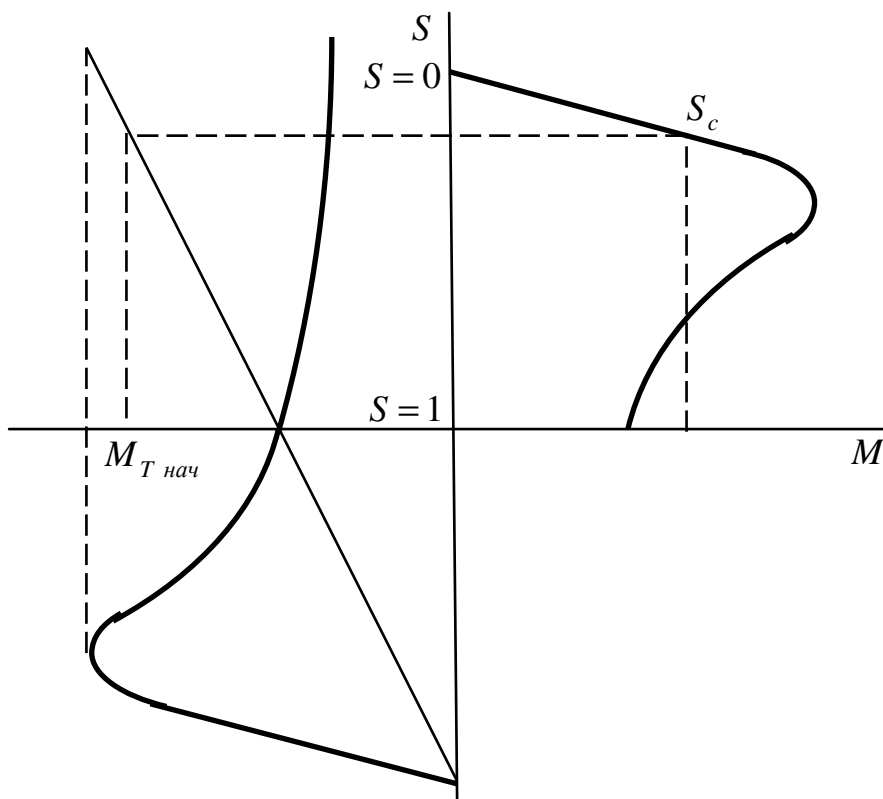
При этом двигатель работает, как генератор последовательно с сетью.



режим спуск-тормоз

### Реверсивное торможение

Величину сопротивления определяют исходя из нужной величины тормозного момента ( $M_T$ ).



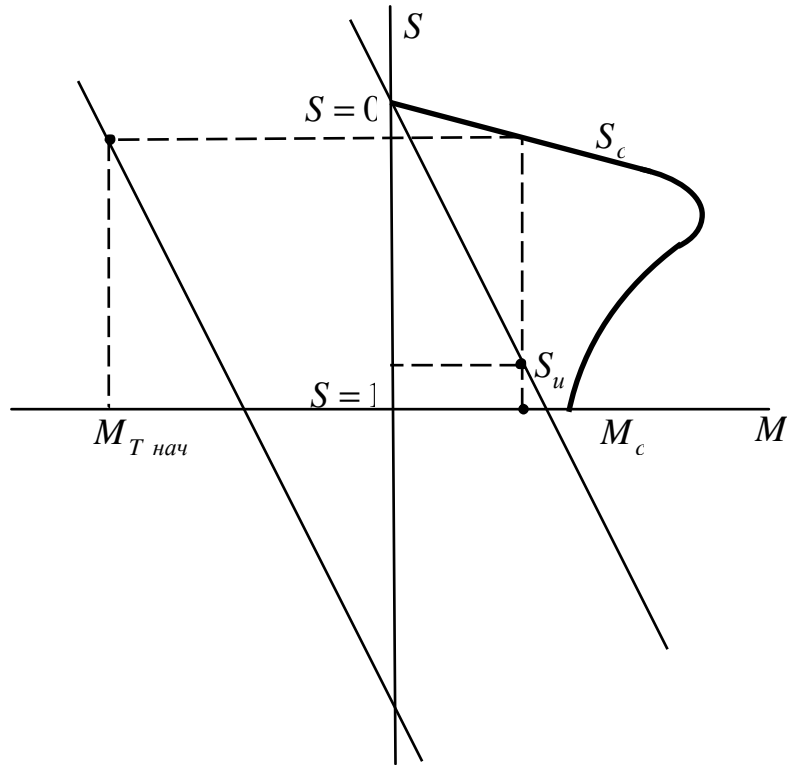
Строится естественная характеристика, задают начальный тормозной момент, определяют  $M_{c \min}$  и проводят горизонталь.

$$\frac{S_u}{S_e} = \frac{R_{np}}{r_p};$$

$$R_{np} = r_p \frac{S_u}{S_e}; \quad (10.10)$$



$$R_{np} = r_{\text{доб}} + R_{\text{пуск}} + R_{T. np}.$$

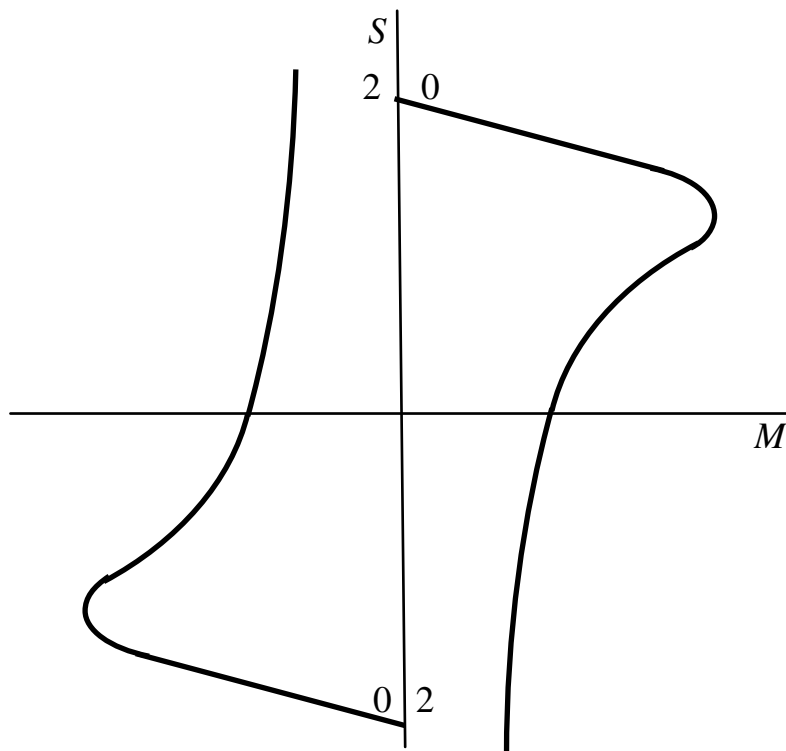


### Построение характеристик в режиме противовключения

Осуществляется по формуле Клосса, с той разницей, что скольжение больше 1.

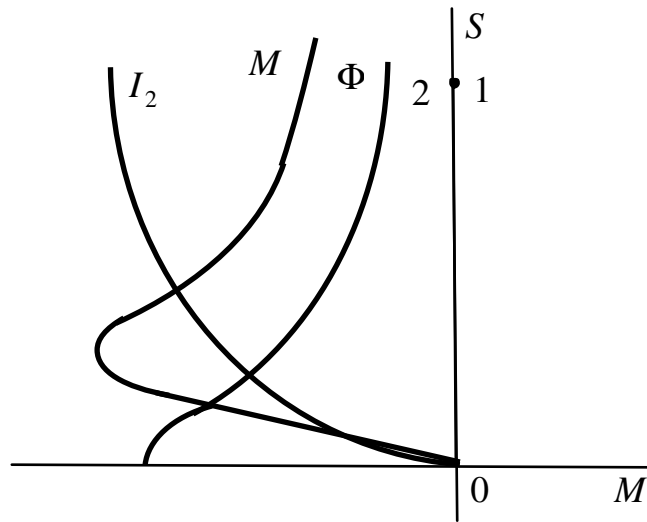
Торможение противовключением сопровождается большими потерями энергии.

$$\Delta P = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = M \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \omega_0 = M\omega_0 S = P_1 S \quad (10.11)$$



- 3) Динамическое торможение:  
 – независимым возбуждением;  
 – самовозбуждением.

При динамическом торможении с независимым возбуждением статор двигателя отключается от сети переменного тока и подключается на источник постоянного тока, при этом в витках вращающегося ротора неподвижным полем наводится ЭДС, протекает ток, который взаимодействуя с магнитным полем создает тормозной момент.



$$M = k\Phi I_2' \cos \varphi_2;$$

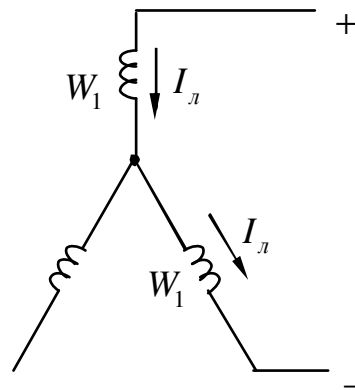
$$S_{дин} = \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$S_{двиг} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = 1 - S_{дин};$$

$$S_{дин} = 1 - S_{дв},$$

(10.12)

$S_{дин}$  – скольжение в динамическом режиме.



$$I_{экв} = I_{нос} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$I_2' = \frac{I_{\text{экв}} x_{\mu}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_{\mu} + x_2')^2}}; \quad (10.13)$$

$$M \omega_0 S = 3(I_2')^2 R_2';$$

$$M = \frac{3}{\omega_0} (I_2')^2 \frac{R_2'}{S} = \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{I_{\text{экв}}^2 \cdot x_{\mu}^2 \cdot \frac{R_2'}{S}}{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_{\mu} + x_2')^2}, \quad (10.14)$$

$x_{\mu}$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

$$S_{\kappa} = \frac{R_2'}{x_{\mu} + x_2'}. \quad (10.15)$$

Подставим в 10.14 10.15 и получим  $M_{\kappa p}$ :

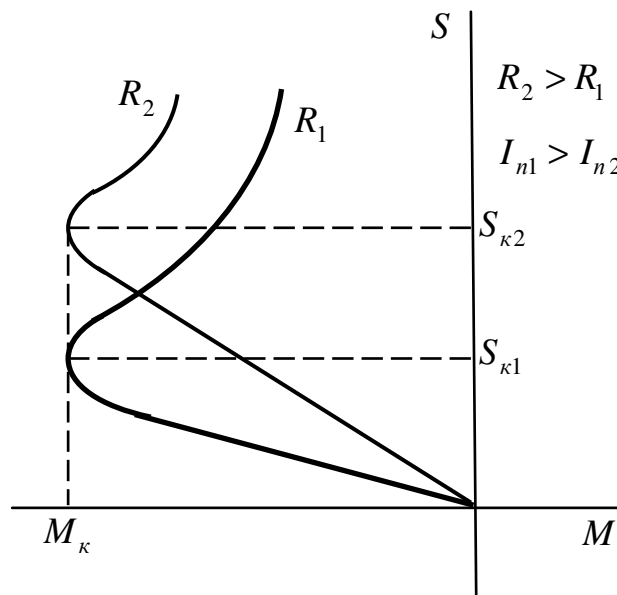
$$M_{\kappa} = \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{I_{\text{экв}}^2 \cdot x_{\mu}^2}{2(x_{\mu} + x_2')}; \quad (10.16)$$

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}}. \quad (10.17)$$

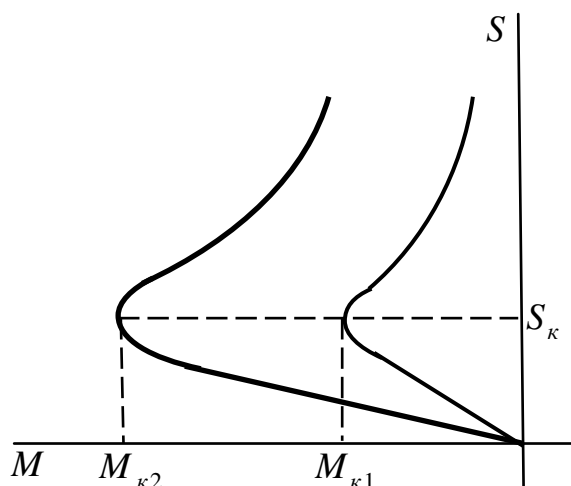
Уравнение 10.17 – для построения характеристик АД в режиме динамического торможения с независимым возбуждением.

Способы изменения тормозящего момента:

– возможен для торможения АД с фазным ротором, для АД с коротко замкнутым ротором невозможен;



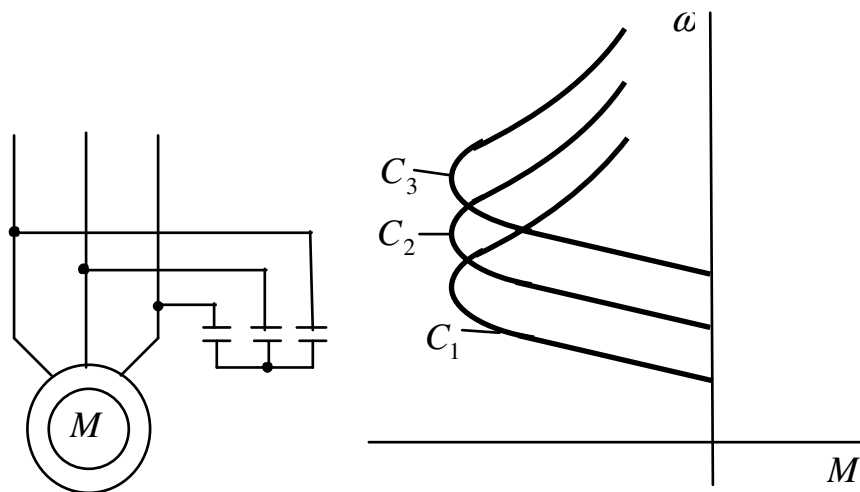
– возможен для АД с коротко замкнутым и фазным ротором.



Для построения характеристики АД в этом режиме задаются значениями  $M_{к}$  и  $S_{к}$ , затем их подставляем в формулу 10.17 и задаваясь  $S$  от 0 до 1 строим характеристику.

Зная  $M_{к}$  по формуле 10.16 определяем  $I_{экр}$ , а зная  $S_{к}$  по формуле 10.15 определим  $R_2'$ .

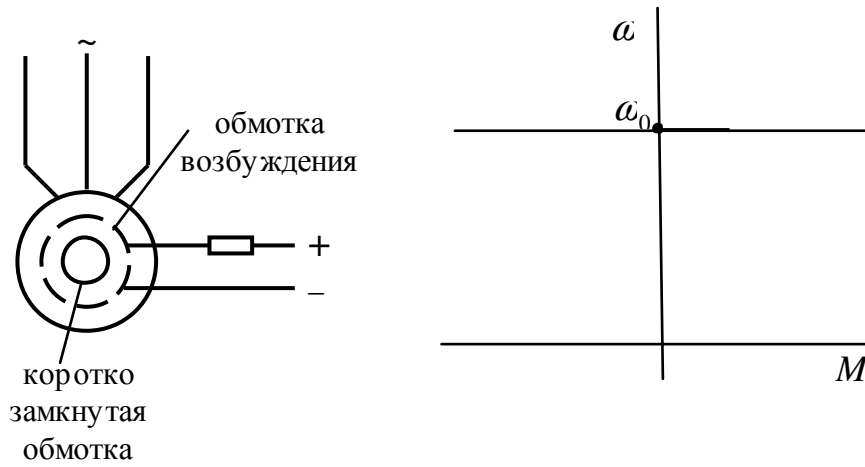
Динамическое торможение с самовозбуждением, имеет место в том случае, когда статор АД отключается от сети переменного тока и замыкается на батарею конденсаторов.



$C_1 > C_2 > C_3$  – применяется в станочном приводе.

### 13 ЭП С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

СД выполняются большой мощности, нерегулируемые, имеют жесткую характеристику. У него на якоре две обмотки: пусковая и возбуждения.



$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

Электромагнитный момент СД:

$$M = \frac{m}{\omega_0} \left[ \frac{UE \sin \Theta}{x_d} + \frac{U^2 \sin 2\Theta}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right]; \quad (11.1)$$

$$M_{\text{синх}} = \frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{UE \sin \Theta}{x_d}. \quad (11.2)$$

$M_{\text{синх}}$  – синхронный момент.

$$M_{\text{реакт}} = \frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{U^2 \sin 2\Theta}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right), \quad (11.3)$$

$\omega_0$  – скорость поля статора;

$m$  – число фаз;

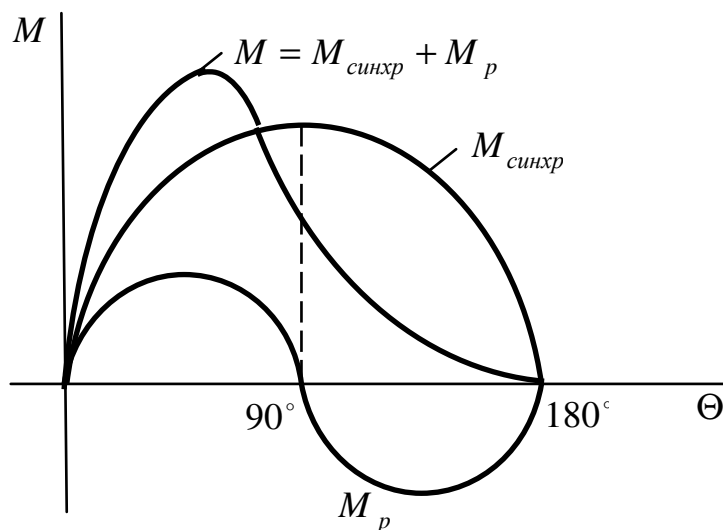
$U$  – фазное напряжение;

$E$  – ЭДС статора;

$\Theta$  – угол сдвига между напряжением и ЭДС;

$x_q, x_d$  – индуктивные сопротивления СД.

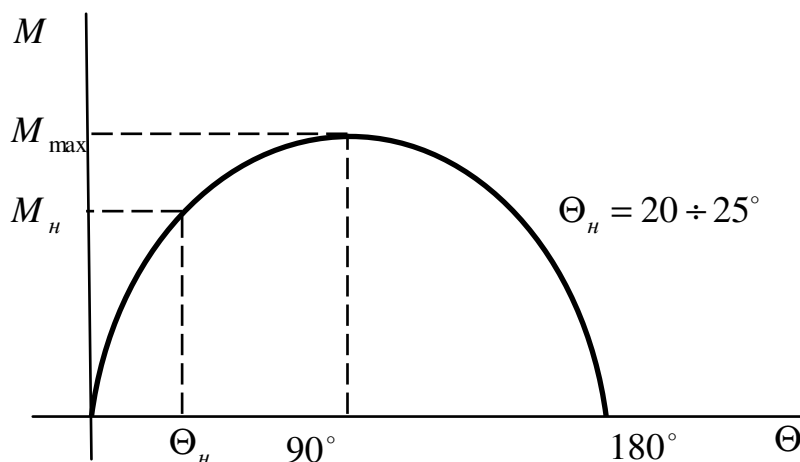
Пользуясь 11.2 и 11.3 можно представить угловую характеристику СД:



У СД с неравно выраженными полюсами:

$$x_q \approx x_d \Rightarrow M_p = 0;$$

$$M = M_{\text{синхр}} = \frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{UE \sin \Theta}{x_d}.$$



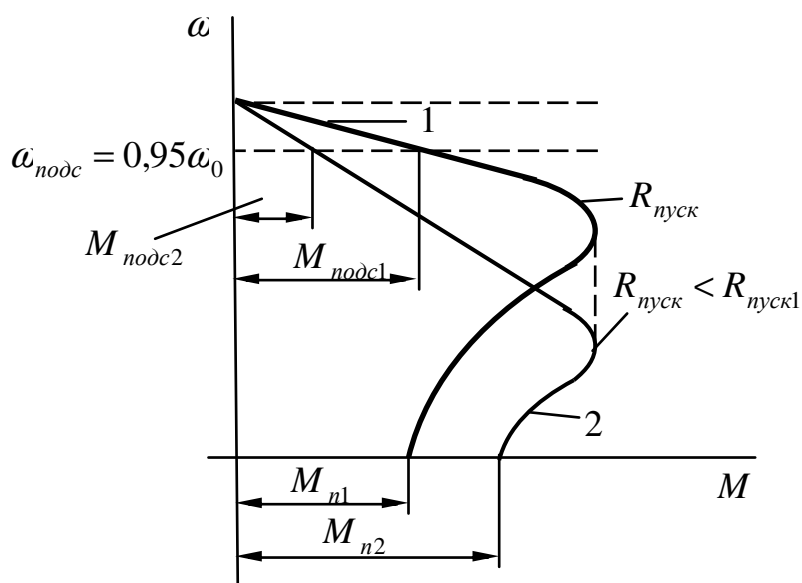
$$M = \frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{UE}{x_d}; \quad (11.4)$$

$$M = M_{\text{max}} \cdot \sin \Theta. \quad (11.5)$$

СД обладают большой перегрузочной способностью, за счет зазора между якорем и статором, при износе подшипников СД, или посадке якоря – потерь не будет.

