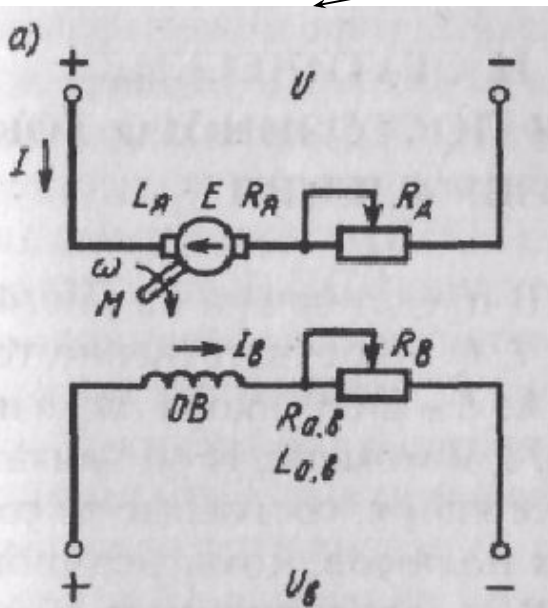
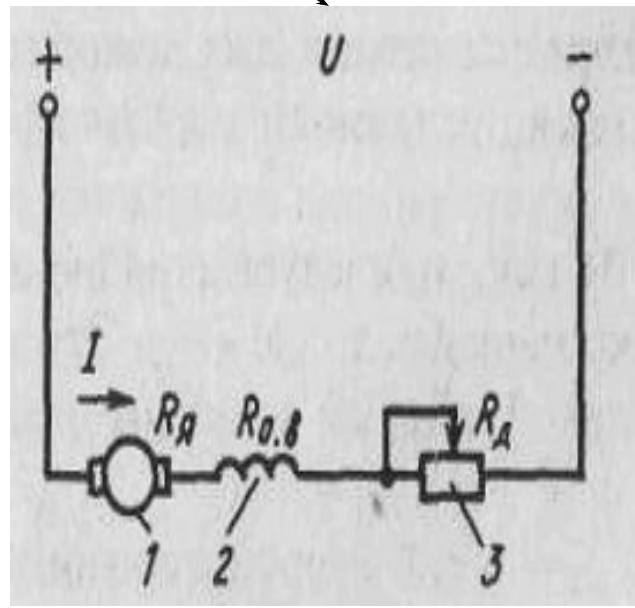


ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

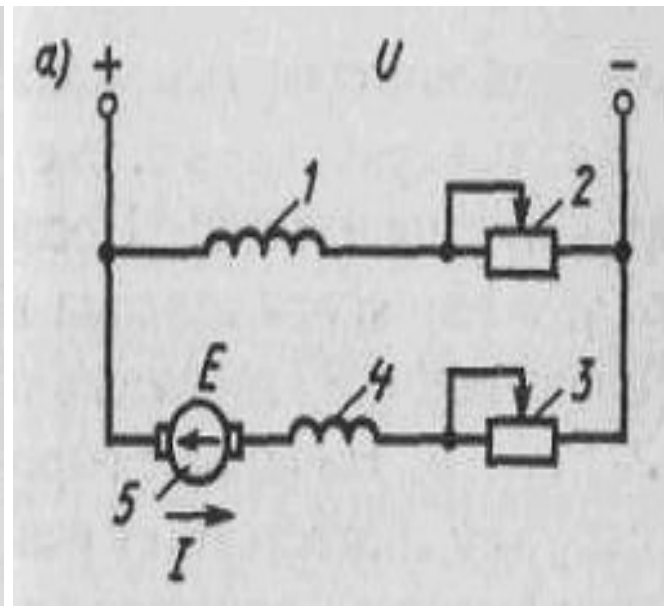
В ЭП используются двигатели постоянного тока независимого (ДПТНВ), последовательного (ДПТПВ) и смешанного (ДПТСВ) возбуждения, а также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТНВ.



ДПТНВ



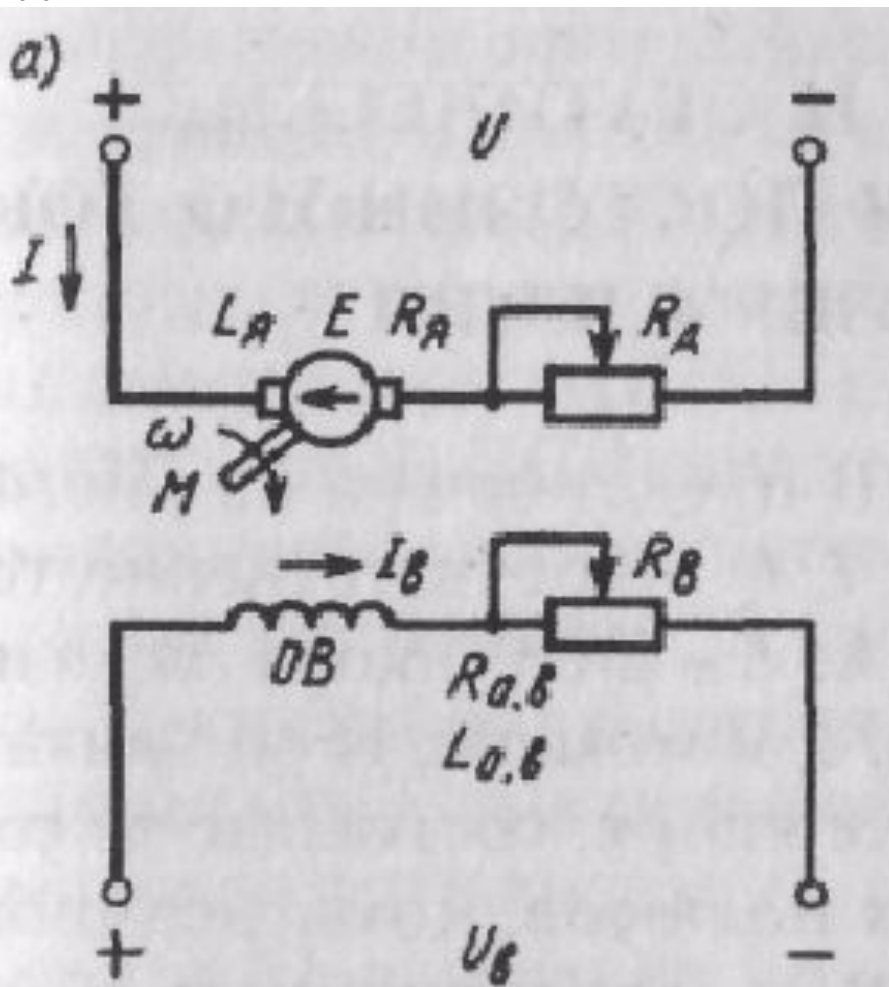
ДПТПВ



ДПТСВ

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДПТНВ. Схема включения.