Перегрузочная способность СД составляет 2-2,5, для увеличения перегрузочной способности – увеличивают ток возбуждения.

### Пуск СД. Режим тяжелого и легкого пуска

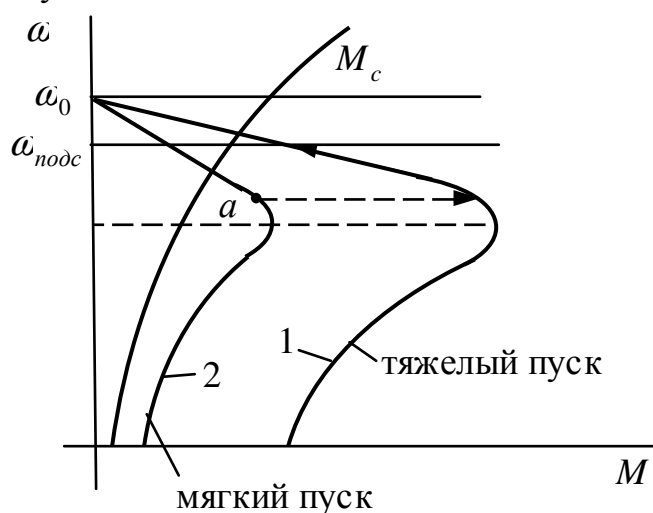


Под синхронная скорость:

$$\omega_{\text{подс}} = 0,95\omega_0$$

При пуске СД из сети потребляют ток большой величины  $I_n = (5 \div 6)I_n$ , поэтому реактор пуска (индуктивность) или трансформаторный пуск.

Реакторный пуск:



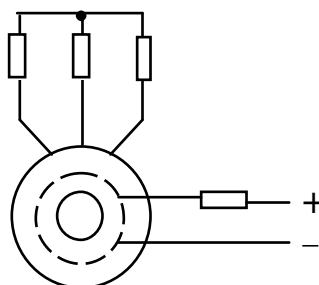
Вид пуска определяется характеристикой производственного механизма ( $M_c$ ).

При легком пуске подача возбуждения на СД производится при наличии реактора в цепи статора, если пуск тяжелый – подача возбуждения производится при шунтирующем реакторе. На рисунке изображена характеристика производственного механизма при которой может быть осуществлен только тяжелый пуск СД, а именно в начале двигатель разгоняется по характеристике 2 до точки  $a$ , затем реактор шунтируется, двигатель переходит на характеристику 1, по которой разгоняется до  $\omega_{подс}$ , а затем подается возбуждение.

## 14 ТОРМОЖЕНИЕ СД

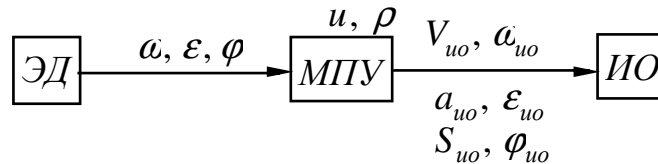
Применяют динамическое торможение и противовключение.

При динамическом торможении: статор СД отключается от сети переменного тока и замыкается на сопротивлении тормозного реостата, а обмотка возбуждения продолжает питаться постоянным током, поэтому имеем магнитное поле создаваемое постоянно обмоткой возбуждения, которая вращается вместе с якорем.



Торможение противовключением имеет место при изменении направления вращения поля статора, в этом случае в коротко замкнутых обмотках ротора наводится ЭДС – протекает ток, который взаимодействуя с полем статора создает тормозящий момент. Наводимый ток достигает большой величины и может перегреть пусковую обмотку (не применяется, хотя эффективен).

## 15 ПОНЯТИЕ О РЕГУЛИРОВАНИИ КООРДИНАТ



*МПУ* – механическое передаточное устройство;

*ИО* – исполнительный орган;

$\omega, \varepsilon, \varphi$  – скорость, ускорение и угловое положение якоря двигателя;

$u, \rho$  – передаточное число и радиус приведения ПУ;

$V_{ио}, a_{ио}, S_{ио}$  – линейная скорость, ускорение, положение ИО;

$\omega_{ио}, \varphi_{ио}, \varepsilon_{ио}$  – угловая скорость, положение, ускорение ИО.

$$\omega_{ио} = \frac{\omega}{u}; \quad (11.6)$$

$$V_{ио} = \omega \cdot \rho. \quad (11.7)$$

Из 11.6 и 11.7 следует, что:

1) за счет изменения передаточное число  $u$  или радиуса приведения  $\rho$  при неизменной скорости двигателя  $\omega$  – механический способ регулирования.

$$u = \text{var}; \quad \rho = \text{var}; \quad \omega = \text{var}.$$

2)  $u = \text{const}; \quad \rho = \text{const}; \quad \omega = \text{var}$  – электрический.

$$\varepsilon_{ио} = \frac{\varepsilon}{u}; \quad a_{ио} = \varepsilon \cdot \rho; \quad \varphi_{ио} = \frac{\varphi}{u}; \quad \varphi_{ио} = \frac{\varphi}{u} - \text{можно регулировать за счет}$$

$\omega$ .

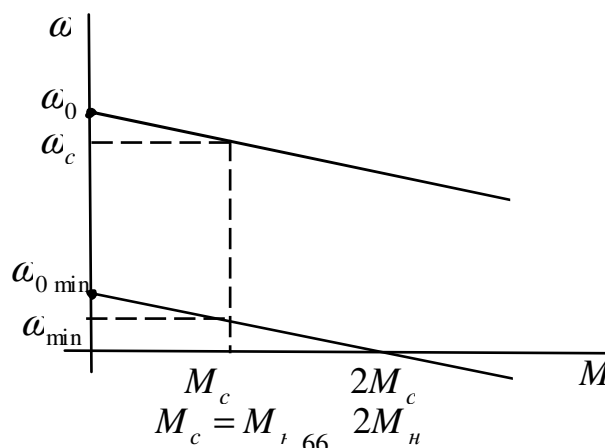
В ТЭП механические, электрические и магнитные переменные характеризующие работу двигателя: скорость, ускорение, угловые положения, мощность, момент, ток, магнитный поток и др., называются координатами или регулируемыми переменными.

Используя эту терминологию можно сказать, что регулируя скорость ИО электрическим способом осуществляется за счет изменения координат.

### Основные показатели регулирования скорости (основной координат)

1. Диапазон или пределы регулирования:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}.$$





2. Плавность регулирования характеризуется числом устойчивых скорости в заданном диапазоне:

$$K_{пл} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}},$$

$K_{пл}$  – коэффициент плавности;

$\omega_i$  – скорость на  $i$  характеристике;

$\omega_{i-1}$  – скорость на ближайшей характеристике к  $i$ .

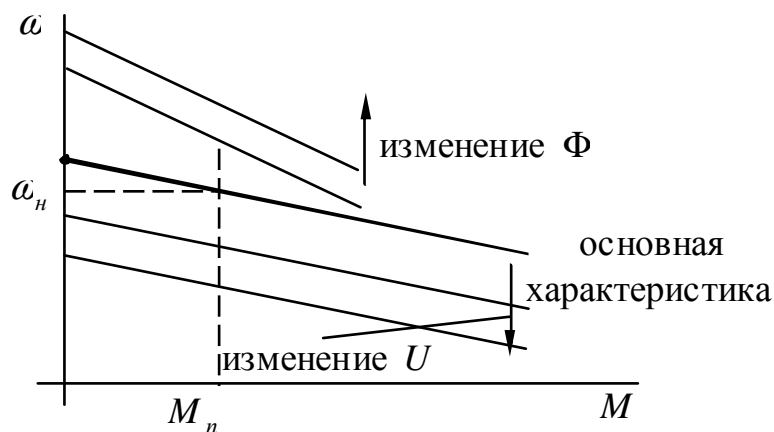
3. Экономичность регулирования, тем выше, чем меньше затраты на создание данной системы ЭП и чем меньше потерь на регулирование:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

$\Delta P$  – потери.

4. Стабильность работы на заданной характеристике, тем выше, чем жестче характеристика.

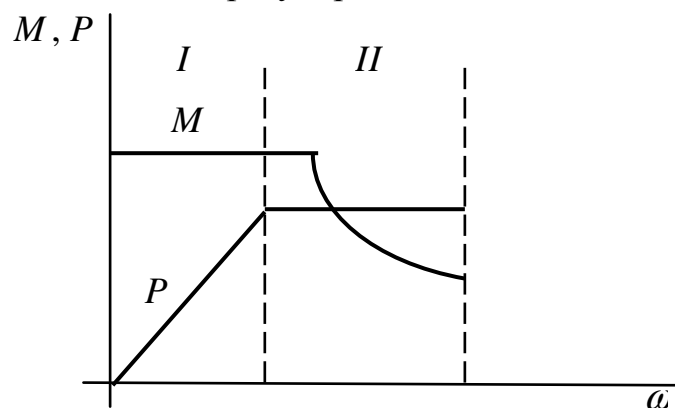
5. Направление регулирования, может осуществляться вверх или вниз от основной характеристике или от скорости на основной характеристике. Основная характеристика – это та характеристика на которой можно получить  $\omega_n$  при  $M_n$ .



6. Допустим нагрузка при регулировании, определенных допустимым нагревом двигателя, а он допустимыми потерями, а допустимыми потерями, а допустимые потери – током проходящим через двигатель.

Если через двигатель будет проходить  $I_n$ , то потери и следовательно нагрев будут допустимыми.

ДПТ может иметь две зоны регулирования:



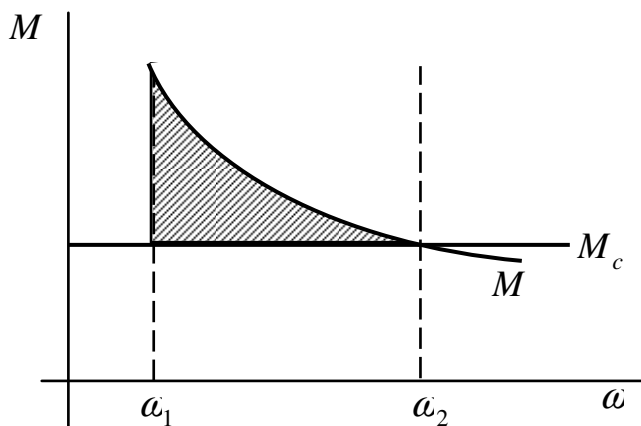
$$\text{I) } \Phi = \text{const}; \quad M = k\Phi I = \text{const}; \quad P = M\omega = \text{var}.$$

$$\text{II) } \Phi = \text{var}; \quad \Phi = (U - Ir_{\text{об}})_{k\omega} = \frac{A}{\omega};$$

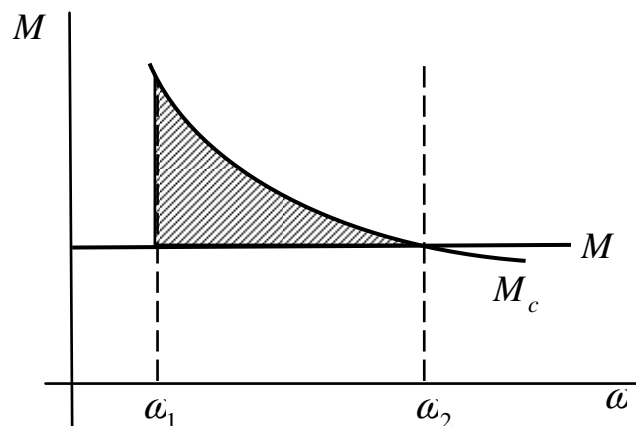
$$M = k\Phi I_n = k \frac{A}{\omega} I_n = \frac{A}{\omega};$$

$$P = M\omega = \text{const}.$$

Примеры:



Не верный способ регулирования,  
надо при  $M = \text{const}$



Надо  $M = \text{var}$ , а не  $M = \text{const}$

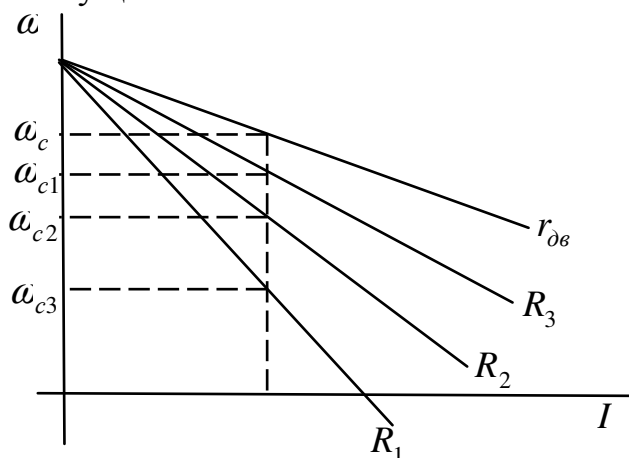
### Регулирование скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \text{ возможно регулирование скорости изменением } R, \Phi, U.$$

1. Регулирование изменением сопротивление якорной цепи ( $R$ ).

Особенности регулирования:

- 1) Регулирование осуществляется при постоянном моменте.
- 2) Регулирование осуществляется вниз от основной скорости.



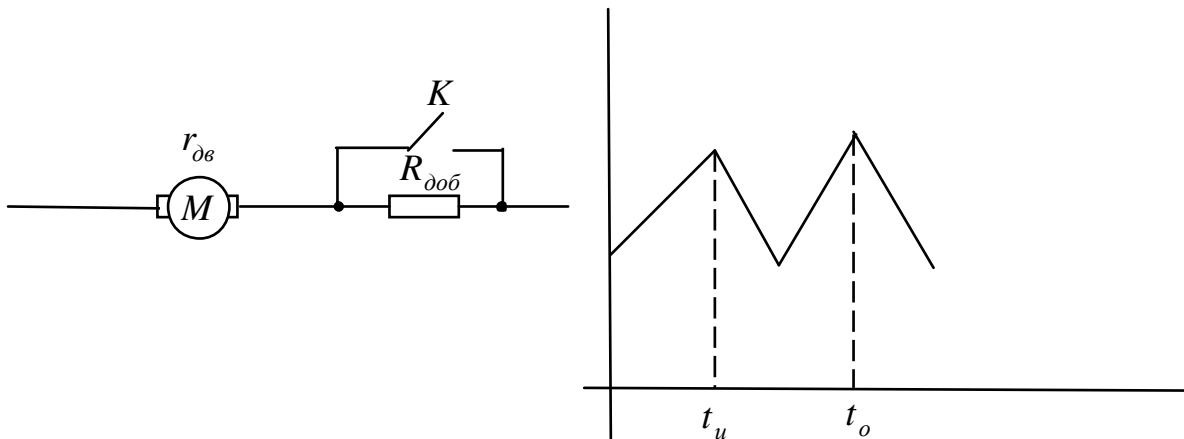
3) Стабильность работы на характеристиках по мере уменьшения скорости ухудшается.

4) Диапазон регулирования зависит от нагрузки.

5) Регулирование сопровождается значительными потерями:

$$\Delta P = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1 \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right). \quad (12.1)$$

б) Регулирование ступенчатое, то есть отсутствует плавность – этот недостаток можно устранить путем импульсного регулирования сопротивления:



$$\varepsilon = \frac{t_u}{t_u + t_o}, \quad (12.2)$$

$\varepsilon$  – скважность импульса.

$$r_{\text{дооб } \varepsilon} = r_{\text{дооб}} (1 - \varepsilon); \quad (12.3)$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{I}{k\Phi_H} [r_{\delta в} + r_{\text{дооб}} (1 - \varepsilon)]. \quad (12.4)$$

## 2. Регулирование скорости изменением магнитного потока

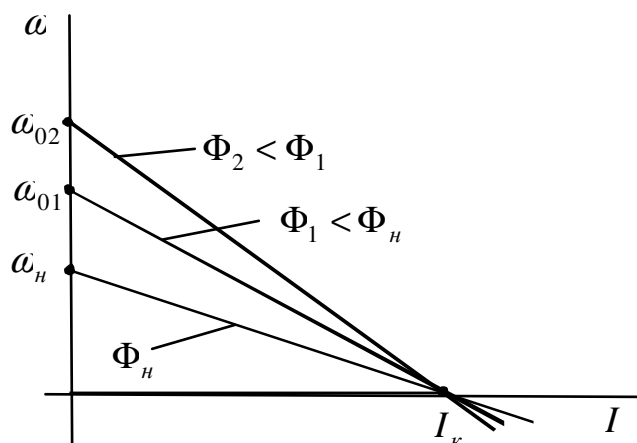
$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi} - \frac{I_H \cdot r_{\delta в}}{k\Phi}; \quad (12.5)$$

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi}; \quad (12.6)$$

$$0 = U_H - I_H \cdot r_{\delta в};$$

$$I_K = \frac{U_H}{r_{\delta в}}, \quad (12.7)$$

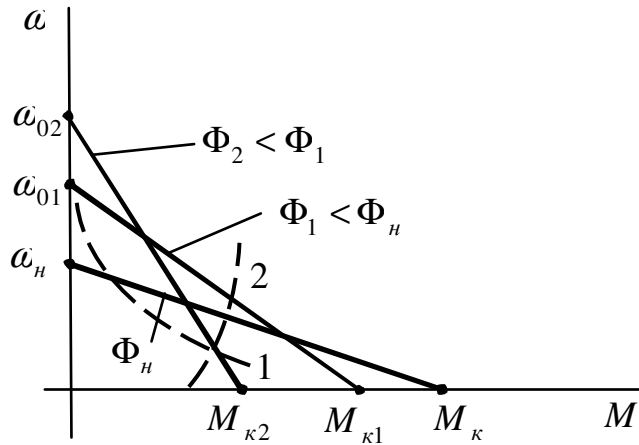
$I_K$  – ток короткого замыкания.



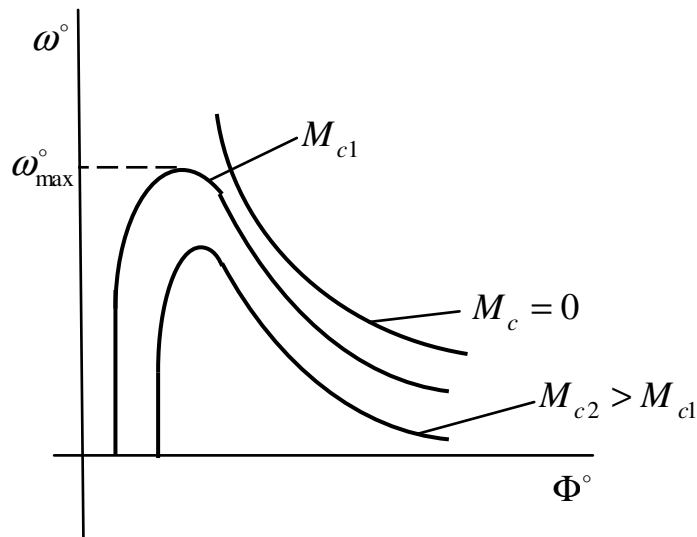
$M_K = k\Phi I_K$  – момент при коротком замыкании.

Момент развиваемый двигателем не должен превышать:

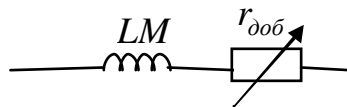
$$M = k\Phi I_H.$$



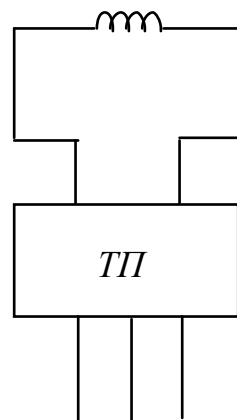
В конце концов получим такой момент, при котором регулирование скорости будет невозможно.



1)



2)

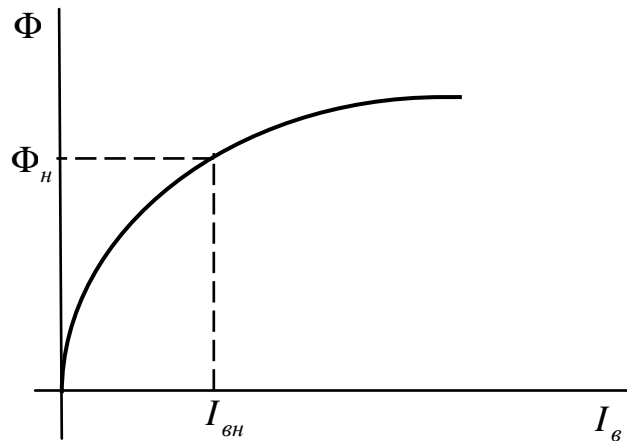


Особенности:

1) регулирование плавное и экономичное, плавное, так как можем сделать большое число ступеней (так как  $I_g$  мал);

2) регулирование осуществляется вверх от основной скорости.

При увеличении ток возбуждения будем перегревать обмотку возбуждения и получим малое увеличение потока.



3) регулирование осуществляется с постоянной мощностью;

4) увеличение скорости двигателя обычной конструкции допускается не более, чем на 30% .

Промышленностью выпускаются регулируемые двигателя, которые обеспечивают увеличение скорости в  $2 \div 3$  раза  $\omega_n$ , однако эти двигатели больших габаритов, так как двигатель должен развивать номинальный момент при ослабленном потоке.

Верхний предел изменения скорости ограничивается допустимой коммутацией, а нижний предел насыщением в машине.