1. Общепромышленная серии 2П в диапазоне мощностей от 0,13 до 200 кВт
2. Усовершенствование двигателей постоянного тока привело к разработке новой серии 4П. (110-220в, 750-3000 об/мин., $M \rightarrow 2-15000$ Н м). Трудоемкость их изготовления по сравнению с серией 2П снижена в 2,5...3 раза при уменьшении расхода меди на 25...30%.
3. Для ЭП ряда рабочих машин и механизмов выпускаются специализированные серии ДПТНВ:

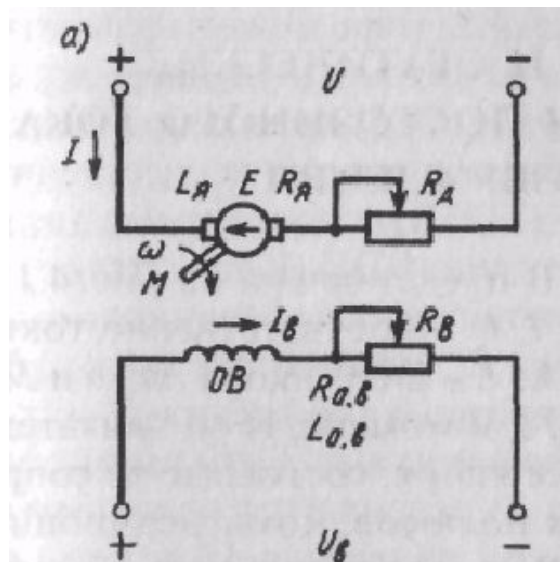
- для ЭП металлорежущих станков помимо серий 2П и 4П применяются двигатели серий ПБСТ и ПГТ, а также высокомоментные двигатели серий ПБВ, ДК1 и ДК2 с возбуждением от постоянных магнитов.

- для крановых механизмов выпускаются двигатели серии Д с независимым и последовательным возбуждением, исполнение которых максимально учитывает условия их работы и предъявляемые к ним требования.

- для краново-металлургических ЭП применяются также двигатели с независимым, последовательным и смешанным возбуждением серий ДП.

- специализированные серии ДПТ выпускаются и для металлургического производства (например, прокатные двигатели серий НП и ПП), текстильной промышленности и ряда других отраслей народного хозяйства.

Основные соотношения



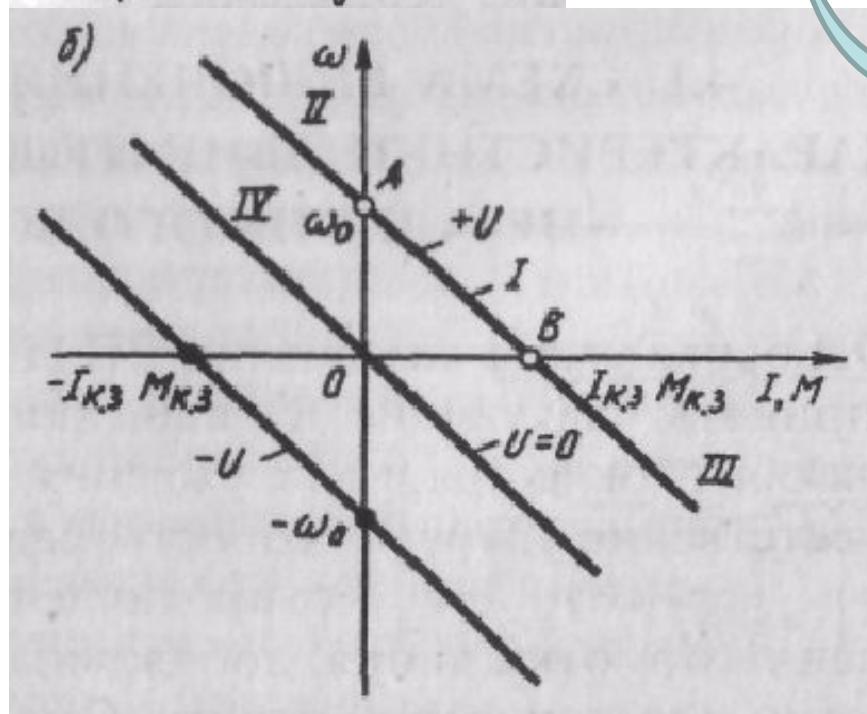
$$R_{\text{я}} = r_{\text{о.я}} + r_{\text{д.п}} + r_{\text{к.о}} + r_{\text{щ}}$$

Обмотка якоря Добавочные полюса Компенсационная обмотка Щеточный контакт

$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I,$$

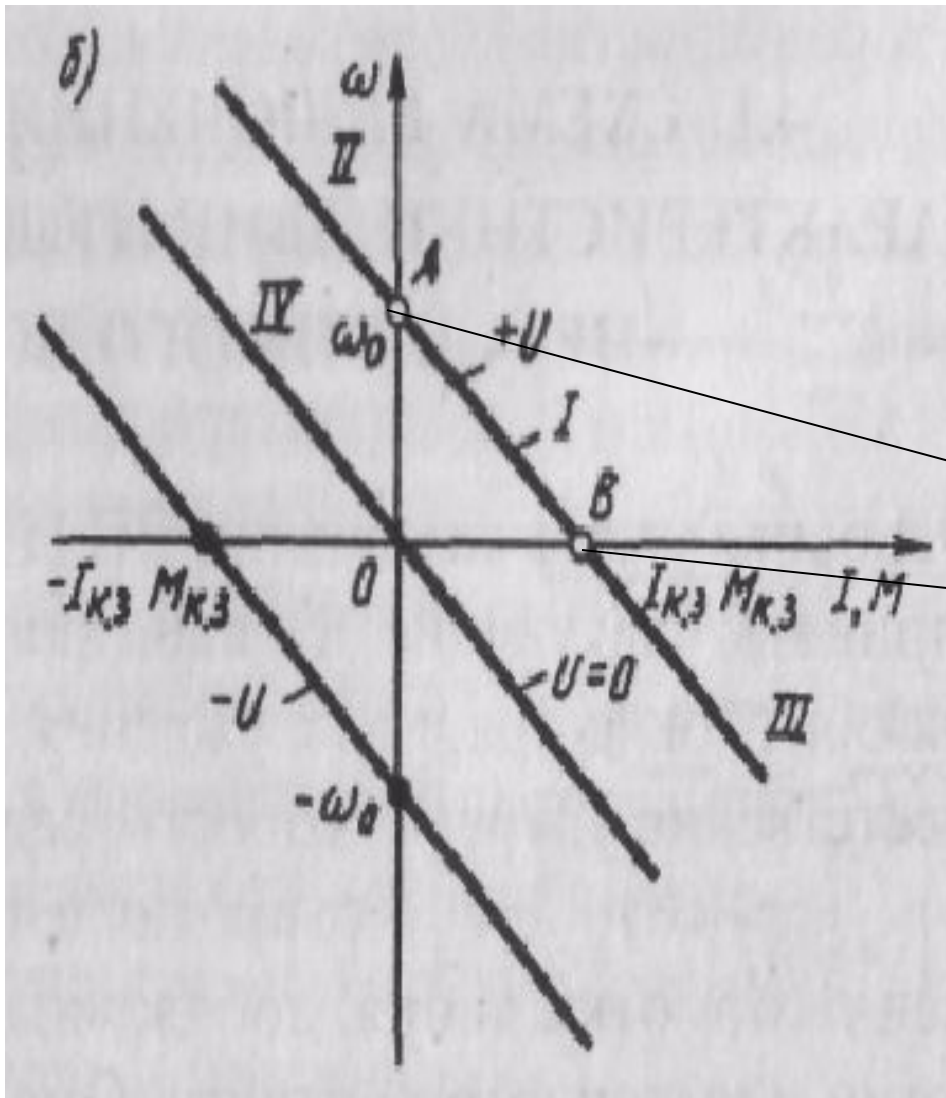


$$\omega = (U - IR) / (k\Phi).$$

$$\omega = U/k\Phi - IR/k\Phi$$

$$\omega = U/k\Phi - MR/k\Phi$$

Статические характеристики



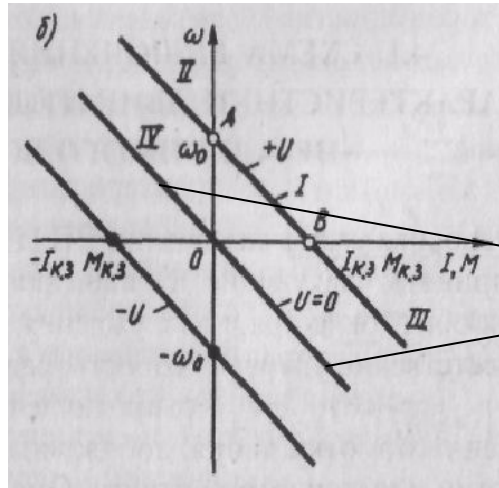
$$\omega = (U - IR) / (k\Phi).$$

$$\omega = U/k\Phi - IR/k\Phi$$

$$\omega = U/k\Phi - MR/k\Phi$$

Их характерными точками являются точка *A* холостого хода и точка *B* короткого замыкания.

Схема динамического торможения



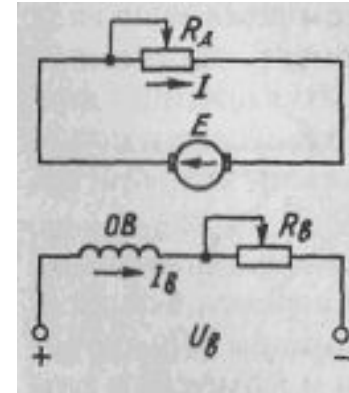
$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

$$\omega_0 = U / (k\Phi)$$

$$\Delta\omega = IR / (k\Phi) = MR / (k\Phi)^2$$

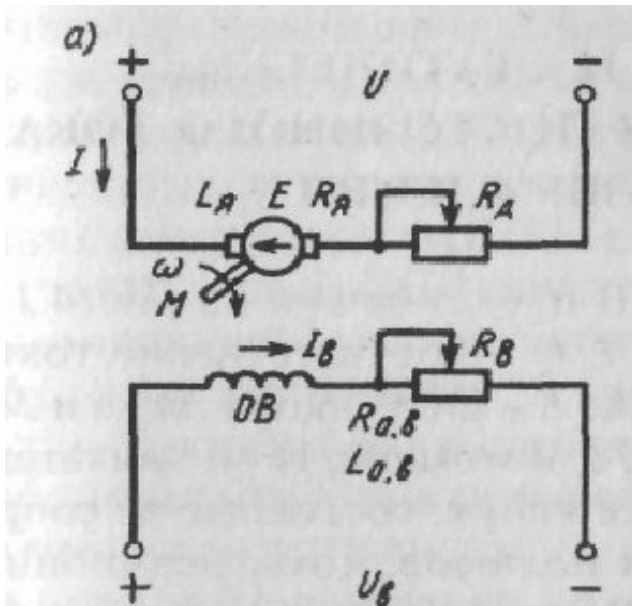
$$\omega = -IR / (k\Phi);$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2.$$



$$\omega = -IR / (k\Phi);$$

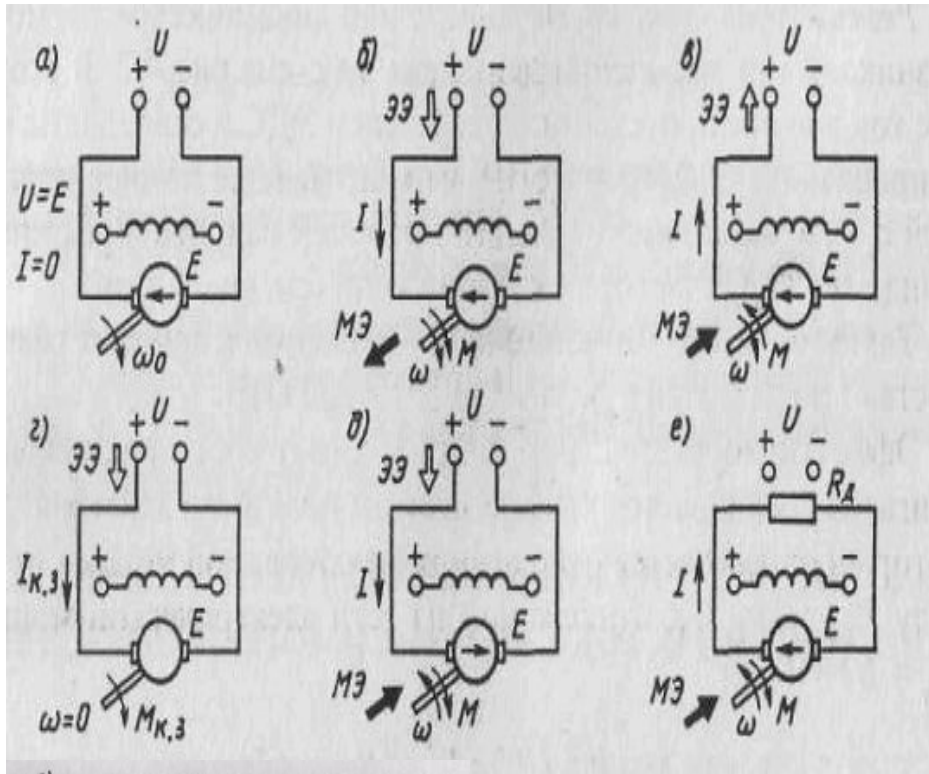
$$\omega = -MR / (k\Phi)^2.$$



Основные способы реализации искусственных характеристик ДПТНВ для регулирования координат ЭП:

- изменение сопротивления добавочного резистора в цепи якоря R_d ;
- магнитного потока Φ ;
- подводимого к якорю напряжения U .