1. Построение характеристик тики двигателя при изменении магнитного потока:

1) Построение естественной характеристики.

2) Определение  $k\Phi$  :

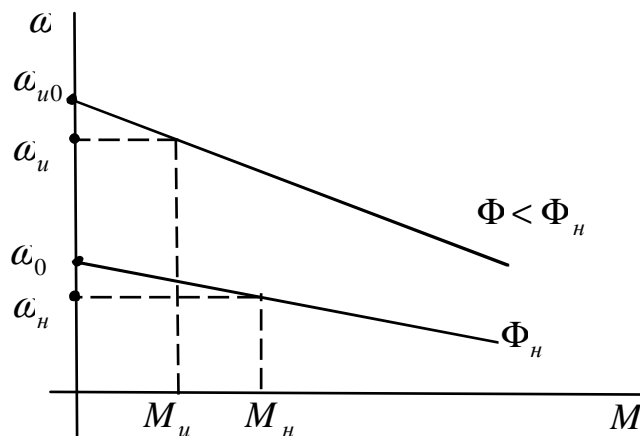
$$k\Phi = \frac{U_n - I_n r_{\text{дв}}}{\omega_u}$$

$\omega_u$  – заданная величина:

$$\omega_u = \alpha \omega_n \quad (\alpha > 1).$$

3) Строится  $\omega = f(I)$ .

$$M = k\Phi I_n.$$



2. Расчет сопротивления добавочного резистора в цепи обмотки возбуждения:

$$1) \omega_e = \frac{U_H - I_H r_{\partial\epsilon}}{k\Phi_H}$$

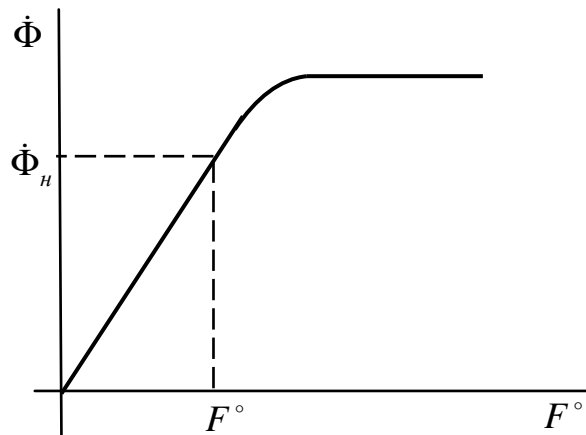
$$\omega_u = \frac{U_H - I_H r_{\partial\epsilon}}{k\Phi}$$

$$\frac{\omega_e}{\omega_u} = \frac{\Phi}{\Phi_H};$$

$$F^\circ = \frac{F}{F_H} = \frac{I_\epsilon W}{I_{\epsilon H} W} = \frac{I_\epsilon}{I_{\epsilon H}},$$

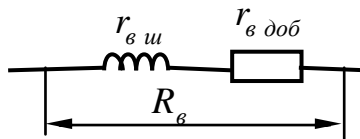
$F$  – МДС.

$$I_\epsilon = I_{\epsilon H} \cdot F.$$



2) Определим сопротивление цепи возбуждения:

$$R_\epsilon = \frac{U}{I_\epsilon}.$$



3) определим ступень  $r_{\epsilon доб}$ :

$$r_{\epsilon доб} = R_\epsilon - r_{\epsilon ш}.$$

3. Регулирование скорости изменением напряжения на якоре двигателя:

$$\omega_H = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{I_H r_{\partial\epsilon}}{k\Phi_H};$$

$$\omega_u = \frac{U}{k\Phi_H} - \frac{I_H r_{\partial\epsilon}}{k\Phi_H};$$

$$\Delta\omega = \frac{I_H r_{\partial\epsilon}}{k\Phi_H} = const;$$

$$\frac{\omega_H}{\omega_u} = \frac{U_H - I_H r_{\partial\epsilon}}{U - I_H r_{\partial\epsilon}}.$$

Особенности:

1) Регулирование осуществляется вниз от основной скорости.

2) Регулирование осуществляется при постоянном моменте.

3) Регулирование плавное и экономичное, однако КПД двигателя изменяется:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{M\omega}{M\omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \Delta\omega}{\omega_0} = \left(1 - \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right);$$

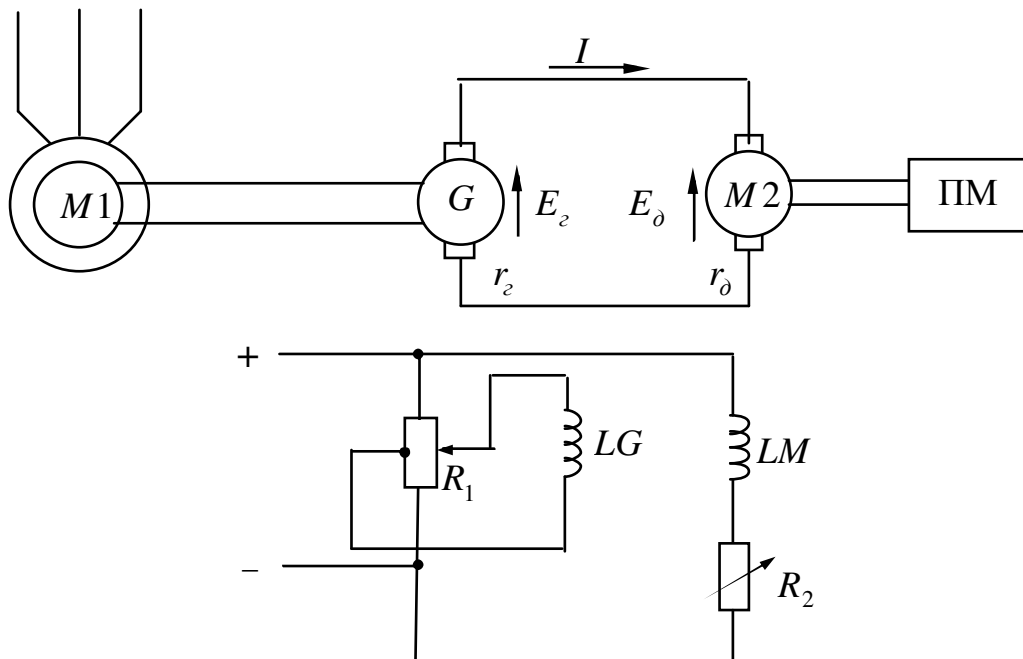
$$\Delta\omega = \text{const}; \quad \omega_0 = \text{var.}$$

КПД с уменьшением скорости ухудшается.

4) Для регулирования напряжения требуется регулирующий преобразователь (ГД, ПП), у которого имеют место потери.

5) Стабильность работы не меняется, так как жесткость характеристик постоянна.

## 16 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ ГД



ПМ – производственный механизм.

$$E_2 - E_d = I(r_2 + r_d) = Ir_\Sigma;$$

$$I = \frac{E_2 - E_d}{r_\Sigma}; \quad (12.8)$$

$$E_2 = k\Phi_2\omega_2;$$

$$E_d = k\Phi_d\omega_d.$$

$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi} - \frac{Ir_\Sigma}{k\Phi}; \quad (12.9)$$

$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi} - \frac{Mr_\Sigma}{(k\Phi)^2}; \quad (12.10)$$

### Пуск двигателя в системе ГД

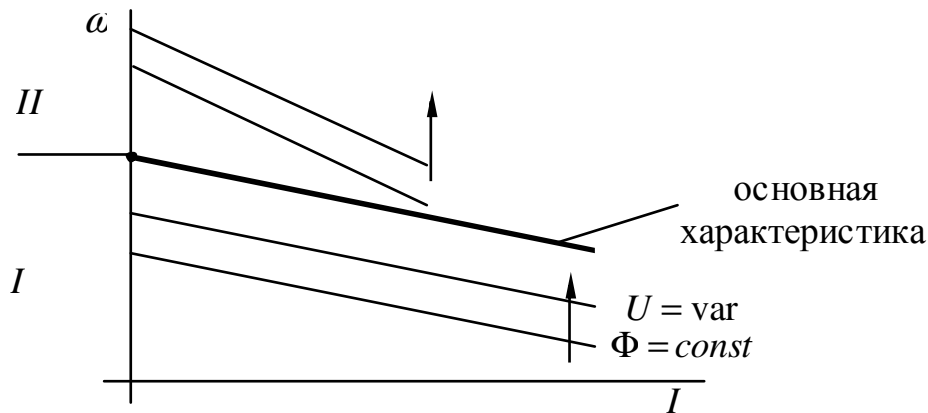
Сопротивление  $R_1$  – устанавливает минимум напряжения,  $LM$  – увеличивает ток возбуждения до максимального. Это делается затем, что при наибольшем значении момента двигатель при пуске мог осуществлять разгон.

Плавное увеличение напряжения на  $LG$  увеличивает поток генераторного напряжения на двигатель, а следовательно и двигатель.

Регулирование скорости:

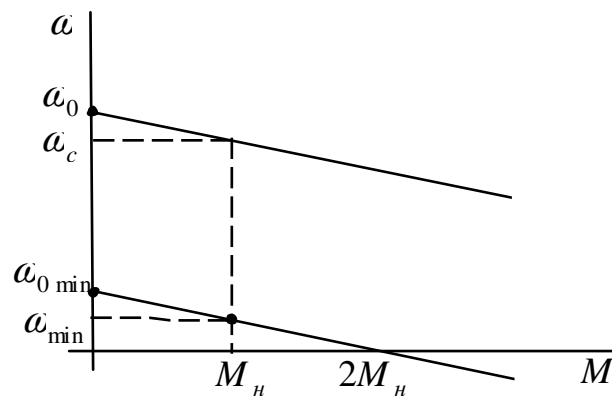
I:  $U = \text{var}$  ;

II:  $\Phi = \text{var}$  .



Торможение двигателя осуществляется с отдачей энергии в сеть. Торможение имеет место в том случае, если уменьшить ЭДС генератора или увеличить ЭДС двигателя.

Реверс двигателя осуществляется за счет изменения размерности напряжения генератора.



$$0 = \omega_{0 \min} - \frac{2M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2}; \quad (13.1)$$

$$\omega_{0 \min} = \frac{2M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2};$$

$$\omega_{\min} = \omega_{0 \min} - \frac{M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2}. \quad (13.2)$$

$$\omega_{\min} = \frac{M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2}. \quad (13.3)$$

Подставив 13.3 в 13.2, получим:

$$\omega_{\min} = \frac{2M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} - \frac{M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} = \frac{M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} \quad (13.4)$$

$$\omega_{\max} = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} = \frac{U_H k\Phi_H - M_H \cdot r_{\Sigma}}{(k\Phi_H)^2} \quad (13.5)$$



Диапазон:

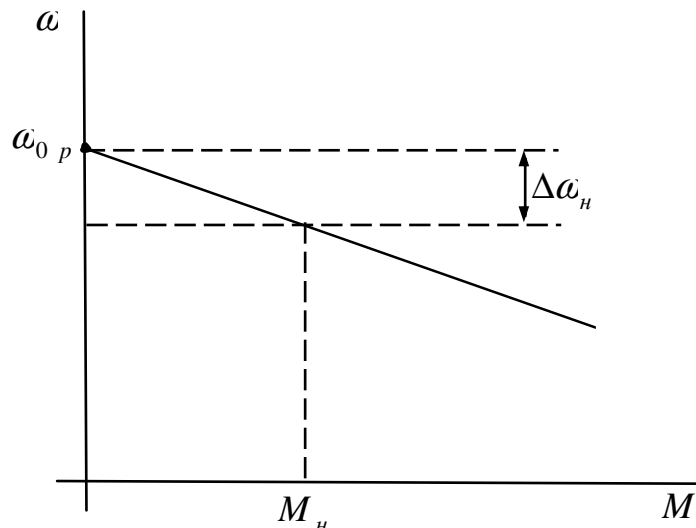
$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{(U_H k\Phi_H - M_H \cdot r_\Sigma) \cdot (k\Phi_H)^2}{(k\Phi_H)^2 \cdot M_H \cdot r_\Sigma} = \frac{U_H k\Phi_H}{M_H \cdot r_\Sigma} - 1 = \frac{U_H k\Phi_H}{k\Phi_H \cdot I_H \cdot r_\Sigma} - 1 =$$

$$= \frac{R_H}{r_\Sigma} - 1 = \frac{1}{\frac{r_\Sigma}{R_H}} - 1 = \frac{1}{i_\Sigma} - 1 = \frac{1}{2i_r} - 1; \quad (13.6)$$

$$i_r = 0,03 \div 0,12; \quad D = 17 \div 5.$$

### Статизм

Статизмом называют отношение изменения скорости при изменении нагрузки от нуля до номинального значения к скорости идеального холостого хода на регулировочной характеристике ( $\omega_0$ ).



$$S = \frac{\Delta\omega_H}{\omega_{0p}}; \quad (13.7)$$

$$\Delta\omega_H = \frac{M_H r_\Sigma}{(k\Phi_H)^2} = \frac{M_H}{|\beta|}, \quad (13.8)$$

$\beta$  – жесткость.

Подставим 13.8 в 13.7, получим;

$$S = \frac{M_H}{\omega_{0p} |\beta|}; \quad (13.9)$$

$$\omega_{0p \min} = \frac{M_H}{S_3 |\beta_3|}; \quad (13.10)$$

С ростом статизма уменьшается качество регулирования:

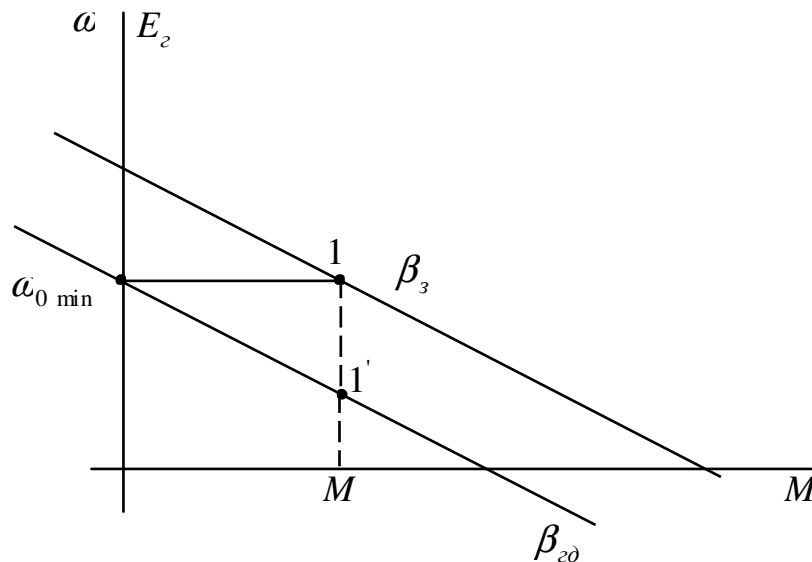
$$D = \frac{\omega_{oc}}{\omega_{0p \min}} = \frac{U_H S_3 \beta_3}{k\Phi_H \cdot M_H} = \frac{U_H S_3 \beta_3}{k\Phi_H \cdot k\Phi_H \cdot I_H} = \frac{R_H S_3 \beta_3}{(k\Phi_H)^2} = \frac{S_3 \beta_3}{(k\Phi_H)^2} = \frac{S_3 (\beta_3)}{(\beta_H)} = S_3 (\dot{\beta}); \quad (13.11)$$

$$\dot{\beta} = 10 \div 12;$$

$S = 0,4$       $D = 4$ ;  
 $S = 0,1$       $D = 1$  – регулированием получить нельзя.

### Система ГД с обратной связью по току

$$D_3 = S_3(\dot{\beta}); \quad (\dot{\beta}) = \frac{D_3}{S_3};$$

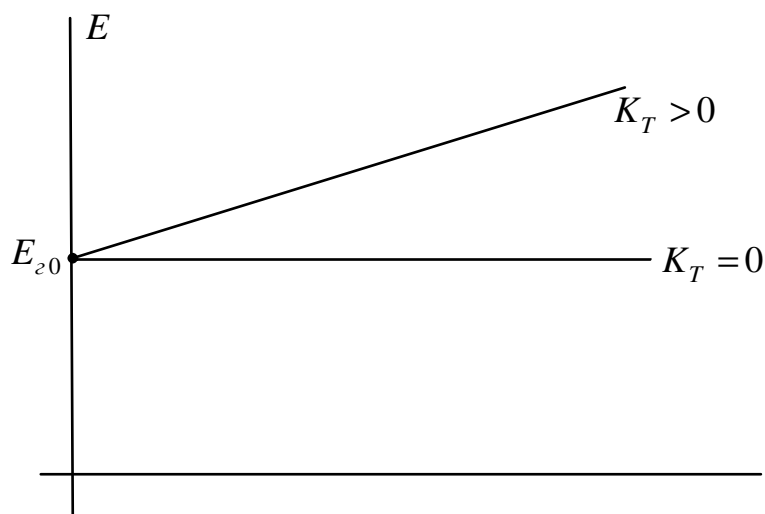


$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi_H} - \frac{M}{|\beta_{2\partial}|}; \quad (13.12)$$

$$\omega = \frac{E_{20}}{k\Phi_H} - \frac{M}{|\beta_3|}; \quad (13.13)$$

$$\frac{E_2}{k\Phi_H} - \frac{M}{|\beta_{2\partial}|} = \frac{E_{20}}{k\Phi_H} - \frac{M}{|\beta_3|}; \quad (13.14)$$

$$E_2 = E_{20} + k\Phi_H \cdot M \left( \frac{1}{\beta_{2\partial}} - \frac{1}{\beta_3} \right) = E_{20} + (k\Phi_H)^2 \cdot I_{\text{я}} \left( \frac{1}{\beta_{2\partial}} - \frac{1}{\beta_3} \right) = E_{20} + I \cdot K_T. \quad (13.15)$$



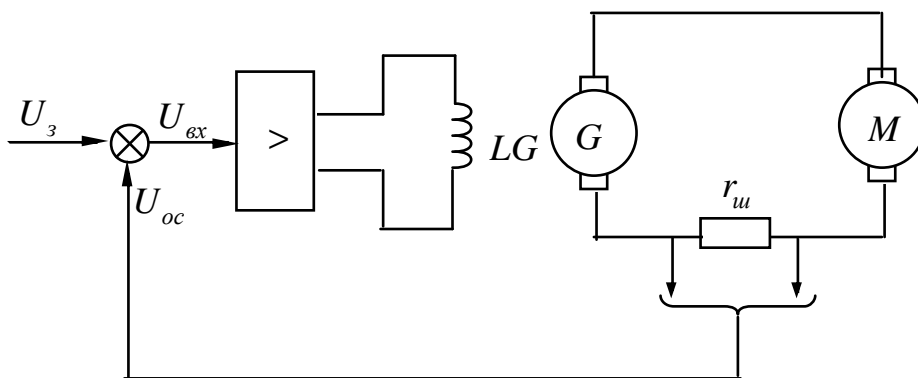
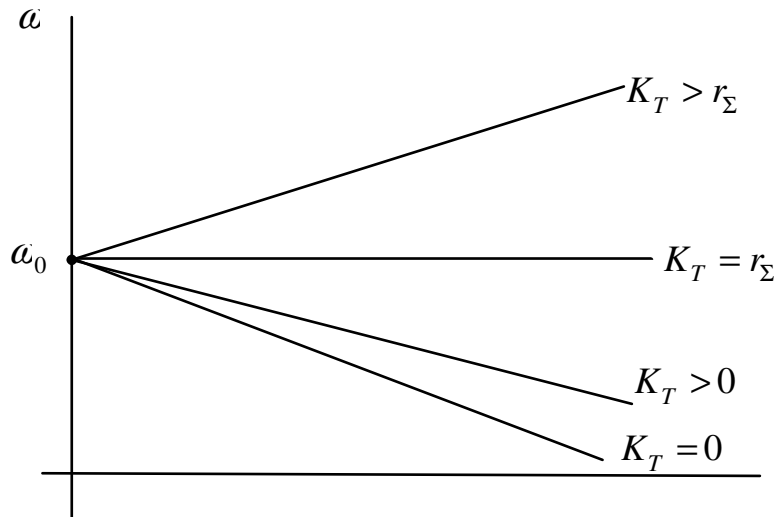
Из уравнения 13.15 следует, что