Энергетические режимы работы ДПТНВ

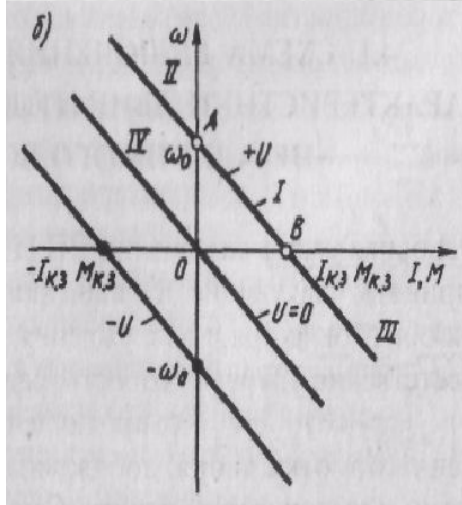


Энергетический режим работы различают исходя из взаимных направлений двух переменных - электрических (E и I) или механических (M и ω):

- при одинаковых направлениях скорости и момента и различных направлениях тока и ЭДС – двигательный режим;

- при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях тока и ЭДС – генераторный;

- **граничными** между двигательным и генераторными режимами являются режимы **холостого хода** и **короткого замыкания**. В этих режимах одна электрическая и одна механическая переменные равны нулю. При холостом ходе равны нулю ток и момент, при коротком замыкании – ЭДС и скорость.



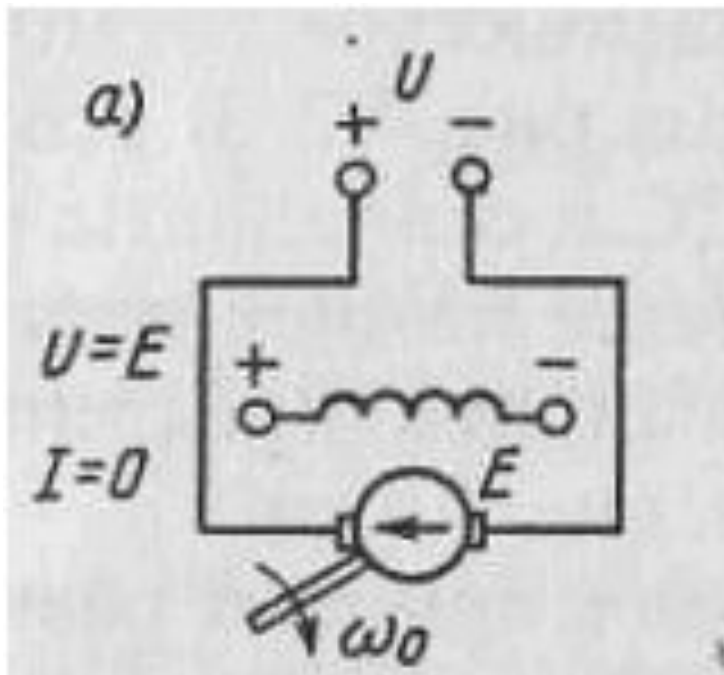
$$\eta = P_{\text{мех}} / P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} / (P_{\text{мех}} + \Delta P)$$

$$P_{\text{мех}} = M\omega$$

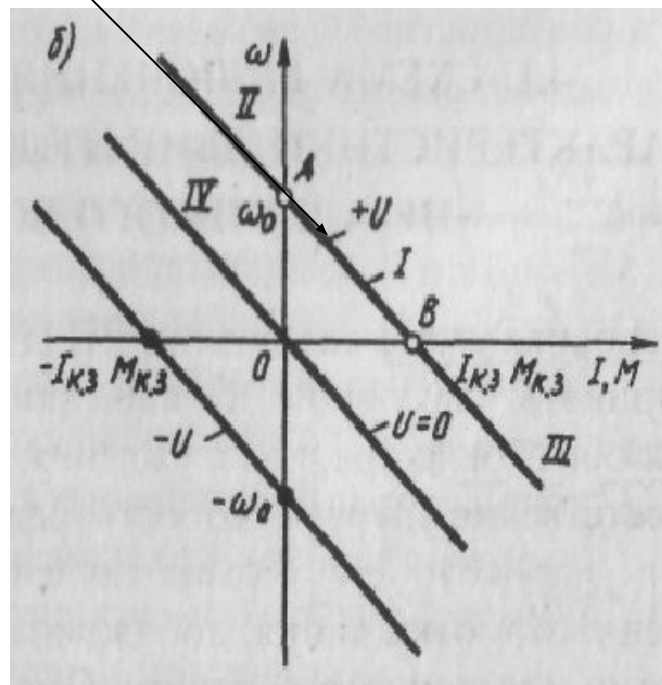
$$P_{\text{эл}} = UI + U_{\text{в}} I_{\text{в}}$$

Режим холостого хода

$$I = 0, E = U = k \Phi \omega, M = 0, \omega = \omega_0$$



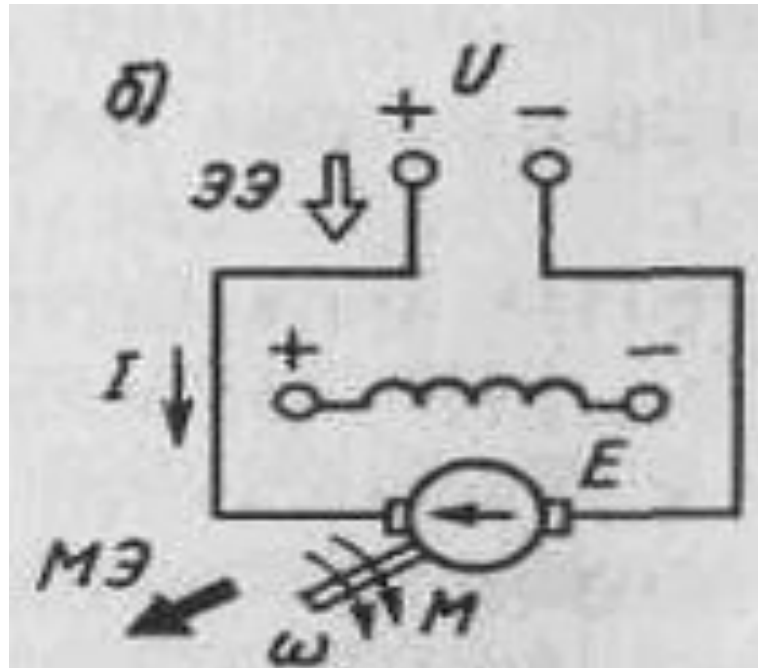
Холостой ход



Двигатель не получает энергии ни из электрической сети (за исключением электроэнергии на возбуждение), ни с вала. В этом режиме $I = 0, E = U = k\Phi\omega_0, M = 0, \omega = \omega_0$

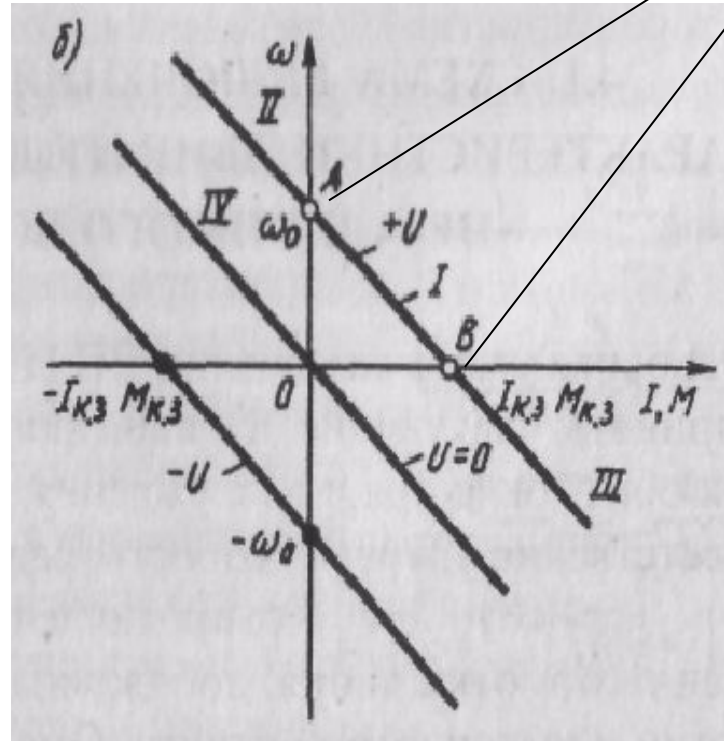
Двигательный режим

$$E < U, 0 < \omega < \omega_0$$



при одинаковых направлениях скорости и момента и различных направлениях тока и ЭДС – двигательный режим

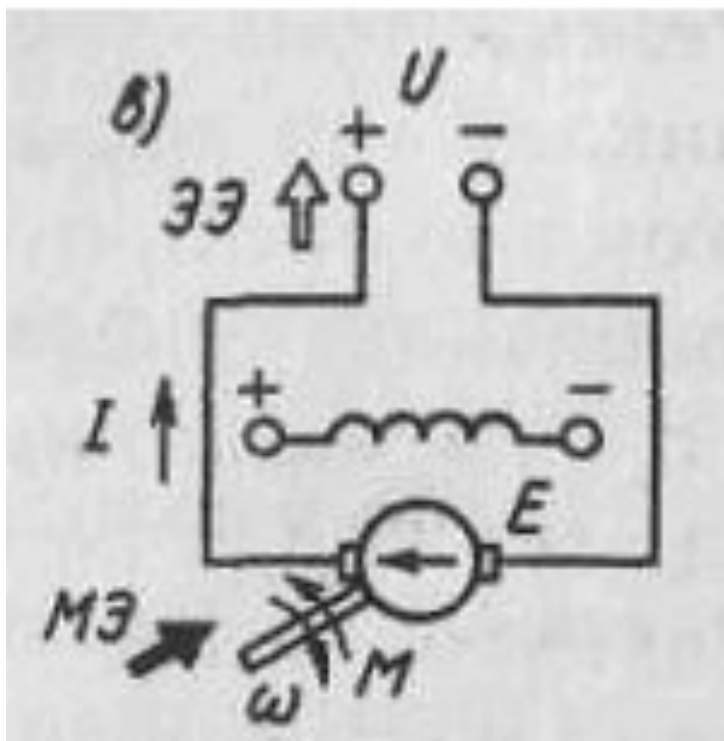
Диапазон
двигательного
режима



ω и M совпадают по направлению. В этом режиме $E < U$, ток $I = (U-E)/R$ совпадает по направлению с напряжением U и не совпадает с ЭДС, электрическая энергия (ЭЭ) поступает из сети, а механическая энергия (МЭ) с вала двигателя передается исполнительному органу

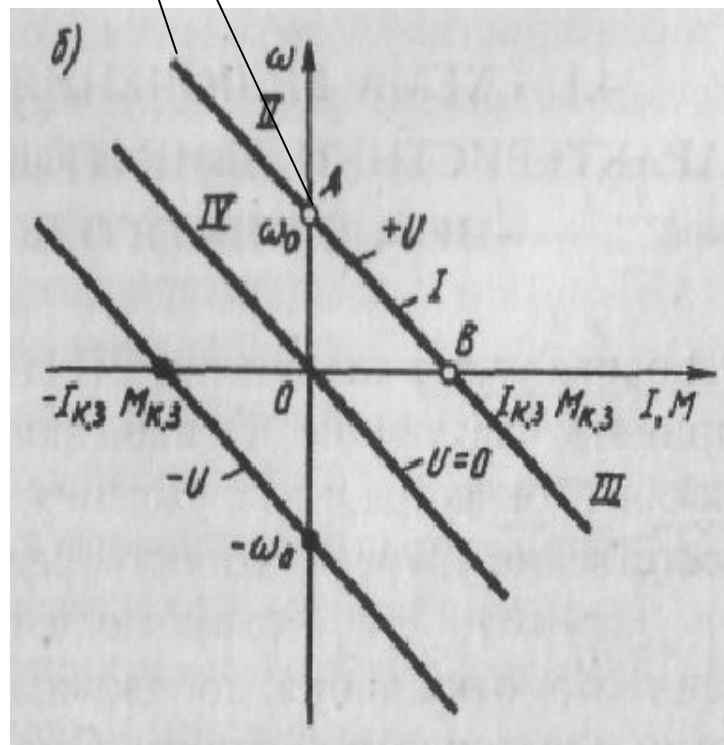
Генераторный режим

$$E > U, \omega > \omega_0$$



при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях тока и ЭДС – генераторный