$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi_H} - \frac{Ir_\Sigma}{k\Phi_H} = \frac{E_{20}}{k\Phi_H} + \frac{IK_T}{k\Phi_H} - \frac{Ir_\Sigma}{k\Phi_H} = \frac{E_{20}}{k\Phi_H} - \frac{I}{k\Phi_H} (r_\Sigma - K_T); \quad (13.16)$$

$$K_T > 0; \quad \beta = (-);$$

$$K_T = r_\Sigma; \quad \beta = \infty;$$

$$K_T > r_\Sigma; \quad \beta = (+).$$



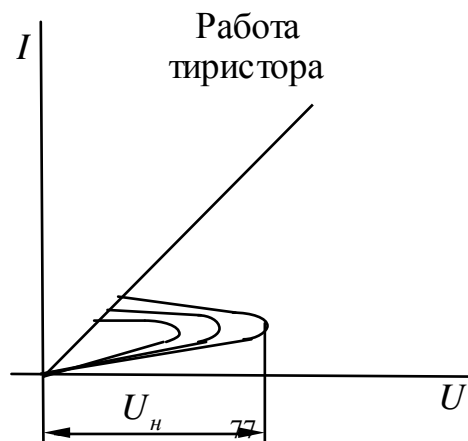
$$U_{oc} = I \cdot r_u;$$

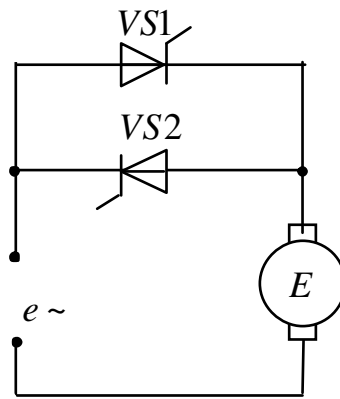
$$U_{6x} = U_3 + U_{oc};$$

$$E_2 = E'_{20} - K_c \omega.$$

## 17 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ УВП-Д

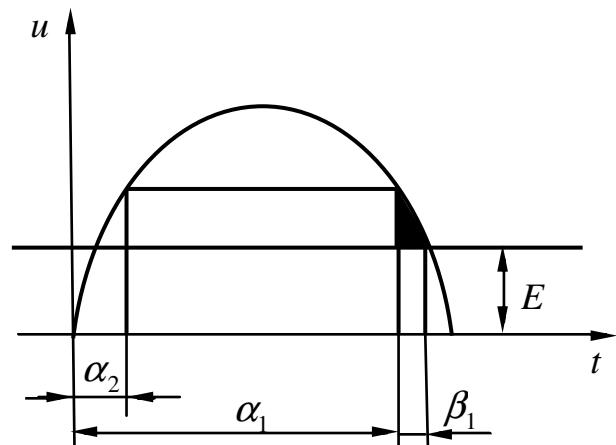
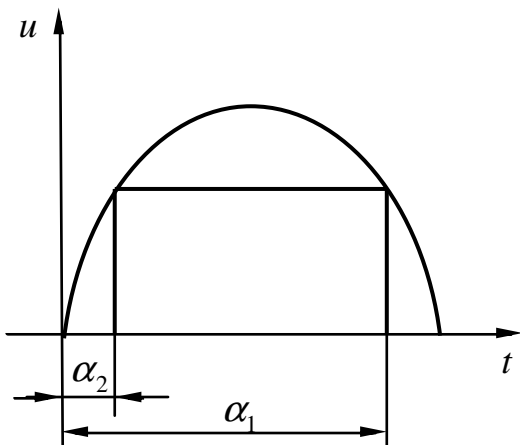
Работа протейшего реверсивного ТП





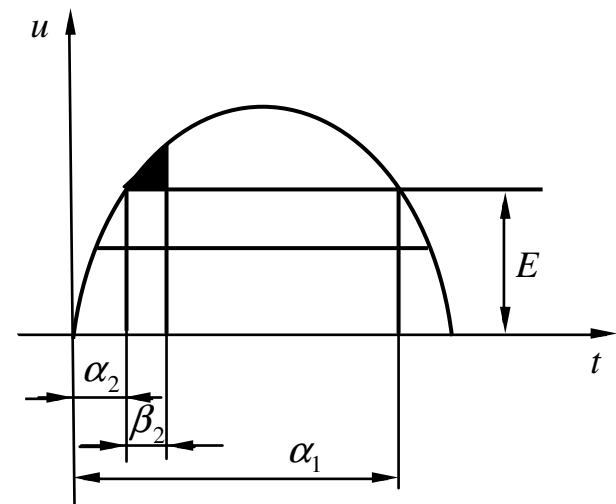
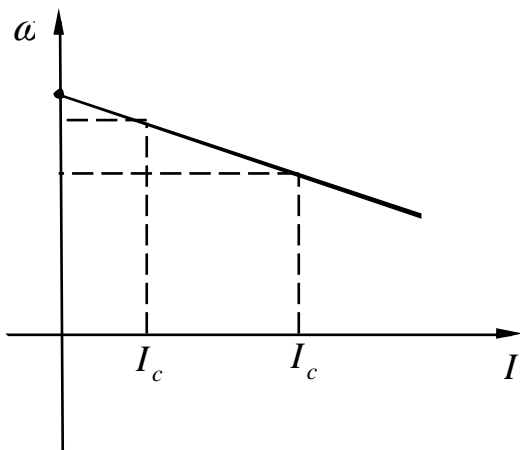
$$I = \frac{e_{\sim} - E}{r_{\Sigma}};$$

$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$  – углы управления.



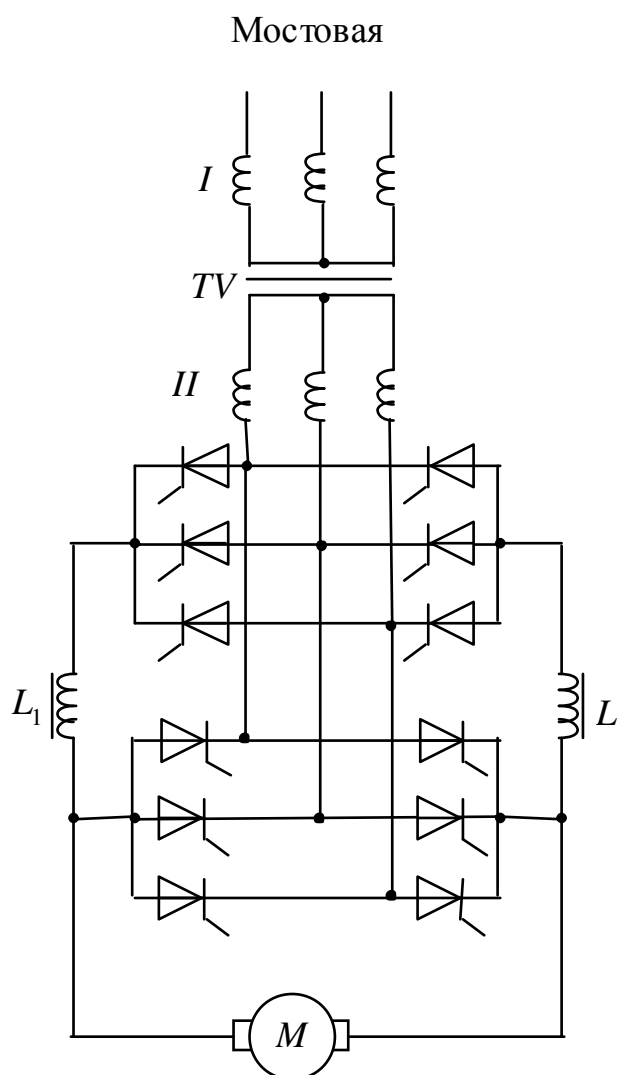
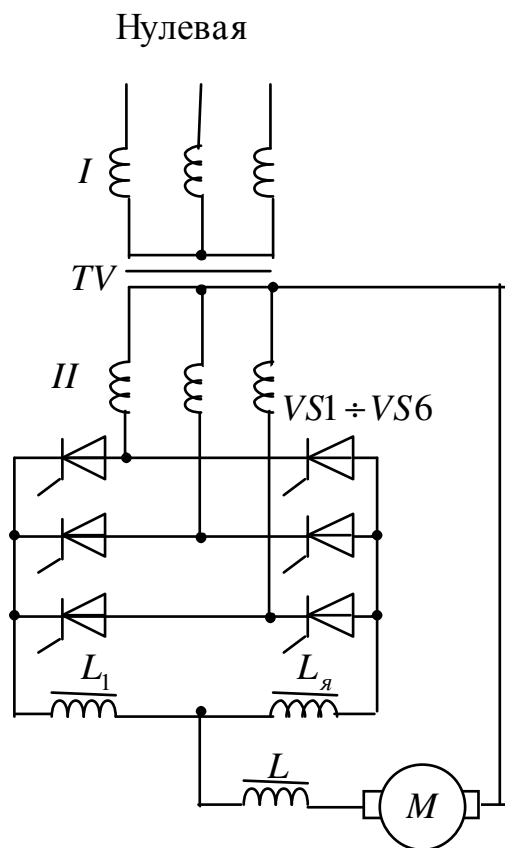
$\beta_1$  – угол открытого состояния тиристора.

$$E = k\Phi\omega;$$



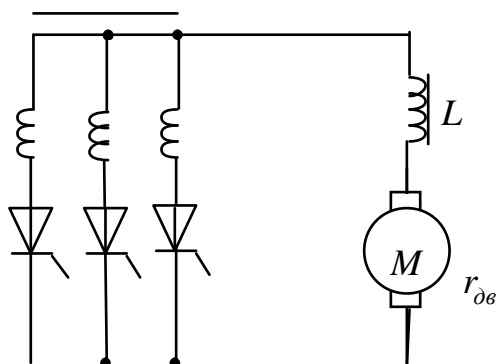
## 18 МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ ТП-Д

Наибольшее распространение получили нулевая и мостовая схема.



Основные соотношения:

1. Для нулевой схемы:



$$R_T = R_2 + R_1 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^2 ;$$

$$x_T = x_2 + x_1 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^2 ;$$

Падение напряжения на вентиле:

$$\Delta U_g = (0,5 \div 1) B ;$$

$\Delta U_{R_l} = I_d \cdot R_T$  – активное сопротивление обмотки трансформатора.

$$\Delta U_{x_I} = \frac{m}{2\pi} \cdot x_T \cdot I_d = \frac{3}{2\pi} \cdot x_T \cdot I_d = 0,478 \cdot x_T \cdot I_d;$$

$$E_m = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} \cdot E_{2\phi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot E_{2\phi} \cdot \sin 60^\circ = 1,17 E_{2\phi}, \quad (14.1)$$

$m$  – количество фаз.

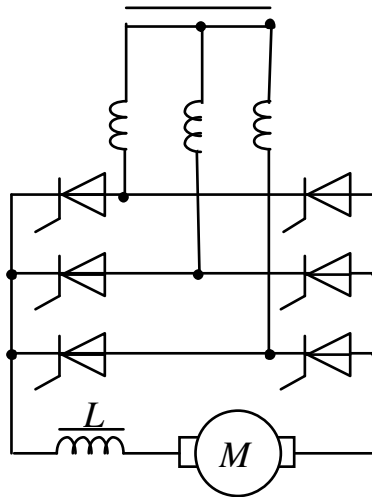
Управление происходит по зависимости:

$$U_d = E_m \cos \alpha - \Delta U_\epsilon - I_d (R_T + 0,478 x_T) = E_m \cos \alpha - \Delta U_\epsilon - R_{\epsilon np}, \quad (14.2)$$

$R_{\epsilon np}$  – эквивалентное сопротивление преобразователя:

$$R_{\epsilon np} = R_T + 0,478 x_T.$$

2. Для мостовой схемы:



Падение напряжения на вентилях:

$$\Delta U_{\epsilon_{II}} = 2\Delta U_{\epsilon_I};$$

$$\Delta U_{R_{II}} = 2\Delta U_{R_I};$$

$$\Delta U_{x_{II}} = 2\Delta U_{x_I} = 0,955 x_T I_d;$$

$$E_{dm_{II}} = \frac{6}{\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \sin \frac{\pi}{6} = 1,35 E_{2\phi} = 1,35 \sqrt{3} E_{2\phi} = 2,34 E_{2\phi}; \quad (14.3)$$

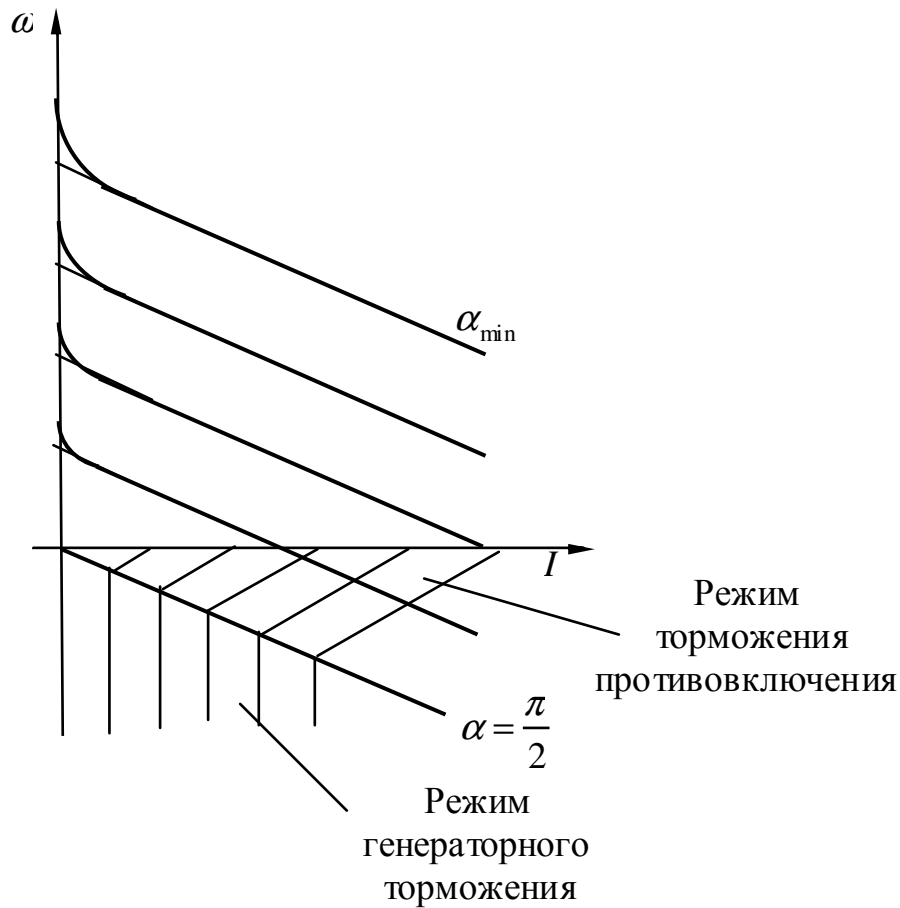
$$U_{d\alpha} = E_{dm} \cos \alpha - \Delta U_{\epsilon_{II}} - I_d (2R_T + 0,955 x_T); \quad (14.4)$$

Уравнения электромеханической и механической характеристики при питании от ТП:

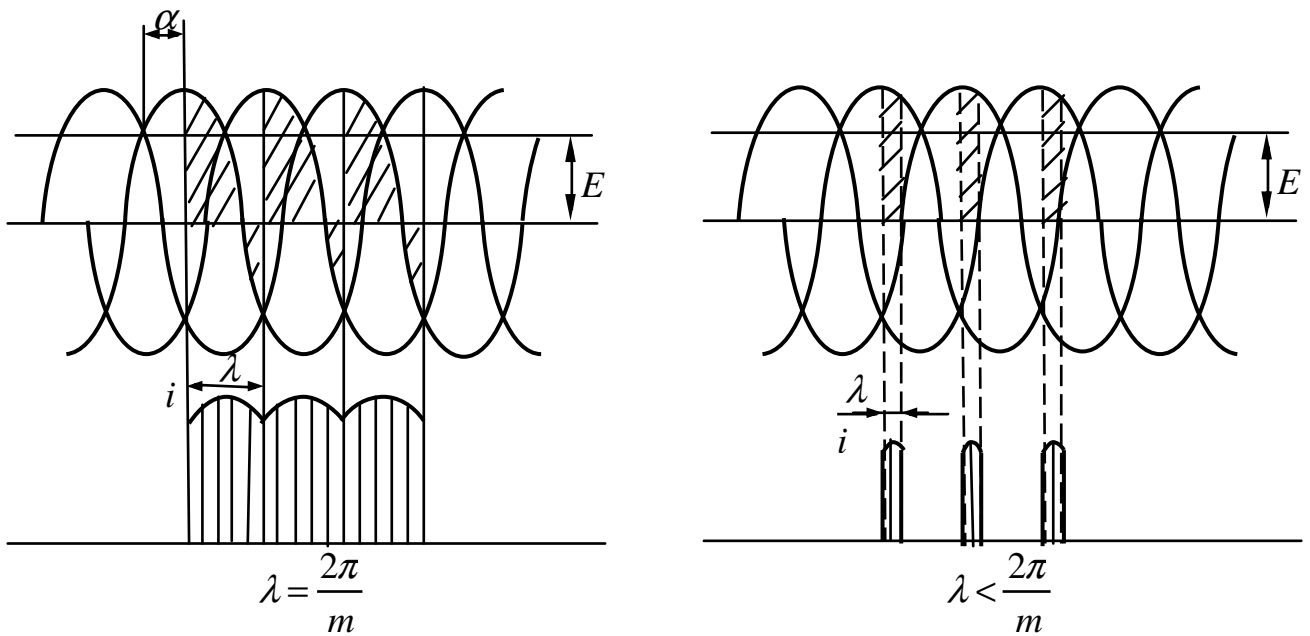
$$\omega = \frac{E_m \cos \alpha - \Delta U_\epsilon}{k\Phi_n} - \frac{I_n (R_{\epsilon np} + R_{\delta\epsilon} + R_{cd})}{k\Phi_n}; \quad (14.5)$$

$R_{cd}$  – сопротивление сглаживающего дросселя.

$$\omega = \frac{E_m \cos \alpha - \Delta U_\epsilon}{k\Phi_n} - \frac{M_n (R_{\epsilon np} + R_{\delta\epsilon} + R_{cd})}{(k\Phi_n)^2}; \quad (14.5)$$



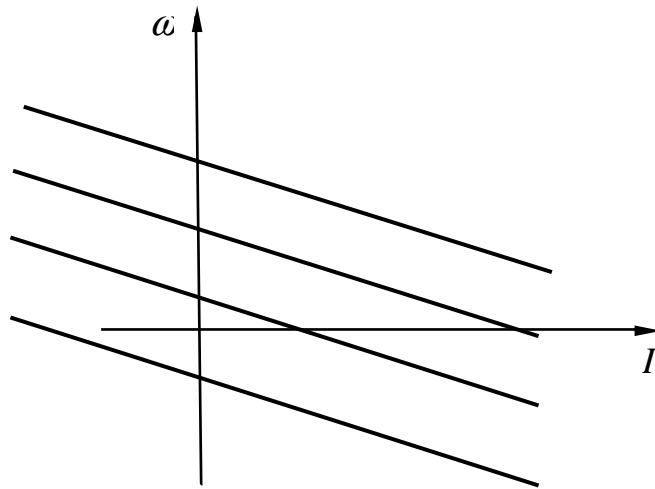
### Режим прерывистых токов



### Согласование углов управления

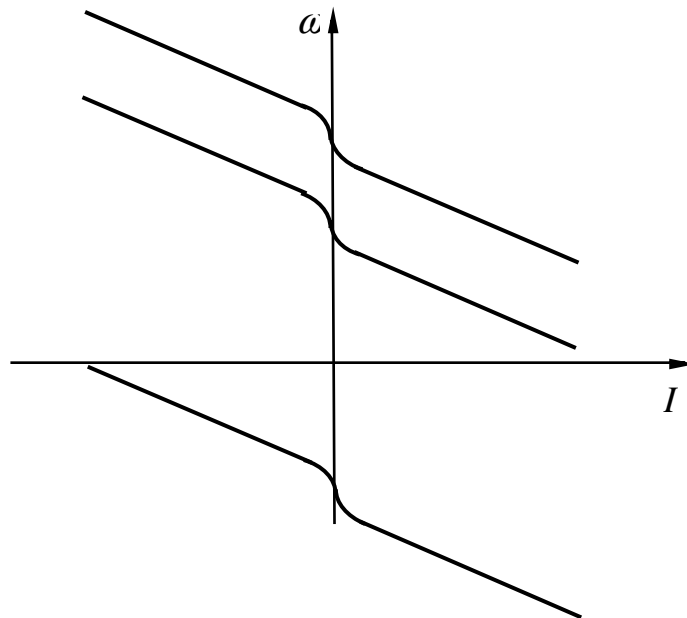
1) При совместном управлении и совместном согласовании углов управления  $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ .

Недостаток: необходимость использования уравнительных реакторов (дресселей).



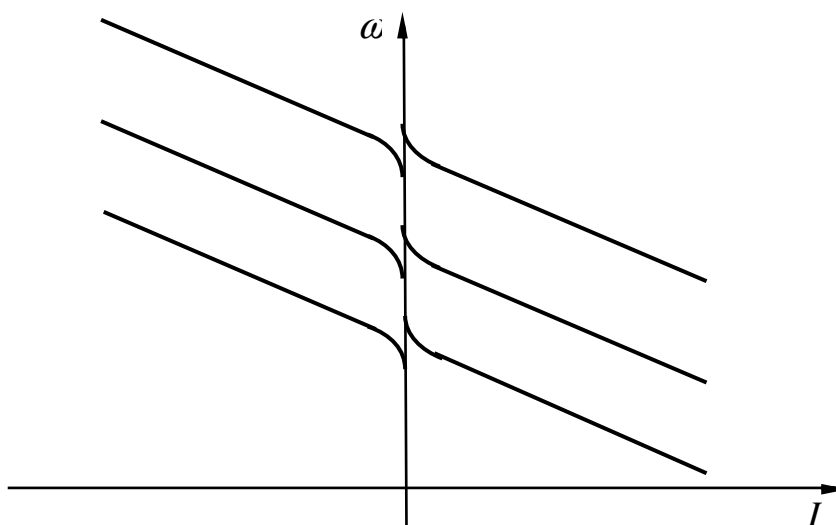
2) При совместном управлении и нелинейном согласовании углов управления:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi + \xi.$$



Уравнительный реактор не требуется.

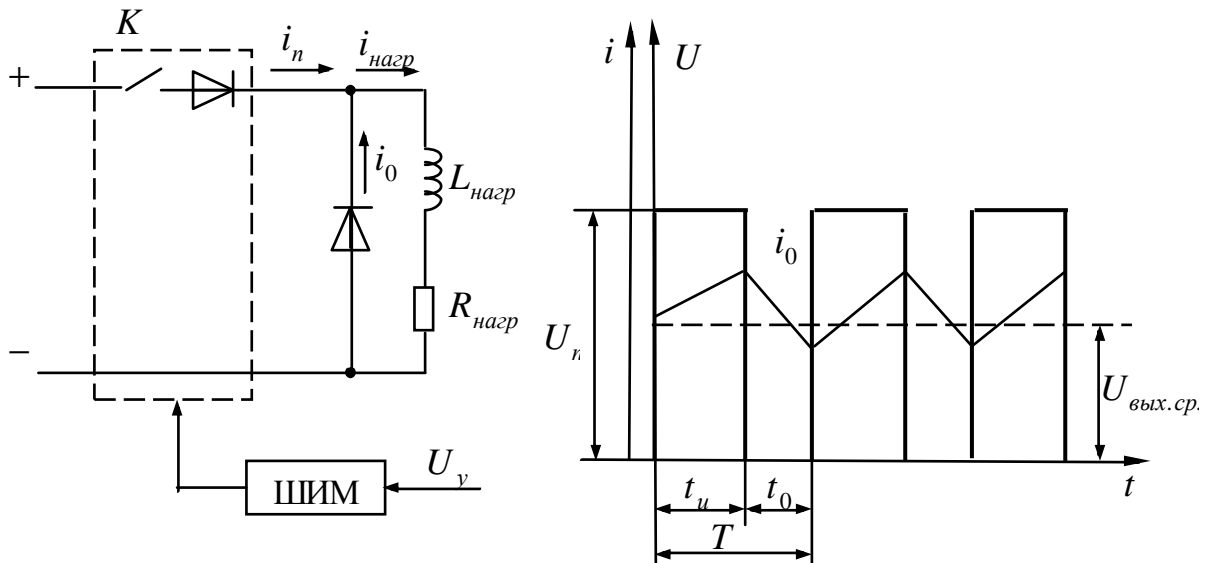
3) Раздельное управление:





## Регулирование скорости с помощью импульсного регулятора напряжения (импульсное регулирование)

Эквивалентная схема и работа однополярного импульсного преобразователя (ОИП)



$$T_{\vartheta} = \frac{L}{R}.$$

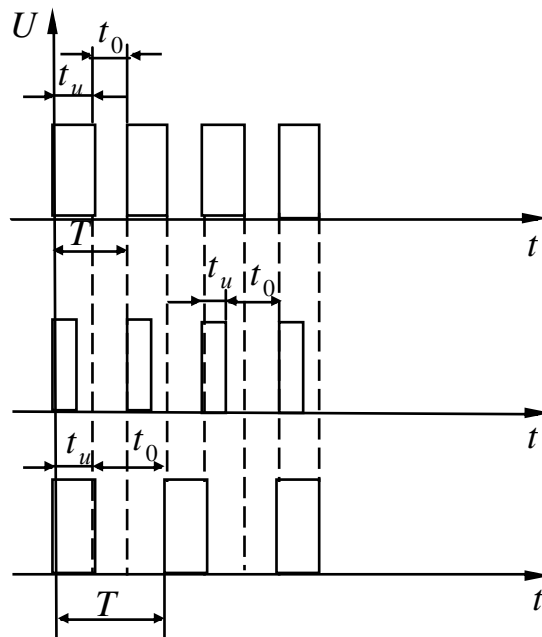
Непрерывный ток, когда  $T \gg T_{\vartheta}$ .

$$\varepsilon = \frac{t_u}{t_u + t_0}.$$

Способы изменения скважности  $\varepsilon$ :

- 1) широтно-импульсный (ШИ):  $T = const, f = const$ ;
- 2) частотно импульсный (ЧИ):  $T = var, f = var$ ;
- 3) комбинированный (ШЧ).

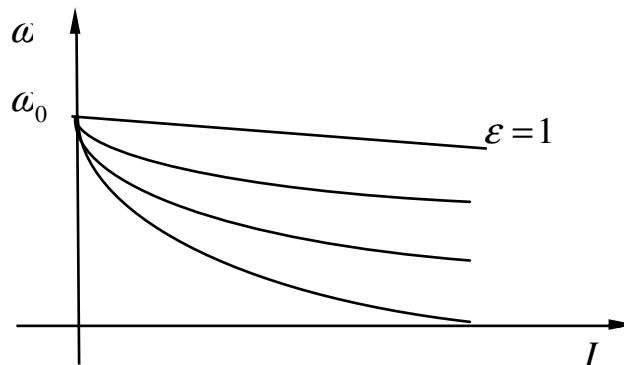
Наибольшее распространение получил широтно-импульсный – это обусловлено, тем, что частота импульсов остается неизменной в результате чего, улучшена наладка схем и более устойчива работа при регулировании параметров.



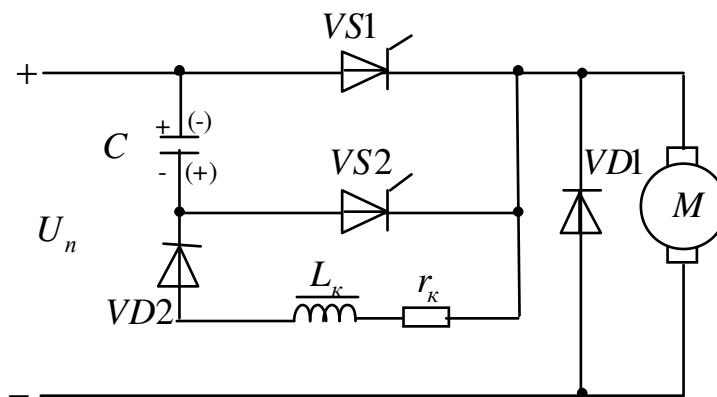
## Характеристики двигателя при данном способе управления от ОИП

$$\omega = \frac{U_n^2}{k\Phi_n} - \frac{Ir_{\partial\epsilon}}{k\Phi_n}; \quad (14.8)$$

$$U_n \cdot \epsilon = U_{\text{вых}} \varphi.$$



### Коммутирующие устройства

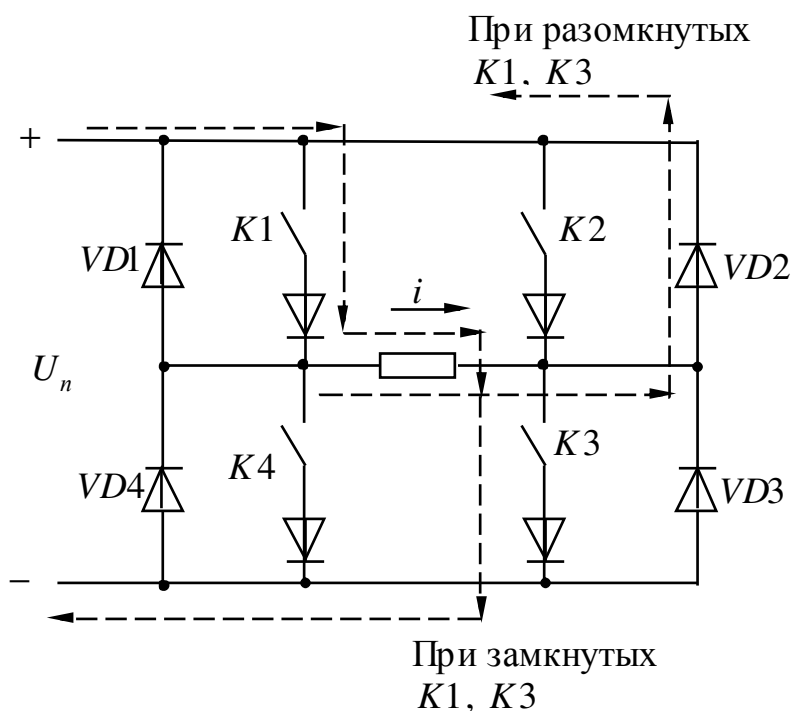


В начале подается импульс на тиристор  $VS2$ , который открывается и емкость  $C$  заряжается по цепи  $+C - VS2 - D -$ .

При подаче управляющего импульса на  $VS1$  – открывается и на двигатель поступает импульс напряжения, а  $C$ , перезаряжается до противоположной полярности по цепочке  $+C - VS - r_k L_k - VD2$ .

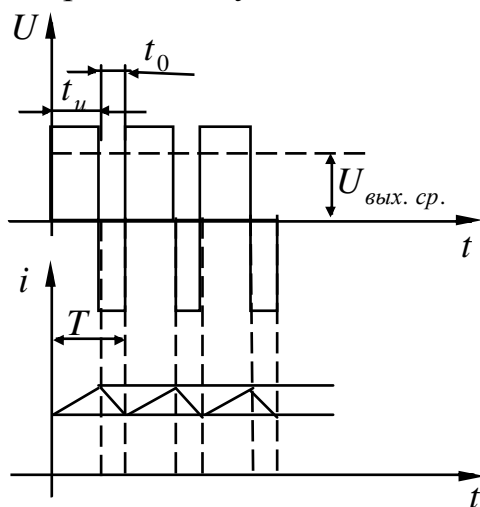
Для закрытия  $VS1$  подается управляющий импульс  $VS2$ , конденсатор разряжается на тиристор  $VS1$  и он закрывается.

## 19 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА И РАБОТА ДВУХПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ДИП)



$$U_{\text{вых. ср.}} = U_n (2\varepsilon - 1). \quad (14.9)$$

Осуществляется попарная коммутация ключей:



$$U_{\text{вых. ср.}} = U_n (2\varepsilon - 1), \quad (15.1)$$

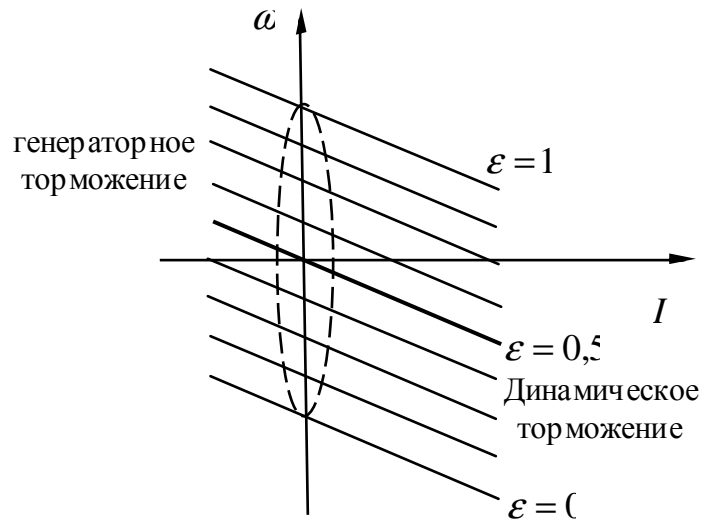
$\varepsilon$  – скважность.

При  $\varepsilon = 1$   $U_{\text{вых. ср.}} = U_n$ ,

$\varepsilon = 0,5$   $U_{\text{вых. ср.}} = 0$ ,

$\varepsilon = 0$   $U_{\text{вых. ср.}} = -U_n$ .

$$\omega = \frac{U_n (2\varepsilon - 1)}{k\Phi_n} - \frac{r_{\text{дв}} I}{k\Phi_n}. \quad (15.2)$$

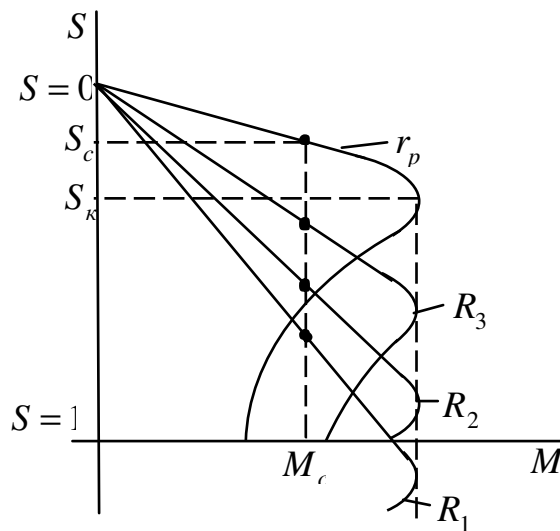


## 20 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АД

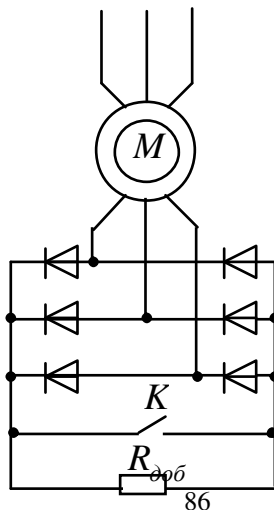
$$\omega = \frac{2\pi f}{p} (S - 1); \quad (15.3)$$

Скорость АД можно регулировать изменением  $S$ ,  $R$ ,  $p$ ,  $f$ .

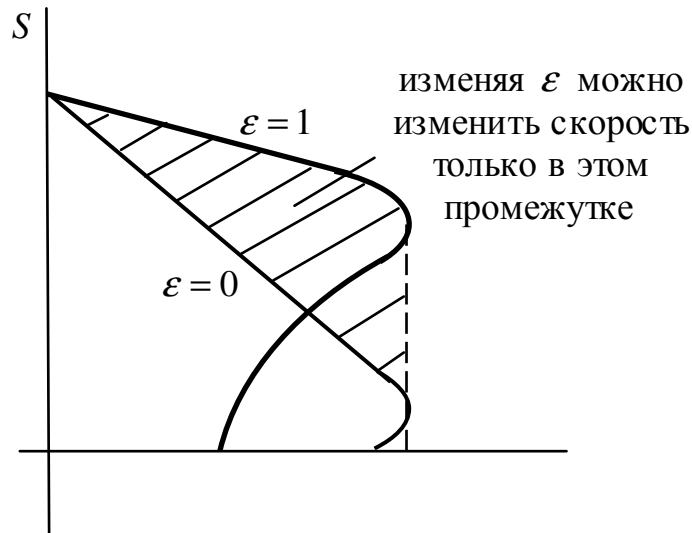
1) Регулирование изменением сопротивления в роторной цепи:



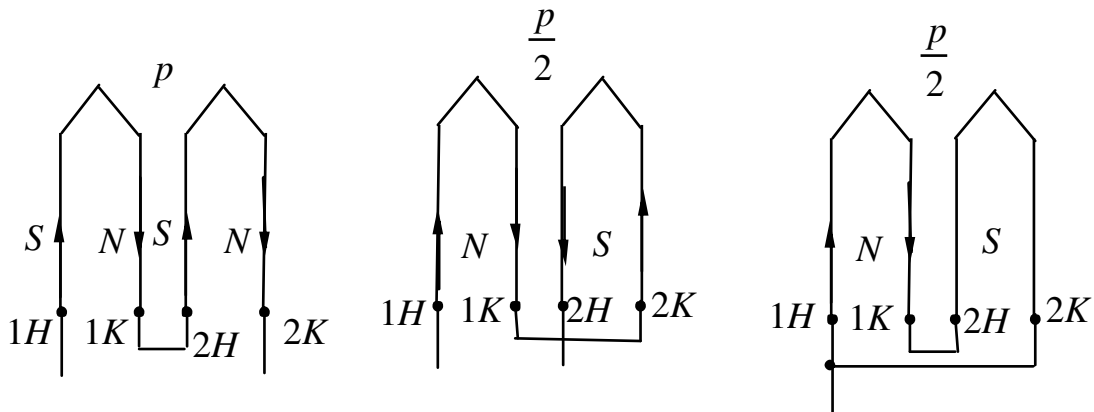
Особенности регулирования: (см. ДПГ независимого возбуждения).  
Для обеспечения более высокой плавности:



$$R_{\mathcal{E}} = R_{\text{доо}}(1 - \varepsilon). \quad (15.4)$$



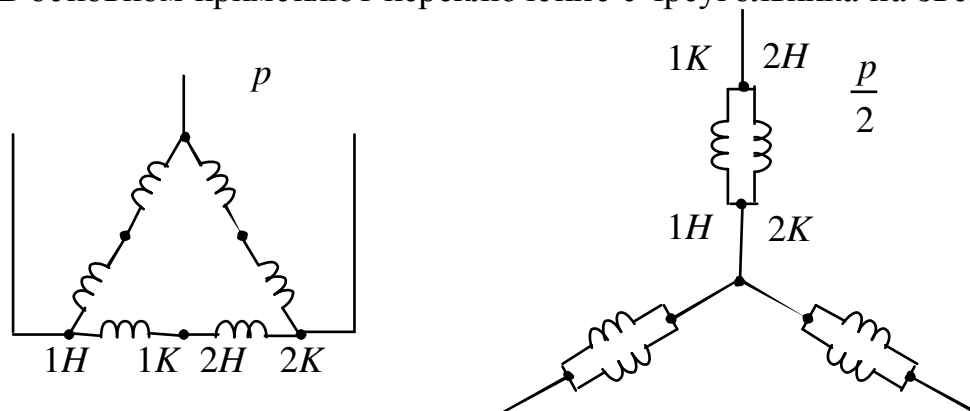
2) Регулирование изменением числа пар полюсов ( $p$ ):



Изменением направления тока в одной из обмоток можно получить изменение пар полюсов.

Включение этих обмоток обеспечит регулирование скорости с постоянным моментом или мощностью.

В основном применяют переключение с треугольника на звезду:



$$\omega_{0\Delta} = \frac{2\pi f}{p};$$

$\omega_{0YY} = 2\omega_{0\Delta}$  – двойной звезды.

Допустимая мощность:

$$P_{\text{дон } \Delta} = 3U_1 I_H \cos \varphi_{\Delta}; \quad (15.5)$$

$$P_{\text{дон } YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot 2I_H \cos \varphi_{YY} \approx 3,64 U_1 I_H \cos \varphi_{YY}; \quad (15.6)$$

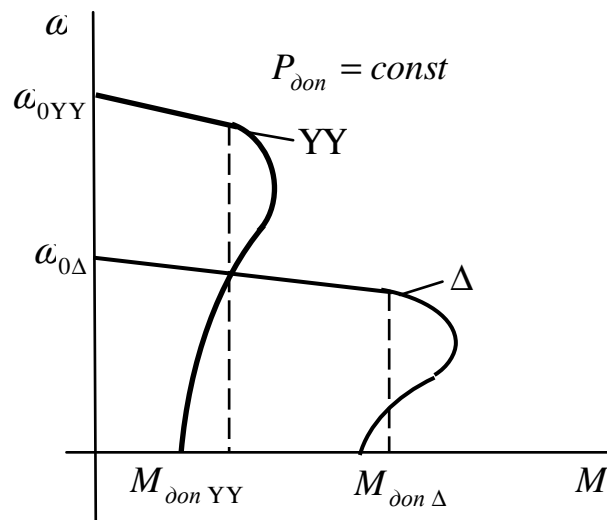
$$P_{\text{дон } \Delta} \approx P_{\text{дон } YY};$$

$$\cos \varphi \approx \cos \varphi_{YY}.$$

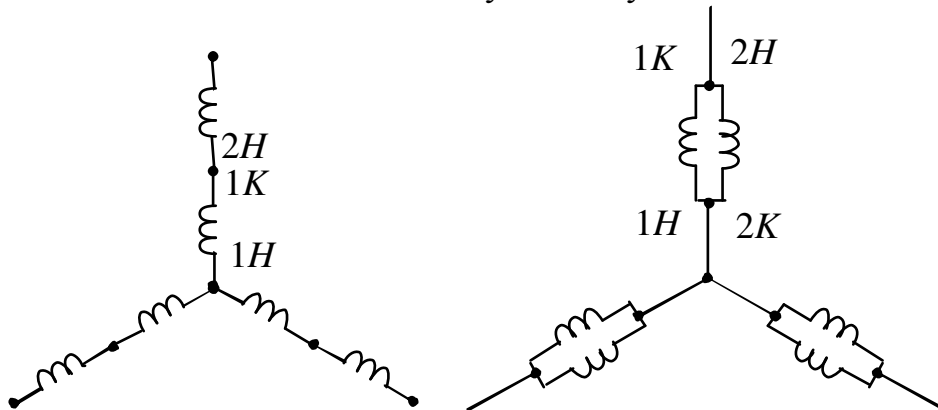
Величина допустимого момента:

$$M_{\text{дон } \Delta} = \frac{P_{\text{дон } \Delta}}{\omega_{0\Delta}}; \quad (15.7)$$

$$M_{\text{дон } YY} = \frac{P_{\text{дон } YY}}{\omega_{0YY}} = \frac{P_{\text{дон } \Delta}}{2\omega_{0\Delta}} = \frac{1}{2} M_{\text{дон } \Delta}; \quad (15.8)$$



Переключение со звезды на двойную звезду:



$$P_{\text{дон } Y} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot 2I_H \cos \varphi_Y; \quad (15.9)$$

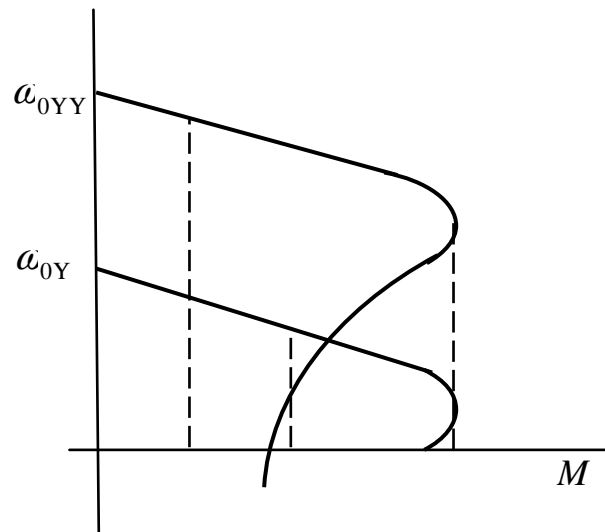
$$P_{\text{дон } YY} = 2P_{\text{дон } Y}; \quad (15.10)$$

$$M_{\text{дон } Y} = \frac{P_{\text{дон } Y}}{\omega_{0Y}};$$

$$\omega_{0Y} = \frac{2\pi f}{p};$$

$$\omega_{0YY} = 2\omega_{0Y};$$

$$M_{\text{дон } YY} = \frac{P_{\text{дон } YY}}{\omega_{0YY}} = \frac{2P_{\text{дон } Y}}{2\omega_{0Y}} = M_{\text{дон } Y}. \quad (15.11)$$



Особенности регулирования:

1) Регулирование грубоступенчатое, осуществляется в соотношении 1:2, 3:4.