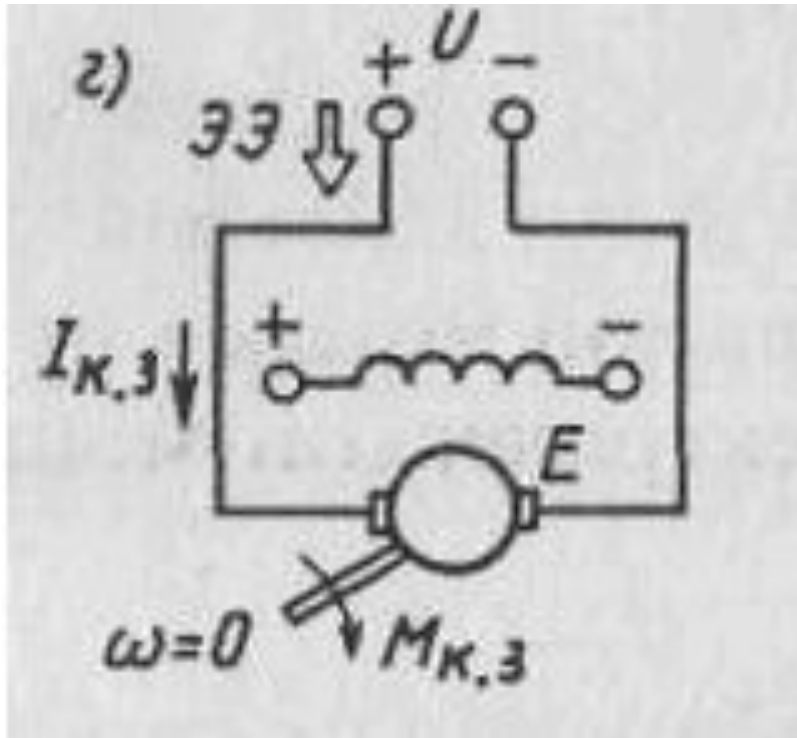
Генераторный режим



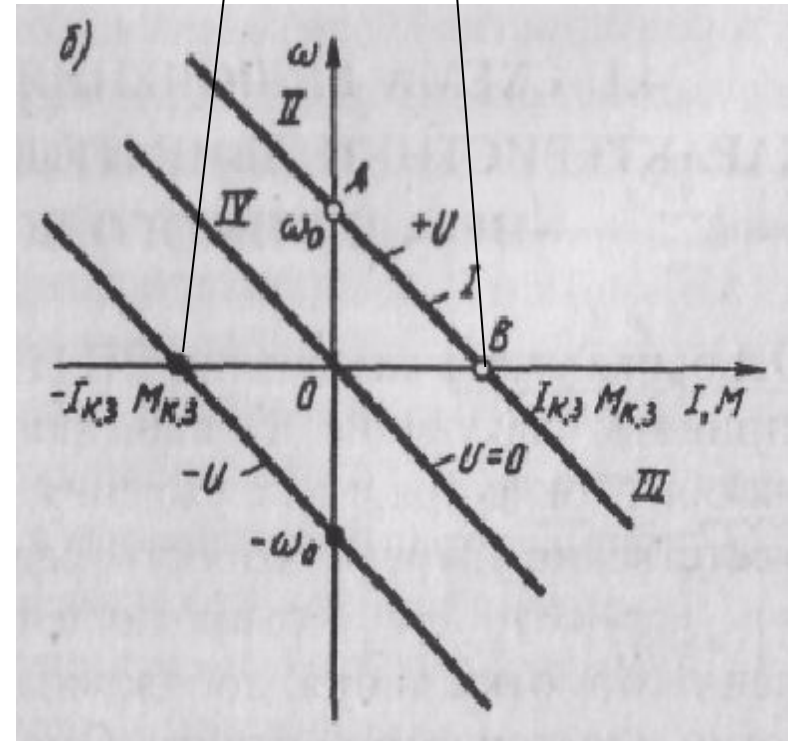
Генераторный режим работы параллельно с сетью или торможение с рекуперацией энергии в сеть. На этом участке $\omega > \omega_0$, поэтому ЭДС больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные. Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее (рекуперирует) в виде электроэнергии в сеть.

Режим короткого замыкания

$$E=0, \omega = 0, I = I_{кз} = U/R$$



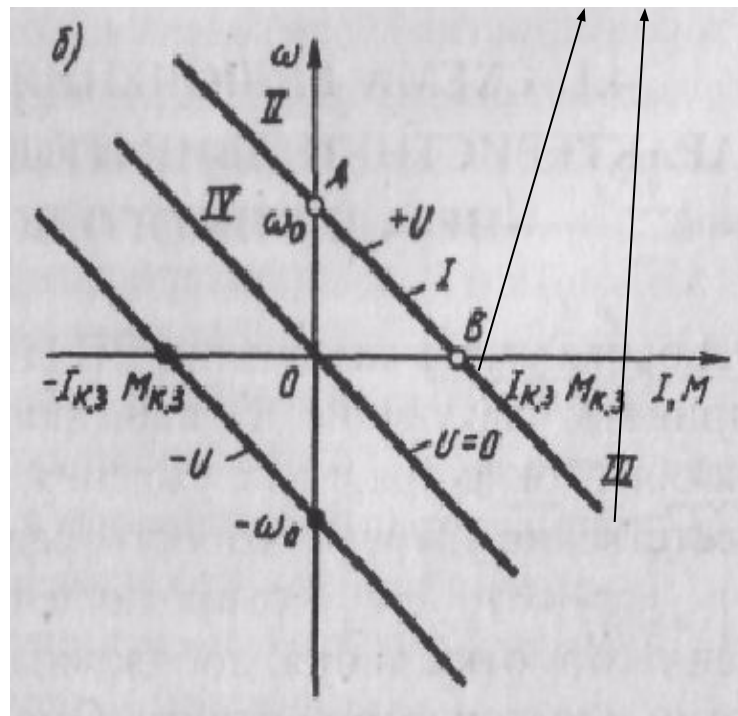
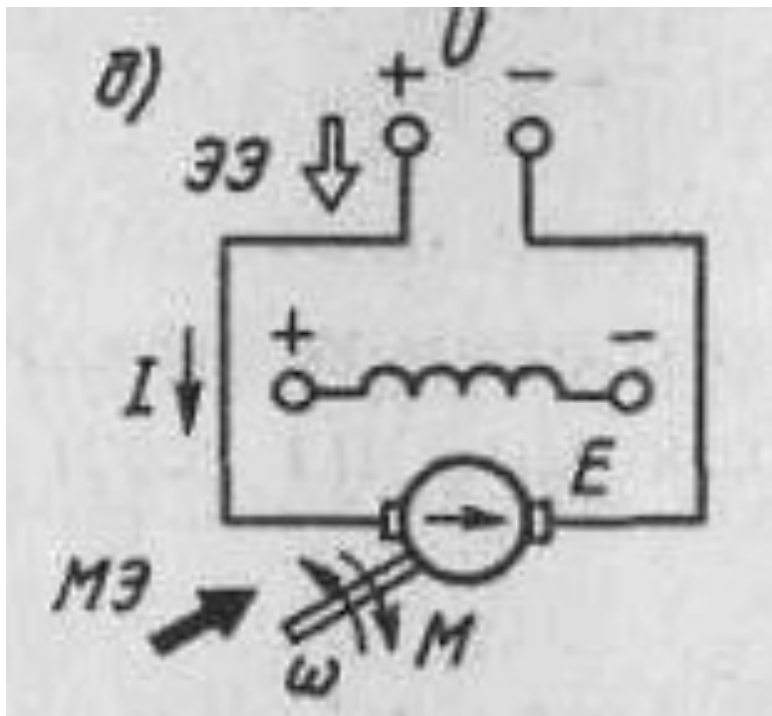
Режим короткого замыкания