2) Регулирование может осуществляться при постоянной мощности и моменте.

3) Для регулирования скорости используются двигатели специальной конструкции, у которых ротор как правило коротко замкнут, а на статоре укладывается либо несколько обмоток индивидуальных, либо 1-2 секционированных обмоток.

4) Для переключения числа пар полюсов требуется громоздкое коммутационное устройство.

3. Регулирование скорости изменением частоты подводимого напряжения.

$$E = k\Phi f;$$

$$U \approx E;$$

$$U = k\Phi f;$$

$$M = k\Phi I_2' \cos \varphi_2;$$

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_c};$$

$$(15.12)$$

$$M_{\kappa} = \frac{mp}{2\pi f} \cdot \frac{2U_1^2}{2(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_{\kappa}^2})};$$

$$r_1 = 0; \quad M_{\kappa} = \frac{mp}{2\pi f} \cdot \frac{U_1^2}{x_{\kappa}};$$

$$x_\kappa = 2AfL;$$

$$\lambda = A \frac{U_1^2}{f_1^2 M_c} = A \frac{U_2^2}{f_2^2 M_c};$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_{c_1}}{M_{c_2}}} \quad (15.14)$$

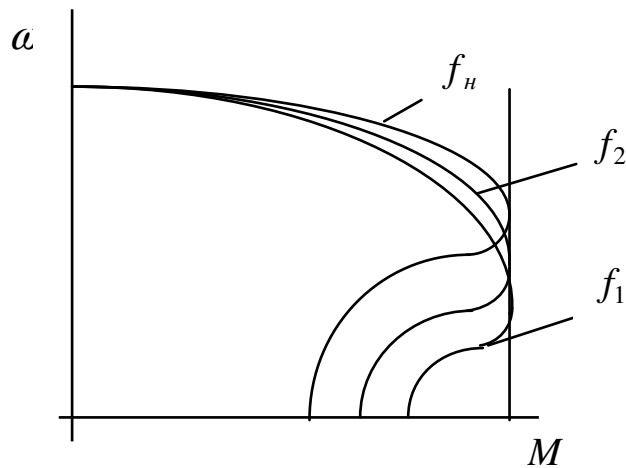
$$\dot{U} = \dot{f} \sqrt{\dot{M}_2} \quad (15.15);$$

$$M_c = M_{mp} + (M_{ch} - M_{mp}) \left( \frac{\omega}{\omega_h} \right)^x = M_{mp} + (M_{ch} - M_{mp}) \left( \frac{f}{f_h} \right)^x \quad (15.16);$$

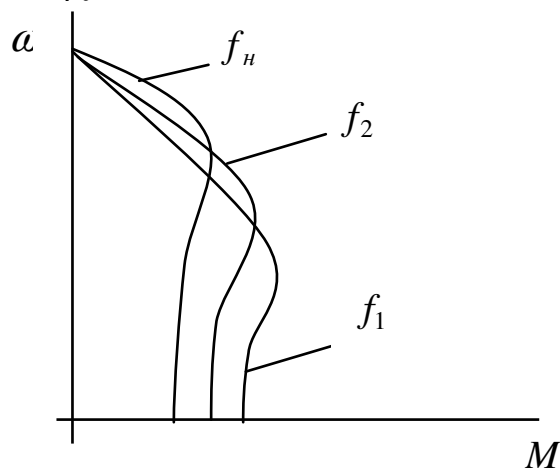
$$\dot{U} = \dot{f} \sqrt{M_{mp} + (1 - M_{mp}) f^x} \quad (15.17);$$

$$x = 0 \quad \dot{U} = \dot{f} \quad \frac{U}{U_h} = \frac{f}{f_h} \quad \frac{U}{f} = const \quad (15.18);$$

$f_h > f_2 > f_1 \quad \frac{U}{f} = const$  – наиболее распространены.

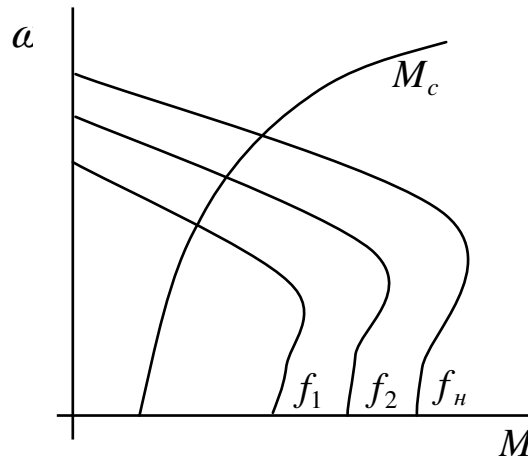


$$x = -1 \quad \dot{U} = \dot{f} \sqrt{\frac{1}{f}} = \sqrt{\dot{f}}; \quad \frac{U}{U_h} = \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{f_h}}; \quad \frac{U}{\sqrt{f}} = const \quad (15.19)$$





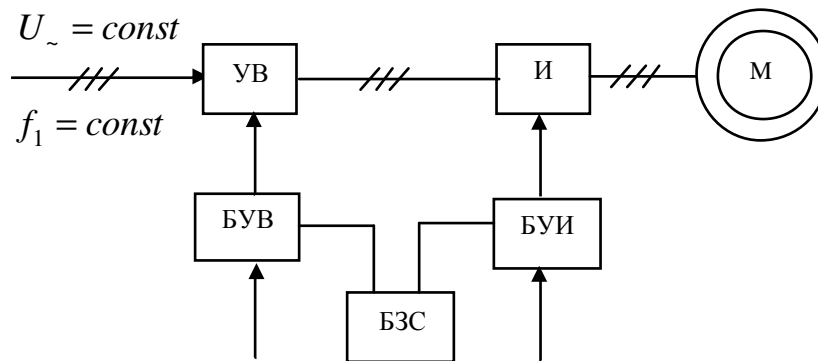
$$x = 2 \quad \dot{U} = \dot{f}^2; \quad \frac{U}{U_n} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2; \quad \frac{U}{f^2} = const \quad (15.20)$$



Особенности регулирования:

- регулирование плавное и экономичное;
- стабильность неизменная, т.к. жесткость характеристики не меняется;
- регулирование возможно, как вверх, так и вниз  $D_1 \uparrow = 1,5 \div 2$ ,  $D_2 \downarrow = 12 \div 15$ ,  $D = D_1 \cdot D_2 \approx 30$ ;
- для регулирования требуются преобразователи частоты, они могут быть двух типов:

- машинные преобразователи (асинхронные и синхронные преобразователи частоты);
- статические преобразователи (со звеном ПТ и без него).



УВ – управляющий выпрямитель;  
 И – инвертор;  
 БУВ, БУИ – блоки управления УВ и И;  
 БЗС – блок задания скорости.

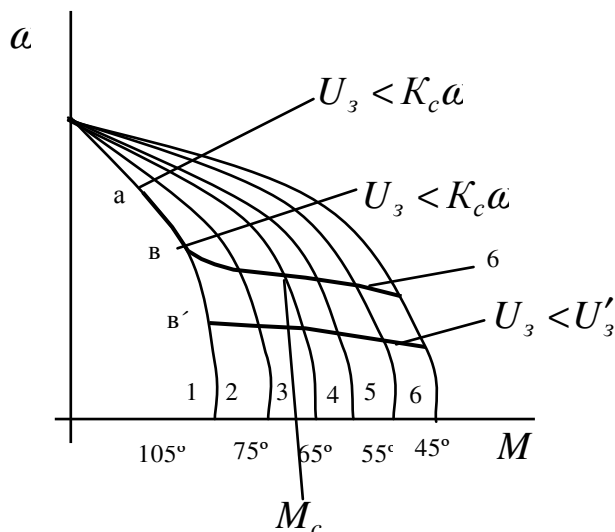
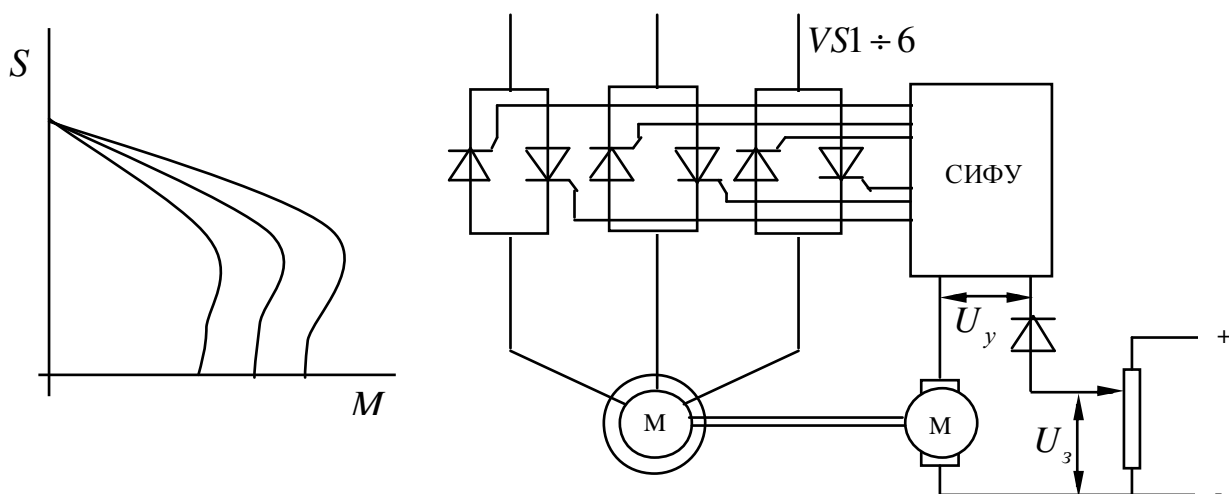
#### 4) Регулирование скорости изменения напряжения подводимого к статору АД

$$U_y = U_s - K_c \omega \quad (16.1)$$

$K_c$  – коэффициент обратной связи по скорости.

Если АД будет разгружен, то он будет работать в точке близкой к скорости идеального х. х.

При уменьшении  $a$ , уменьшается  $K_c a$ , что вызывает рост  $U_y$  и двигатель переходит на следующую характеристику и так далее до  $M_c$ .



6 – характеристика замкнутой системы;  
1-5 – характеристики разомкнутых систем.

Характеристики 1-5 – это характеристики АД в разомкнутой системе при разных напряжениях, величины этих напряжений получают на выходе ТП при различных значениях напряжения управления  $U_y$ , чем больше это напряжение, тем меньше угол управления СИФУ, тем больше напряжение на выходе преобразователя.

Работа системы заключается в:

– допустим, двигатель работает на холостом ходе – это будет соответствовать точке  $a$  на характеристике 1, которая получена при наименьшем напряжении, если двигатель нагрузить моментом  $M_c$  его скорость начинает уменьшаться в соответствии с характеристикой 1, следовательно напряжение тахогенератора  $K_c a$  будет уменьшаться, что приведет к росту напряжения  $U_y$ . В

конце концов в точке  $b$  напряжение тахогенератора  $K_c \omega$  будет равно  $U_3$ , теперь уже при дальнейшем снижении скорости ТП откроется и на двигатель поступает напряжение больше предыдущего и он перейдет на характеристику 2. На этой характеристике  $M_{36} < M_c$ , следовательно, произойдет дальнейшее снижение скорости и увеличение напряжения на выходе преобразователя, и двигатель перейдет на характеристику 7 и процесс повторится.

Используется: в подъемно-транспортных установках.

## **21 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Переходными процессами называют процесс уменьшения скорости, момента, тока и других параметров, при переходе двигателя из одного установленного режима к другому.

Изучение переходных процессов дает возможность определить ускорение, время переходных процессов, скорость протекания, путь, угловое положение и др., что необходимо знать для правильного выбора мощности двигателей, наладки аппаратуры управления, элементов защиты, допустимого нагрева и др.

На скорость протекания переходных процессов оказывают влияние различного рода инерционности:

- механическая инерционность, которая обусловлена изменением запаса кинетической энергии во всех движимых элементах СУ;
- электромагнитная инерционность, обусловлена изменением электрической энергии запасенной в индуктивностях;
- тепловая инерционность, обусловлена изменением нагрева, и изменением сопротивления в результате нагрева, однако эта инерционность значительно больше предыдущих и она не учитывается.

В зависимости от того какая инерционность учитывается переходные процессы делятся на: механические и электромеханические.

*Методы расчета переходных процессов:*

- аналитический, когда уравнения достаточно просты для интегралов, здесь нелинейности не учитываются – этот метод хорош, тем, дает качественную и количественную оценку.
- графический и графоаналитический методы расчета используются тогда, когда нужно учитывать нелинейности (они точнее, но более громоздки).

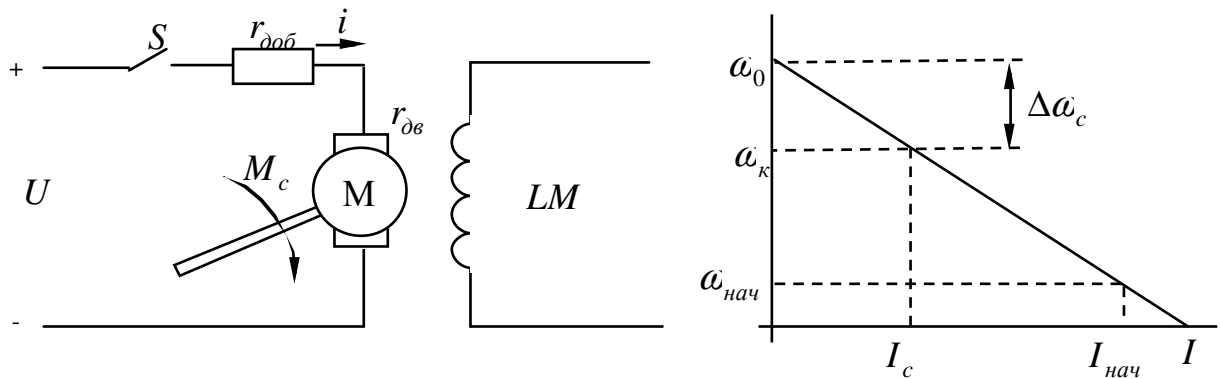
### **Механические переходные процессы в ЭП с ДТП независимого возбуждения при питании от сети**

$$U = const ; \quad I = const ; \quad M_c = const ; \quad L_{я} = const .$$

***Переходные процессы при пуске ДТП независимого возбуждения в одну ступень:***

$$U = E + iR \quad (16.2) \text{ – формула л. Равновесия;}$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (16.3) \text{ – формула мех. Равновесия.}$$



$$U = K\Phi\omega + iR \quad (16.2)$$

$$i = I_c + \frac{J}{K\Phi_n} \frac{d\omega}{dt} \quad (16.3)$$

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \Delta\omega_c \quad (16.4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_m} = \frac{\omega_0 - \Delta\omega_c}{T_m} \quad (16.5)$$

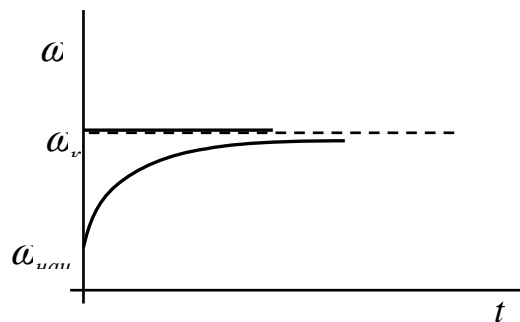
$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c + ce^{-\frac{t}{T_m}} \quad (17.1)$$

$c$  – постоянная перерегулирования, определяется из начальных условий:  $t = 0$ ,  $\omega = \omega_{нач}$ ;

$$\omega = \omega_{нач} - (\omega_0 - \Delta\omega_c) = \omega_{нач} - \omega_c;$$

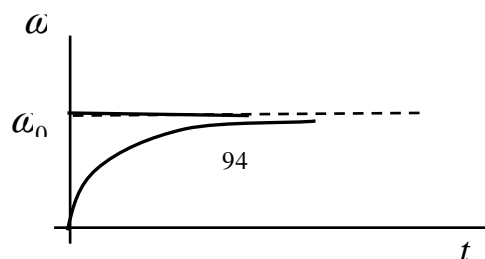
$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (17.2)$$

Если  $I_c = 0$ , то  $\omega = \omega_0 + (\omega_{нач} - \Delta\omega_0)e^{-\frac{t}{T_m}}$



$$(17.3)$$

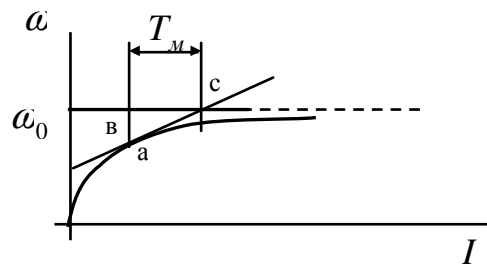
$$\omega_{нач} = 0, \text{ то } \omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) \quad (17.3)$$



$$T_M = \frac{JR}{(K\Phi_H)^2} = \frac{U_H \cdot J}{K\Phi_H \cdot K\Phi_H \frac{U}{R}} = \frac{\omega_0 \cdot J}{K\Phi_H \cdot I_K} = \frac{\omega_0 \cdot J}{M_K} \quad (17.5)$$

Электромеханическая постоянная времени – это время которое необходимо для разгона двигателя от нулевой скорости до скорости идеального холостого хода под действием момента короткого замыкания  $M_K$  и моментом инерции системы  $J$ .

Графическая интерпретация механической постоянной времени:



$$T_M = \frac{JR}{(K\Phi_H)^2} = \frac{JRM_K}{(K\Phi_H)^2 M_K} = \frac{J\Delta\omega_{(-1)}}{M_K} = \frac{J(\omega_0 - \omega_H)}{M_K - \omega_0} \cdot \omega_0 = \frac{J\omega_0 S_{(H)}}{M_K} \quad (17.6)$$

$$T_M = \frac{JR}{(K\Phi_H)^2} = \frac{JRM_K}{(K\Phi_H)^2} = \frac{J}{\beta}; \quad (17.7)$$

$$\omega_{\text{кон}} = \omega_c + (\omega_{\text{нач}} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}};$$

$$\omega_{\text{кон}} - \omega_c = (\omega_{\text{нач}} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}};$$

$$t = T_M \ln \left( \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_c}{\omega_{\text{кон}} - \omega_c} \right); \quad (17.8)$$

$$\omega_{\text{кон}} = (0,98 - 0,95)\omega_c;$$

$$U = K\Phi\omega + iR; \quad (17.9)$$

$$i = I_c = \frac{\beta}{K\Phi} = \frac{d\omega}{dt}; \quad (17.10)$$

$$0 = K\Phi_H \frac{d\omega}{dt} + R \frac{di}{dt}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{R}{K\Phi_H} \frac{di}{dt}; \quad (17.11)$$

При дифференцировании (17.9) получим (17.11) и подставим в (17.10) получим:

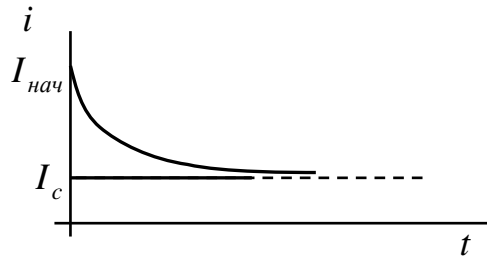
$$i = I_c - \frac{JR}{(K\Phi)^2} \cdot \frac{di}{dt}; \quad (17.12)$$

$$i = I_c - (I_{\text{нач}} - I_c) e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (17.13)$$

$$i = I_c - I_M \frac{di}{dt}; \quad \frac{di}{dt} + \frac{i}{T_M} = \frac{I_c}{T_M};$$

$$i = I_c - ce^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (17.12')$$

$$t = 0; \quad t = I_{нач}; \quad i = I_c - (I_{нач} - I_c)e^{-\frac{t}{T_M}};$$



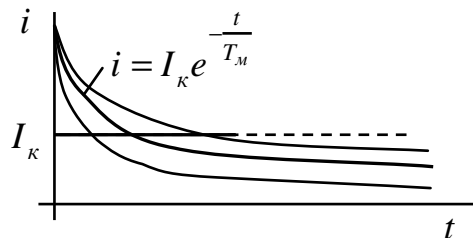
$$I_{нач} = \frac{U - E}{R}; \quad (17.14)$$

$$E = K\Phi_n i_{0\ нач}$$

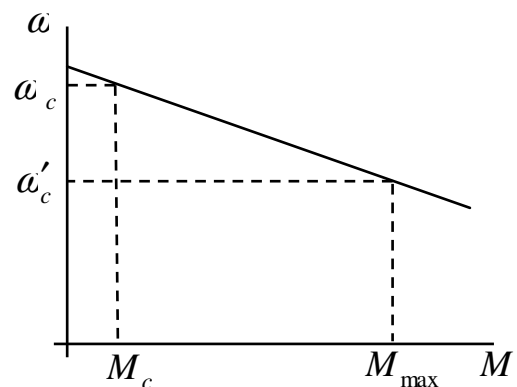
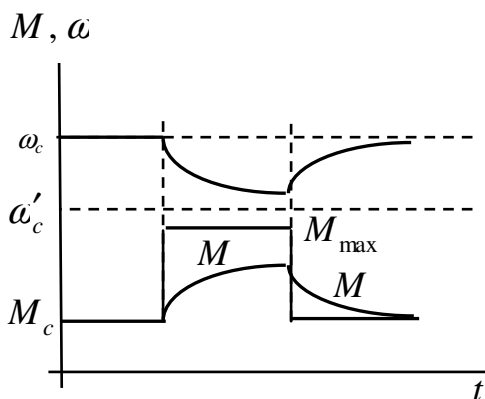
$$\omega_{нач} = 0; \quad I_{нач} = I_{я} = \frac{U_n}{R}; \quad (17.15)$$

$$i_c = I_c - (I_n - I_c)e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (17.16)$$

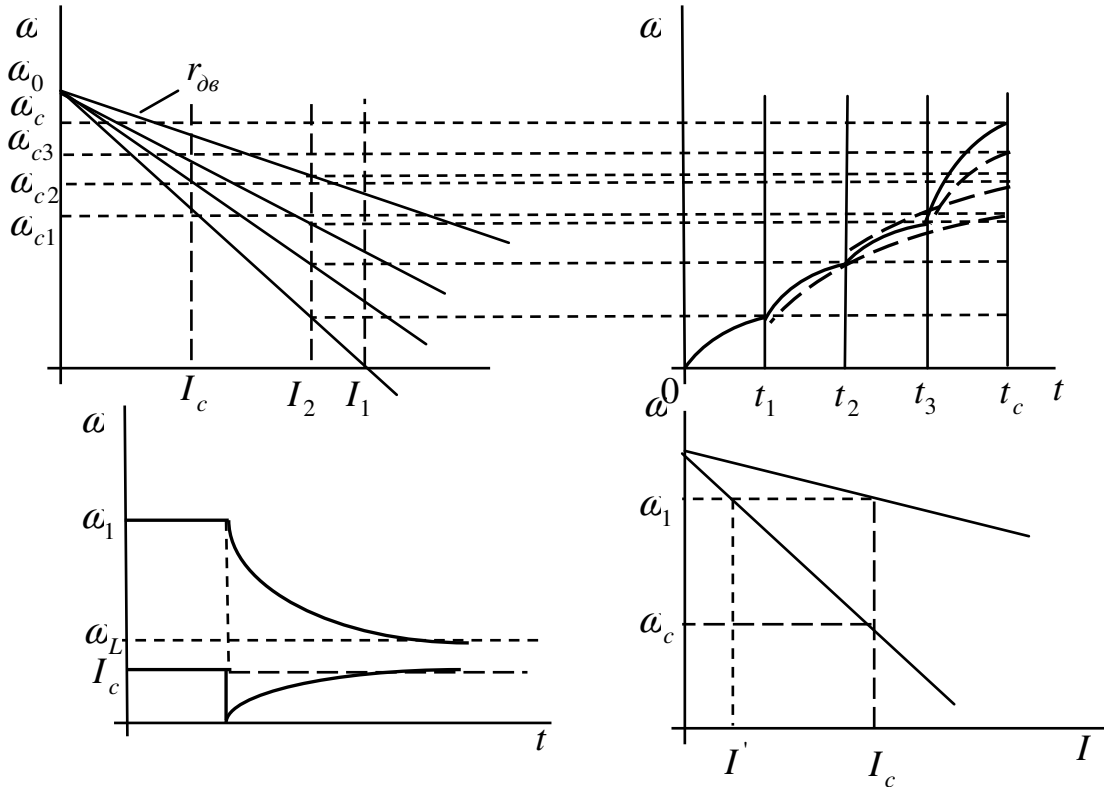
$$\omega_{нач} = 0; \quad \omega_{кон} = \omega_0; \quad I_c = 0; \quad i = I_c e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (17.17)$$



Прием и зброс нагрузки



## Переходные процессы при многоступенчатом пуске

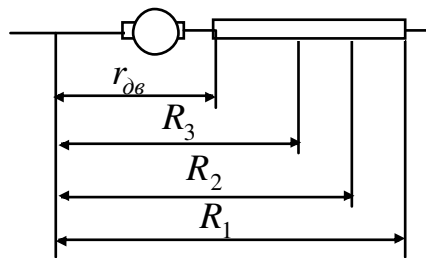


$$T_M = \frac{JR}{(k\Phi_H)} = k_1 R_1;$$

$$T_{M_2} = k_1 R_2;$$

$$T_{M_3} = k_1 R_3;$$

$$T_{M_3} = k_1 r_{\partial\delta};$$



$$t = T_M \ln \left( \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_c}{\omega_{\text{кон}} - \omega_c} \right);$$

$$t = T_M \ln \left( \frac{I_{\text{нач}} - I_c}{I_{\text{кон}} - I_c} \right);$$

$$t_1 = T_{M_1} \ln \left( \frac{0 - \omega_{c_1}}{\omega_1 - \omega_{c_1}} \right); \quad t_1 = T_{M_1} \ln \left( \frac{I_1 - I_{c_1}}{I_2 - I_c} \right) = T_{M_1} k_2;$$

$$t_2 = T_{M_2} \ln \left( \frac{\omega_1 - \omega_{c_2}}{\omega_2 - \omega_{c_2}} \right); \quad t_2 = T_{M_2} k_2;$$

$$t_3 = T_{M3} \ln \left( \frac{\omega_2 - \omega_{c2}}{\omega_4 - \omega_{c2}} \right); \quad t_3 = T_{M3} k_2;$$

$$t_c = 3 \div 4 T_{M_c}.$$

$$1. \quad \omega = \omega_{c1} + (0 - \omega_{c1}) e^{-\frac{t}{T_{M2}}};$$

$$\Delta t_1 = \frac{0,9}{3} = 0,3$$

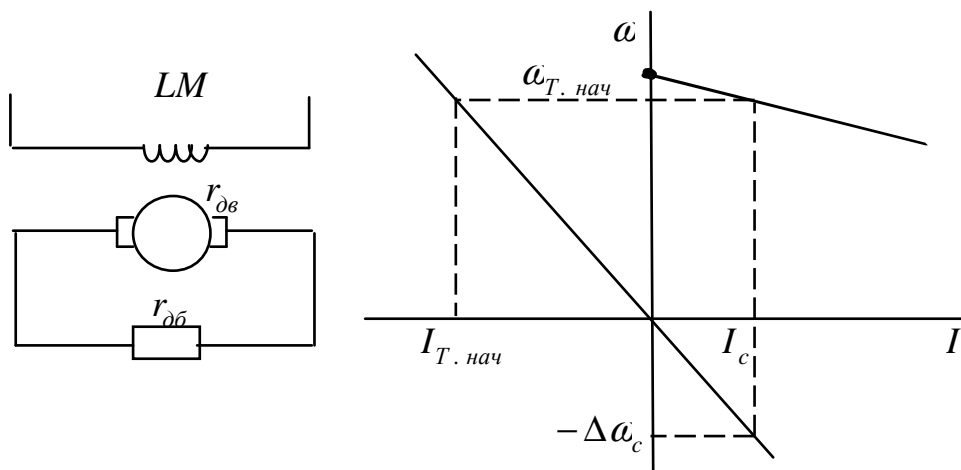
$$2. \quad \omega = \omega_{c2} + (\omega_1 - \omega_{c2}) e^{-\frac{t}{T_{M2}}}$$

$$\Delta t_2 = \frac{0,6}{3} = 0,2$$

$$3. \quad \omega = \omega_{c3} + (\omega_2 - \omega_{c3}) e^{-\frac{t}{T_{M3}}}$$

$$t_\Sigma = t_1 + t_2 + t_3 + t_c.$$

### Переходные процессы при динамическом торможении



$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H} = 0;$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c + ce^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (17.18)$$

$$t = 0; \quad \omega = \omega_{T.нач};$$

$$\omega_{T.нач} = -\Delta\omega_c + c;$$

$$c = -(\omega_{T.нач} + \Delta\omega_c); \quad (17.19)$$

$$i = I_c + ce^{-\frac{t}{T_M}}.$$

$U = 0$ , так как откл. от сети.

$$\omega = -\Delta\omega_c + ce^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (18.1)$$

$$t = 0; \quad \omega = \omega_{нач}; \quad \omega_{нач} = -\Delta\omega_c + c$$



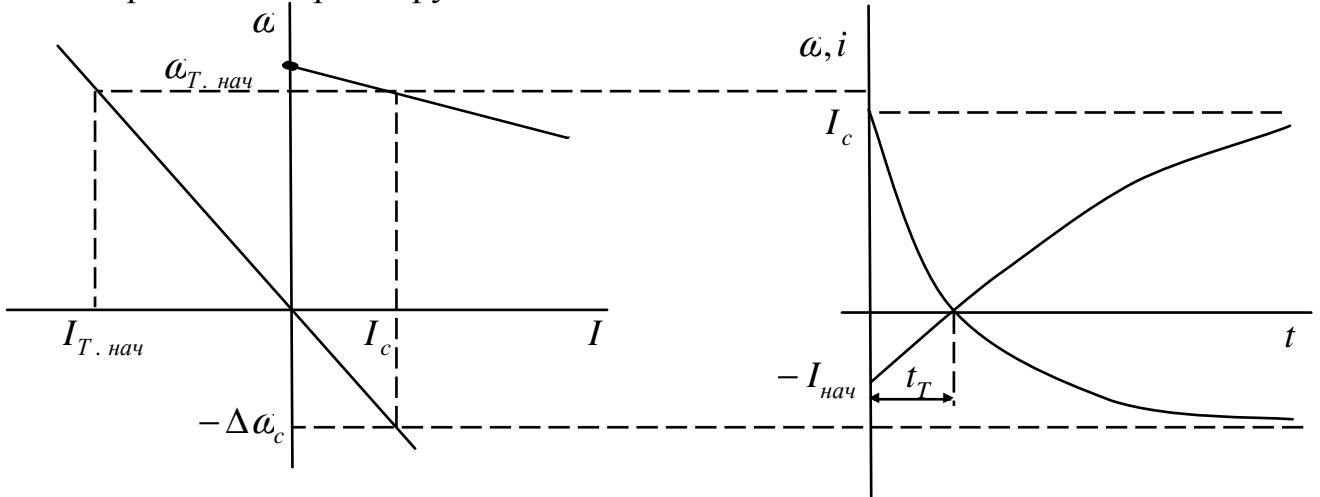
$$c = \omega_{нач} + \Delta\omega_c; \quad (18.2)$$

$$\omega = -\Delta\omega_c + (\omega_{нач} + \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (18.3)$$

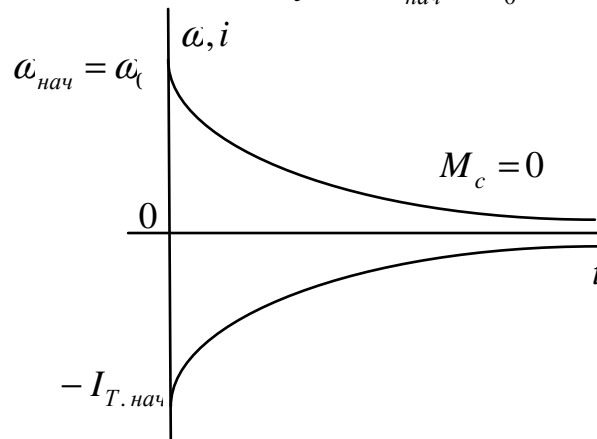
$$t = 0; i = I_{нач}; \quad -I_{нач} = I_c + c;$$

$$I = I_c - (I_{нач} + I_c)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (18.4)$$

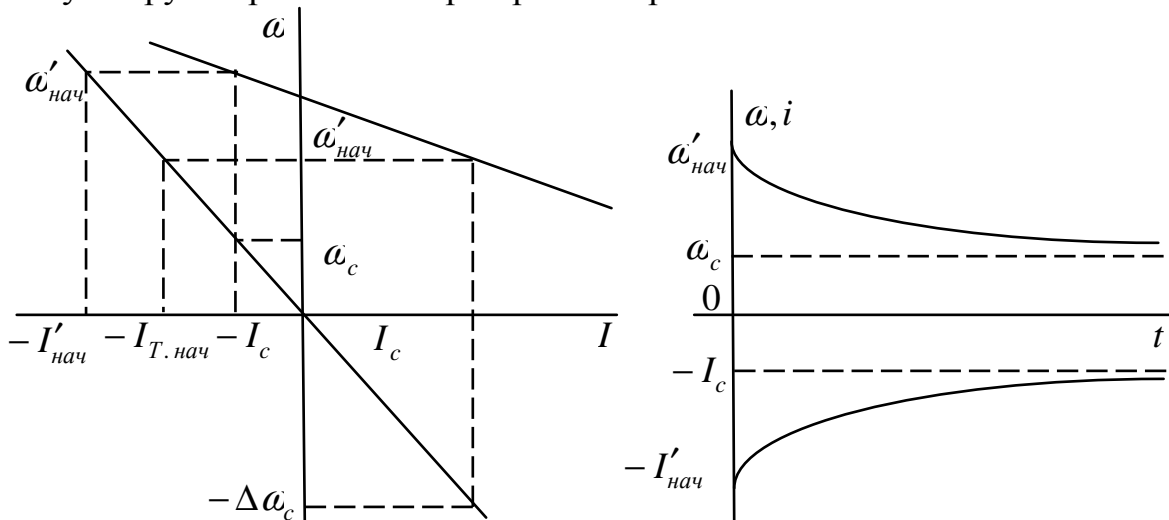
Торможение при нагрузке:



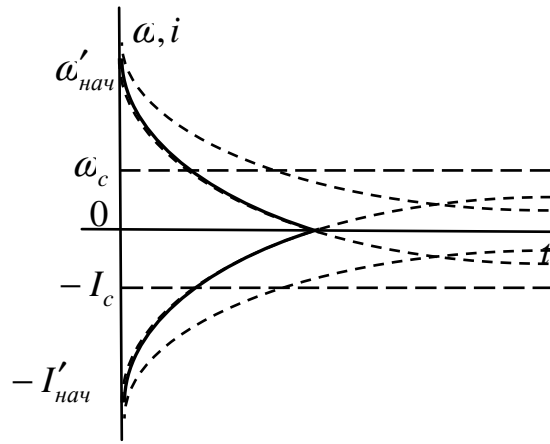
Если торможение на холостом ходу, то  $\omega_{нач} = \omega_0$



Спуск груза в режиме генераторного торможения



Динамическое торможение при реактивного сопротивления, кривые переходных процессов строятся по тем же зависимостям ((18.3),(18.4)).



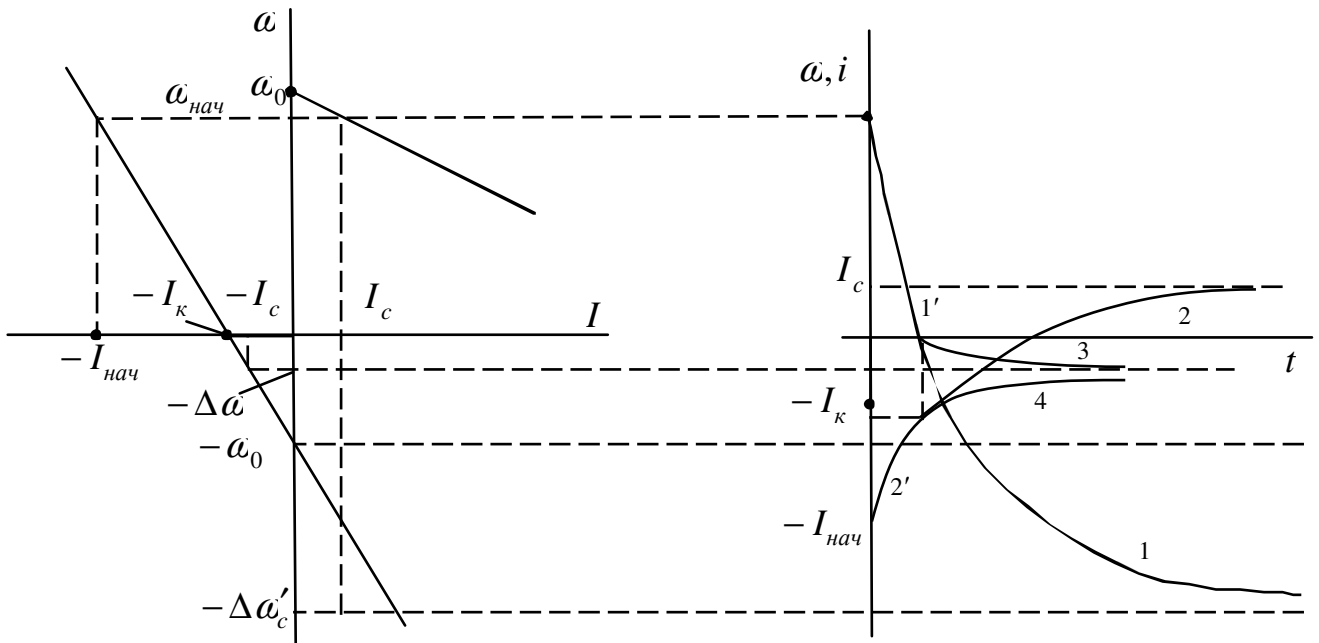
Определение времени переходного процесса получают из уравнения (18.3) или (18.4), и задаются конечными значениями скорости.

$$\omega_{\text{кон}} = -\Delta\omega_c + (\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$\omega_{\text{кон}} + \Delta\omega_c = \frac{\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_c}{e^{\frac{t}{T_M}}}$$

$$t = T_M \ln \left( \frac{\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_c}{\omega_{\text{кон}} + \Delta\omega_c} \right) \quad (18.5)$$

Переходные процессы при торможении противовключением и реверсе



1' - 1, 2'-2 – кривые при наличии активной нагрузки;  
1' - 3, 2'-4 – кривые при наличии реактивной нагрузки.

При торможении противовключением:  $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n}$

$$\omega = -(\Delta\omega_c + \Delta\omega_c) + ce^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (18.6)$$

$$t = 0; \omega = \omega_{нач}; \quad \omega_{нач} = (-\omega_0 + \Delta\omega_c) + c$$

$$c = \omega_{нач} + \Delta\omega_c + \omega_0; \quad (18.7)$$

$$\omega = -(\omega_0 + \Delta\omega_c) + (\omega_{нач} + \omega_0 + \Delta\omega_c) + c; \quad (18.8)$$

$$t = 0; i = -I_{нач}; \quad -I_{нач} = I_c + c \Rightarrow c = -(I_{нач} + I_c); \quad (18.9)$$

$$i = I_c - (I_{нач} + I_c)e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (18.10)$$

Определение времени переходного процесса

$$\omega_{кон} + \omega_0 + \Delta\omega_c = (\omega_{нач} + \omega_0 + \Delta\omega_c)e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$t = T_M \ln \left( \frac{\omega_{нач} + \omega_0 + \Delta\omega_c}{\omega_{кон} + \omega_0 + \Delta\omega_c} \right) \quad (18.11)$$

### Потери энергии при переходном процессе

За время переходного процесса в двигателе выделяется тепло, и повышается его температура, что повышает потери, они сами могут превышать потери при установившемся режиме.

В процессе работы двигатель потребляет мощность необходимую для потребления статической нагрузки  $P_c$ , а также мощность необходимую для создания запаса кинетической энергии  $P_\omega$ , кроме этого он потребляет мощность, которая теряется в обмотках и выделяется в виде тепла  $\Delta P$ .