Режим короткого замыкания возникает при $\omega = 0$ и $E = 0$. В этом режиме $I = I_{кз} = U/R$, электрическая энергия, поступившая из сети, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Механическая энергия с вала ДПТ не отдается, так как $\omega = 0$.

Торможение противовключением

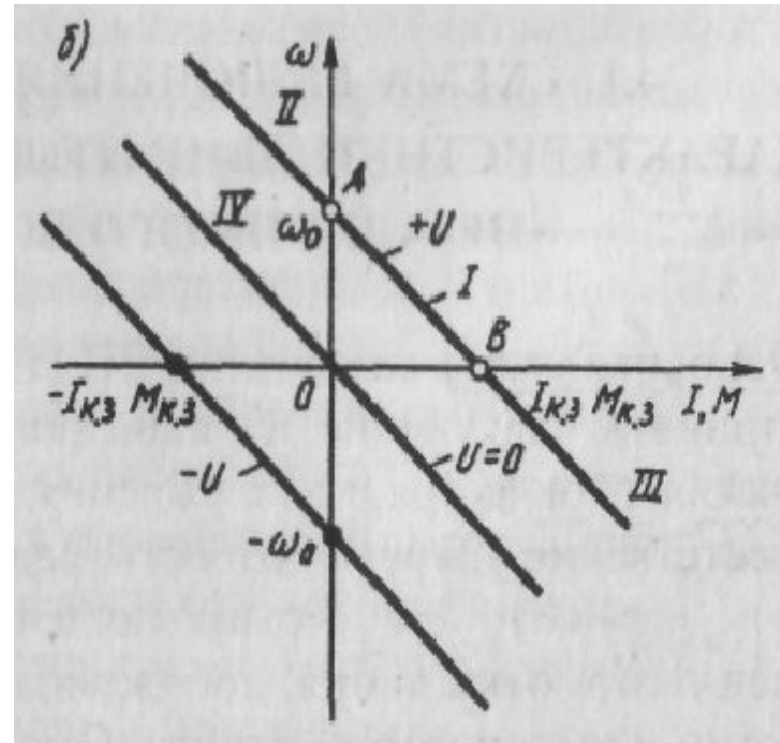
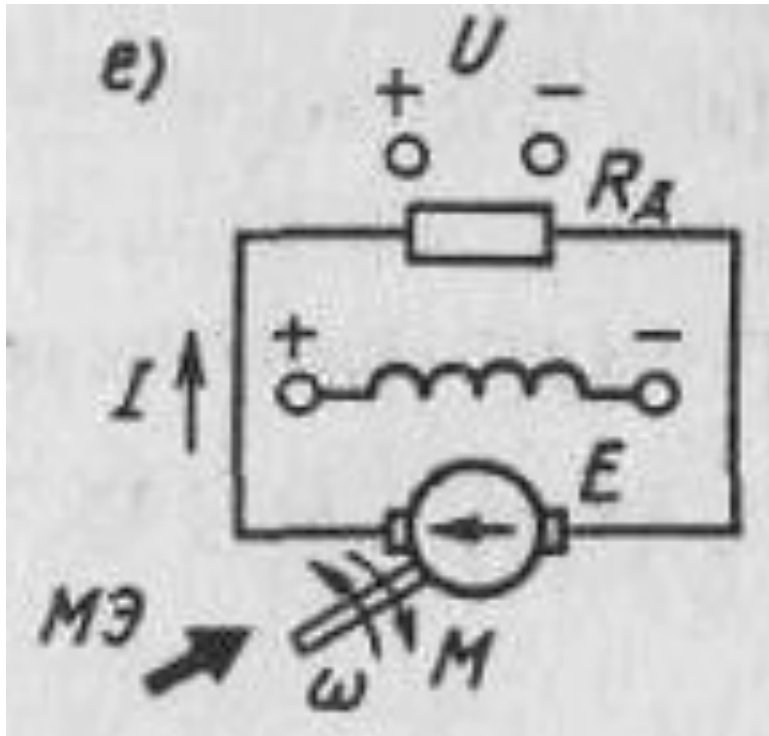
$$\omega < 0, I = (E+U)/R$$



Режим торможения
противовключением

Режим генератора при его последовательном соединении с сетью или торможение противовключением наступает при $\omega < 0$. За счет изменения направления скорости, ЭДС также меняет свою полярность. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется их суммарным действием, т.е. $I = (U + E)/R$. В результате электроэнергия, поступающая из сети и вырабатываемая самим двигателем за счет механической энергии рабочей машины, рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря

Динамическое торможение



Режим автономного генератора или динамическое торможение возникает при включении двигателя по данной схеме. В этом случае ток в якоре протекает под действием ЭДС и совпадает с ней по направлению.

Электроэнергия вырабатывается за счет поступающей с вала механической энергии рабочей машины и рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи.

Основные показатели регулирования электроприводов

1. Диапазон регулирования угловой скорости.

Обычно диапазон регулирования выражается в числах в виде отношения, например: 2:1, 4:1, 10 :1, 20 : 1 и т. д. Современные системы автоматического регулирования электроприводов с обратными связями позволяют существенно расширить диапазон регулирования скорости.

Регулировочный диапазон (диапазон регулирования, глубина регулирования) – это специальная величина, характеризующая минимальную частоту вращения вала электродвигателя, на которой не будет наблюдаться пульсаций частоты вращения ротора. Например, если диапазон регулирования 1:1000, то это означает, что для двигателя с номинальной частотой вращения 3000 об/мин при настройке контуров управления будет реализована минимальная частота вращения в 3 об/мин без пульсаций частоты вращения (без «дрожания» вала по частоте вращения). Также это значит, что при реализованной минимальной частоте вращения будет реализован номинальный момент на валу электродвигателя. Следует также отметить, что достижение еще более низких скоростей также возможно, однако в таком случае на валу двигателя будут наблюдаться пульсации скорости и момента. Еще одним важным положительным фактором цифрового управления является тот факт, что при его использовании возможна реализация нулевой частоты вращения с сохранением номинального момента на валу, что немаловажно для большинства современного оборудования.