Потери энергии при пуске:

$$\Delta A_n \int_0^{t_n} (k + v) dt \quad (18.12)$$

$k$  – постоянные потери (потери в подшипниках, на вентиляцию, гистерезис);

$v$  – переменные потери зависящие от тока нагрузки.

$$v = i^2 R$$

$$\Delta A_n \int_0^{t_n} \Delta P dt \quad (18.13)$$

$k$  – пренебрегают.

1. Потери энергии ДПТ на холостом ходу.

$$U = E + iR$$

$$Ui = Ei + i^2 R \quad (18.14)$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega); \quad (18.15)$$

$$\Delta A_n = \int_0^{t_n} M(\omega_0 - \omega) dt \quad (18.16)$$

При пуске на холостом ходу:

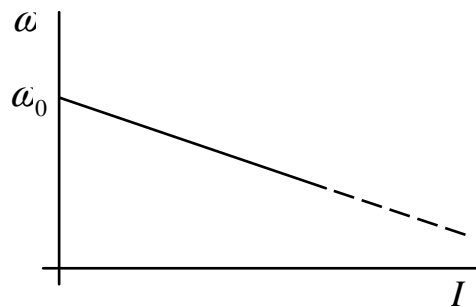
$$M_c = 0; \quad M = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$\Delta A_n = \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} J(\omega_0 - \omega) d\omega = J \left[ \omega_0(\omega_{кон} - \omega_{нач}) - \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{2} \right] \quad (18.18)$$

$$\omega_{нач} = 0; \quad \omega_{кон} = \omega_0;$$

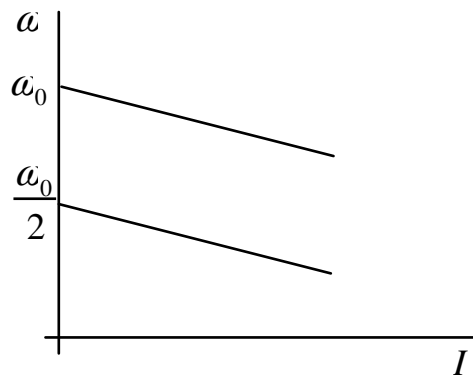
$$\Delta A_{n \text{ эл}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (18.19)$$

$$\Delta A_{\text{мех}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (18.20)$$



### Способы уменьшения потерь

1. За счет ступенчатого пуска.



$$\omega_{нач} = 0 \quad \omega_{кон} = \frac{\omega_0}{2} = 0,5\omega_0$$

$$\Delta A_{n1} = J \left[ 0,5\omega_0(0,5\omega_0 - 0) - \frac{(0,5\omega_0)^2}{2} \right] = 0,25J \frac{\omega_0^2}{2}$$

$$\omega_{нач} = 0,5\omega_0 \quad \omega_{кон} = \omega_0$$

$$\Delta A_{n2} = J \left[ \omega_0(\omega_0 - 0,5\omega_0) - \frac{\omega_0^2 - (0,5\omega_0)^2}{2} \right] = 0,25J \frac{\omega_0^2}{2}$$

$$\Delta A_n = \Delta A_{n1} + \Delta A_{n2} = 0,5J \frac{\omega_0^2}{2}$$

$$\Delta A_n = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{k} \quad (18.21)$$

18.21 – без учета потерь для запаса кинетической энергии (механической энергии).

$$\Delta A_n = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (18.22)$$

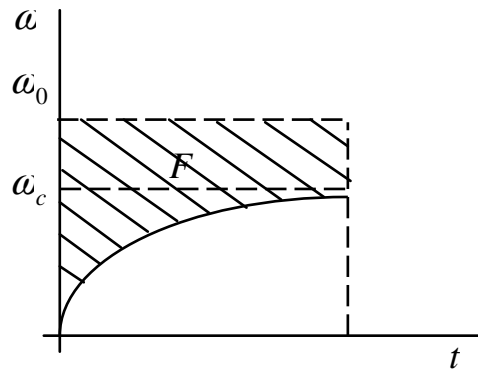
$k$  – количество ступеней.

2. Потери энергии при пуске под нагрузкой.

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\Delta A_n = \int_{\omega_{нач}=0}^{\omega_{кон}=\omega_c} J(\omega_0 - \omega)d\omega + \int_0^{t_n} M(\omega_0 - \omega)dt = J \left[ \omega_0 \left( \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) \right] + M_c \left( \omega_0 t - \int_0^{t_n} \omega dt \right) \quad (18.23)$$

$$M_c \left( \omega_0 t - \int_0^{t_n} \omega dt \right) = M_c F \quad (18.24)$$



3. Потери энергии при динамическом торможении на холостом ходу. Якорь двигателя отключается от сети, поэтому  $\omega_0 = 0$

$$\Delta A_{m\partial} = \int_0^{t_T} M(-\omega)dt \quad (18.26)$$

$$M = J \frac{\omega_0^2}{2}$$

$$\Delta A_{m\partial} = \int_{\omega_0}^0 J(-\omega)d\omega = \int_0^{\omega_0} J\omega d\omega = J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (18.27)$$

$$\Delta A_{m\partial} = \int_0^{t_T} M(-\omega)dt$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\Delta A_{m\partial} = \int_{\omega_c}^0 J(-\omega)d\omega + \int_0^{t_T} M_c(-\omega)dt = \int_0^{\omega_c} J\omega d\omega - M_c \int_0^{t_T} \omega dt = J \frac{\omega_c^2}{2} - M_c \int_0^{t_T} \omega dt \quad (19.1)$$

4. Потери энергии при торможении противовключении и реверсе

$$\Delta A_{m np} = \int_0^{t_r} M(-\omega_0 - \omega) dt \quad (19.2)$$

Потери энергии при торможении противовключении на холостом ходу.

$$M_c = 0$$

$$M = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\Delta A_{m np} = \int_{\omega_0}^0 J(-\omega_0 - \omega) d\omega = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega) d\omega = 3J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (19.3)$$

Потери энергии при реверсе на холостом ходу

$$\Delta A_{peв} = \int_{\omega_0}^{-\omega_0} J(-\omega_0 - \omega) d\omega = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega) d\omega = 4J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (19.4)$$

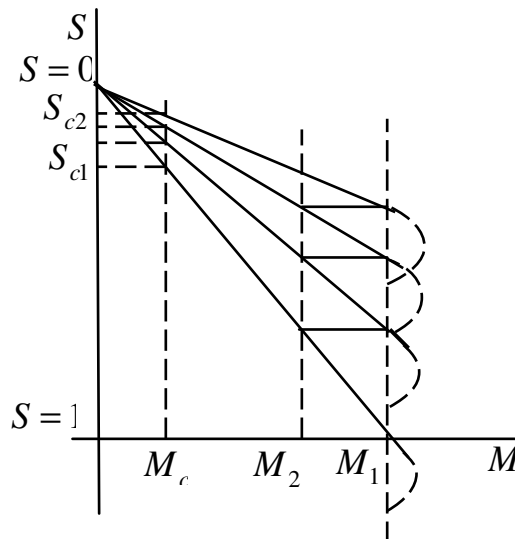
Потери энергии при торможении противовключением и реверсе под нагрузкой.

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\Delta A_{m np} = \int_{\omega_0}^0 J(-\omega_0 - \omega) d\omega + \int_0^{t_r} M_c$$

## 22 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИВОДАХ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

1. При линейной механической характеристике (нелинейные не учитываются)



$$\omega = \omega_0(1 - S);$$

$$T_M = \frac{J \omega_0 S_{(H)}}{M_H}; \quad (19.5)$$

$$S = S_c + (S_{нач} - S_c)e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (19.6)$$

$$M = M_c + (M_{нач} - M_c)e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (19.7)$$

2. При учете нелинейности характеристик АД.

$M_c = 0$  – то есть холостой ход.

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}}. \quad (19.8)$$

При  $M_c = 0$ :

$$M = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (19.9)$$

$$\omega = \omega_0(1 - S). \quad (19.10)$$

Продифференцируем 19.10:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (19.11)$$

Подставим 19.11 в 19.9:

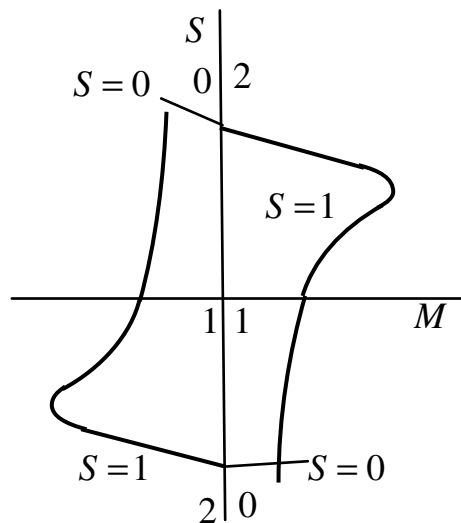
$$M = -J\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (19.12)$$

Приравняем 19.8 и 19.12:

$$\frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}} = -J\omega_0 \frac{dS}{dt}; \quad (19.13)$$

$$dt = \frac{J\omega_0}{2M_{\kappa}} \left( \frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS = -\frac{J\omega_0 S_{\kappa}}{2M_{\kappa}} \left( \frac{S}{S_{\kappa}^2} + \frac{1}{S} \right) dS = -\frac{T_M'}{2} \left( \frac{S}{S_{\kappa}^2} + \frac{1}{S} \right) dS; \quad (19.14)$$

$$dt = \frac{T_M'}{2} \left( \frac{S_{нач}^2 - S_{кон}^2}{2S_{\kappa}^2} + \ln \frac{S_{нач}}{S_{кон}} \right). \quad (19.15)$$



Время пуска:

$$t_n: S_{нач} = 1, S_{кон} = 0,05;$$

$$t_n = \frac{T'_M}{2} \left( \frac{1}{2S_{\kappa}^2} + \ln 20 \right).$$

Время торможения противовключения:

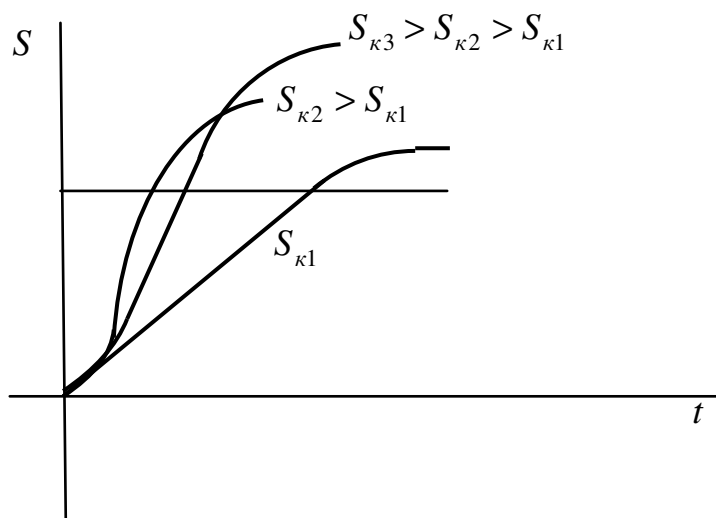
$$t_{T. пр}: S_{нач} = 2, S_{кон} = 1;$$

$$t_n = \frac{T'_M}{2} \left( \frac{4-1}{2S_{\kappa}^2} + \ln 2 \right).$$

Время реверса:

$$t_{рев}: S_{нач} = 2, S_{кон} = 0,05;$$

$$t_{рев} = \frac{T'_M}{2} \left( \frac{4}{2S_{\kappa}^2} + \ln 40 \right).$$



Определим оптимальное критическое скольжение:

$$\frac{dt}{dS_{\kappa}} = 0;$$

$$S_{\kappa \text{ опт}} = \sqrt{\frac{S_{нач}^2 - S_{кон}^2}{2 \ln \frac{S_{нач}}{S_{кон}}}}; \quad (19.16)$$

Режим	Пуск	торможение	Реверс
$S_{\kappa \text{ опт}}$	0,41	1,47	0,74

Потери энергии при переходных процессах в АД

Потери энергии в коротко замкнутом роторе АД:

$$\Delta A_p = J \frac{\omega_0^2}{2} (S_{нач}^2 - S_{кон}^2). \quad (19.17)$$

Потери энергии в статоре АД с коротко замкнутым ротором:

$$\Delta A_{ст} = J \frac{\omega_0^2}{2} (S_{нач}^2 - S_{кон}^2) \frac{r_1}{r_2}. \quad (19.18)$$

Полные потери:



$$\Delta A_{ад} = J \frac{\omega_0^2}{2} (S_{нач}^2 - S_{кон}^2) \left( 1 + \frac{r_1'}{r_2'} \right). \quad (19.19)$$

Потери энергии при пуске:

$$\Delta A_{пуск} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{r_1'}{r_2'} \right).$$

При торможении противовключением:

$$\Delta A_{м пр} = J \frac{\omega_0^2}{2} (4 - 1) \left( 1 + \frac{r_1'}{r_2'} \right).$$

Потери энергии в приводах с АД с фазным ротором:

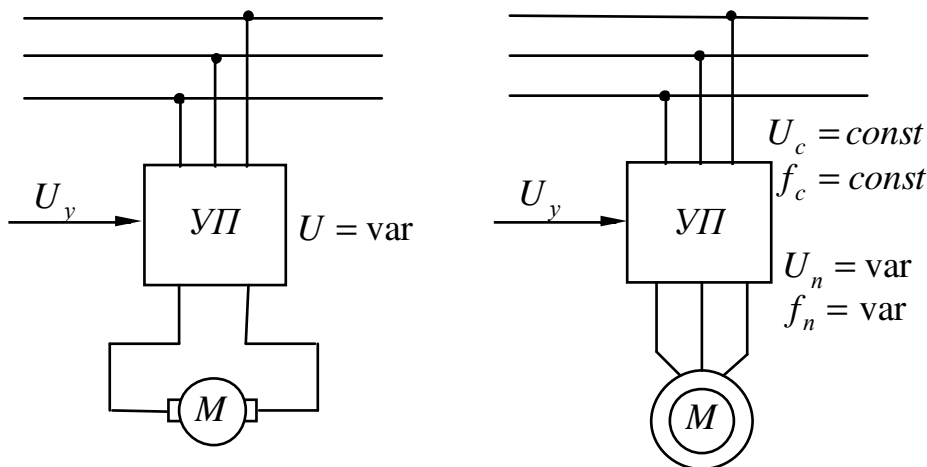
В роторе при пуске:

$$\Delta A_{ф.р.} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{r_2'}{r_2' + r_{доб}'}. \quad (19.20)$$

При пуске в статоре:

$$\Delta A_{ф.с.} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{r_1'}{r_2' + r_{доб}'}. \quad (19.21)$$

### 23 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ (УП-Д)



Можно изменять переходные процессы за счет изменения управляющих воздействий.

1. Переходные процессы при пуске ДПТ на холостом ходу с независимым возбуждением.

$$\omega_0 = \varepsilon_n t; \quad (19.22)$$

19.22 – закон изменения напряжения.

$\varepsilon_n$  – угловое ускорение.

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}; \quad (19.23)$$

$$M_c = 0; \quad M = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (19.24)$$

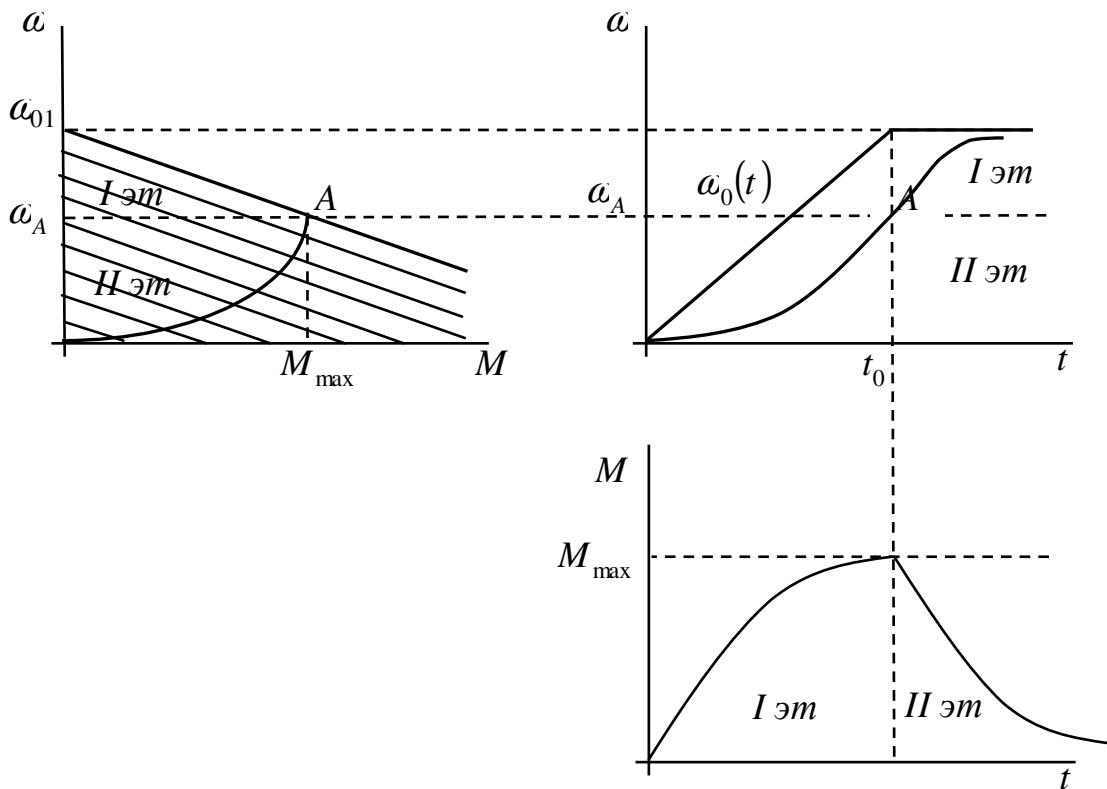
$$\omega = \varepsilon_n t - \frac{J}{\beta} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_n t - T_M \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad (19.25)$$

$$\omega = \varepsilon_n t - T_M \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right); \quad (19.26)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_n \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \text{ подставляем в (19.21).}$$

$$M = J\varepsilon_n \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \quad (19.27)$$

*I эм.*:  $U = \text{var}$ ,  $\omega = \text{var}$ .



*II эм.*:  $U = \text{const}$

$$\omega = \omega_0 + (\omega_A - \omega_{01}) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (19.28)$$

$$M = M_{\max} e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (19.29)$$

## 2. Переходные процессы при пуске под нагрузкой

$$\omega = \omega_0 + \frac{M}{\beta} \quad (19.29)$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{M}{\beta} - \frac{J}{\beta} \frac{d\omega}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega_c - T_M \frac{d\omega}{dt} \quad (19.30)$$

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \varepsilon_n t - \Delta\omega_c = \omega_c(t)$$

I этап:  $\omega = 0$ ;  $U \uparrow = \text{var}$  – двигатель не подвижен, напряжение растёт:

$$\omega = \varepsilon_n t - \frac{M}{\beta}$$

$$0 = \varepsilon_n t - \frac{M}{\beta}$$

$$M_c = \varepsilon_n t \beta \quad (19.31)$$

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1991.- 452 с.
- 2 Электрооборудование кранов /А.П.Боголюбовский, Е.М.Певзнер, Н.Ф. Семерная и др. - М.: Машиностроение, 1983. - 310 с.
- 3 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода/ М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. - М.: Энергоиздат, 1981. - 560 с.
- 4 Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов/ В.И. Ключев, В.М. Терехов. - М.: Энергия, 1960. - 360 с.
- 5 Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 415 с.
- 6 Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. - М.: Металлургия, 1980. - 312 с.
- 7 Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. - Киев: Вища шк., 1978. - 576 с.
- 8 Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов. - М.: Энергия, 1974. - 96 с.
- 9 Хализев Г.Л. Расчет пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей/ Г.Л. Хализев, В.И. Серов. - М.: Высш. шк., 1966. - 280 с.
- 10 Рапутов Б.М. Электрооборудование металлургических кранов. - М.: Металлургия, 1968. - 223 с.
- 11 Кравчик Э.А. Выбор и применение асинхронных двигателей/ Э.А. Кравчик, Э.К. Стрельбицкий, М.М. Шлаф. - М.: Энергоатомиздат, 1967. - 93 с.
- 12 Методические указания к выполнению контрольной работы по курсу «Основы теории электропривода» для студентов специальности 151 «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии» заочной формы обучения/ Сост. А.В. Разживин. – Краматорск: ДГМА, 2006– 48 с..
- 13 ОСТ 24. Краны грузоподъемные. Нормы расчета электроприводов. - Введ. 12.02.85. - М., 1986. - 34 с.
- 14 Бессонов П.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. школа, 1993.- 752 с.

- 15 Режимы резания: Справочник / Под ред. Ю.Б. Барановского. – М.: Машиностроение, 1972. – 560 с.
- 16 Сандлер А.Г. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1987. – 440 с.
- 17 Двигатели асинхронные единой серии 4А мощностью 0,06...400 кВт: Каталог. – М.: Информэлектро, 2000. – 108 с.
- 18 Машины постоянного тока серии 2П: Каталог. – М.: Информэлектро, 2000. – 33 с.
- 19 Герман-Галкина С.Г. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК/ С.Г. Герман-Галкина, Г.А. Кардонов.- СПб.: КОРОНАпринт, 2003. - 256 с., ил.