2. Плавность регулирования характеризует скачок скорости при переходе от данной скорости к ближайшей возможной.

$$\varphi_{пл} = \omega_i / \omega_{i-1},$$

3. Экономичность регулирования характеризуется затратами на сооружение и эксплуатацию электропривода.

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P)$$

При работе двигателя на разных угловых скоростях следует подсчитывать так называемый средневзвешенный КПД за регулировочный цикл, состоящий из m ступеней, по выражению

$$\eta_p = \sum_1^m P_{2q} t_q / \sum_1^m (P_{2q} + \Delta P_q) t_q$$

P_{2q} и ΔP_q — полезная мощность и потери на q -й ступени

t_q — время, в течение которого двигатель работает на q -й ступени

$$\cos \varphi = P_a / \sqrt{P_a^2 + P_p^2}$$

$$\cos \varphi_p = \sum_1^m P_{aq} t_q / \sum_1^m (\sqrt{P_{aq}^2 + P_{pq}^2}) t_q$$

4. Стабильность угловой скорости характеризуется изменением угловой скорости при заданном отклонении момента нагрузки и зависит от жесткости механической характеристики; она тем выше, чем больше жесткость характеристики

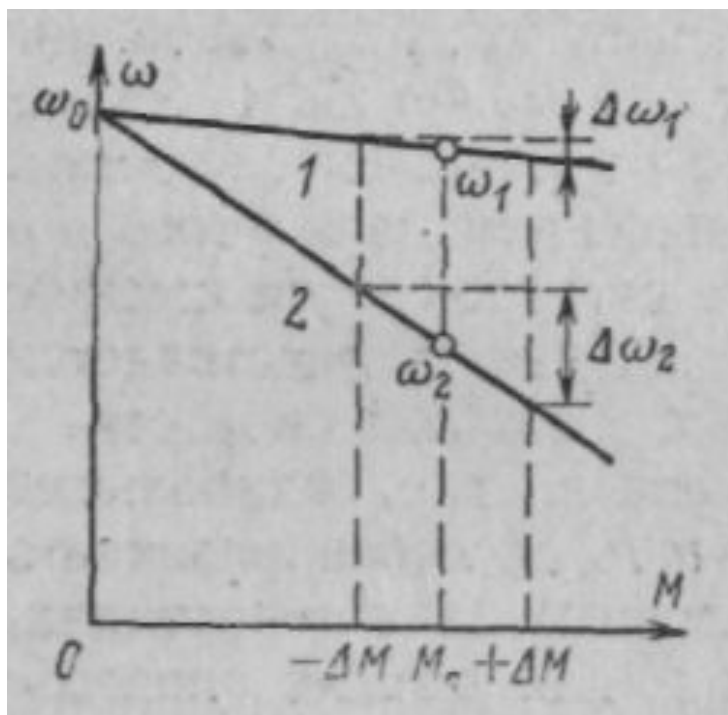


Иллюстрация изменения угловой скорости для механических характеристик различной жесткости.

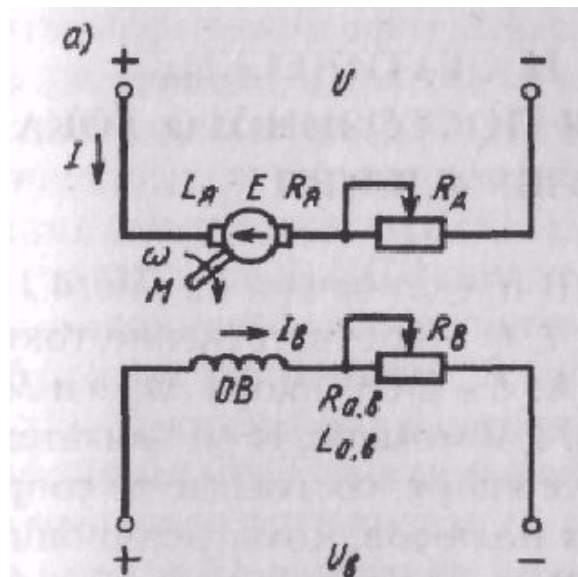
5. *Направление регулирования скорости*, т. е. уменьшение или увеличение ее по отношению к основной скорости, зависит от способов регулирования.

При регулировании с помощью резисторов в цепи якоря двигателя постоянного тока или в цепи ротора асинхронного двигателя угловая скорость в двигательном режиме при данной нагрузке по мере увеличения сопротивления резисторов уменьшается. Это означает, что регулирование изменением сопротивления резисторов может быть осуществлено только вниз по отношению к основной скорости.

Напротив, регулирование уменьшением магнитного потока ведет в пределах нормальных нагрузок к увеличению угловой скорости, т. е. в этом случае осуществляется однозонное регулирование вверх от основной скорости.

6. *Допустимая нагрузка двигателя*, т. е. наибольшее значение момента, который двигатель способен развивать длительно при работе на регулировочных характеристиках, определяется нагревом двигателя и для разных способов регулирования будет различной.

Регулирование скорости ДПТНВ с помощью резисторов в цепи якоря



$$\omega = (U - IR) / (k\Phi).$$

$$\omega = U / (k\Phi) - MR_d / (k\Phi)^2.$$

$$\omega = -IR / (k\Phi);$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2.$$

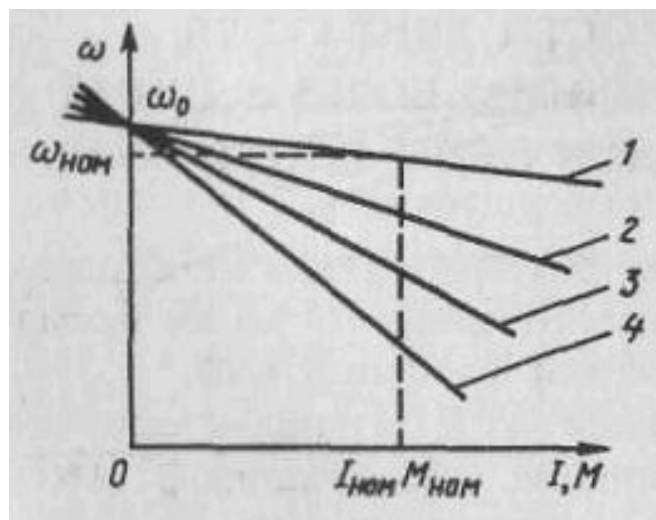
$$\omega = U/k\Phi - IR/k\Phi$$

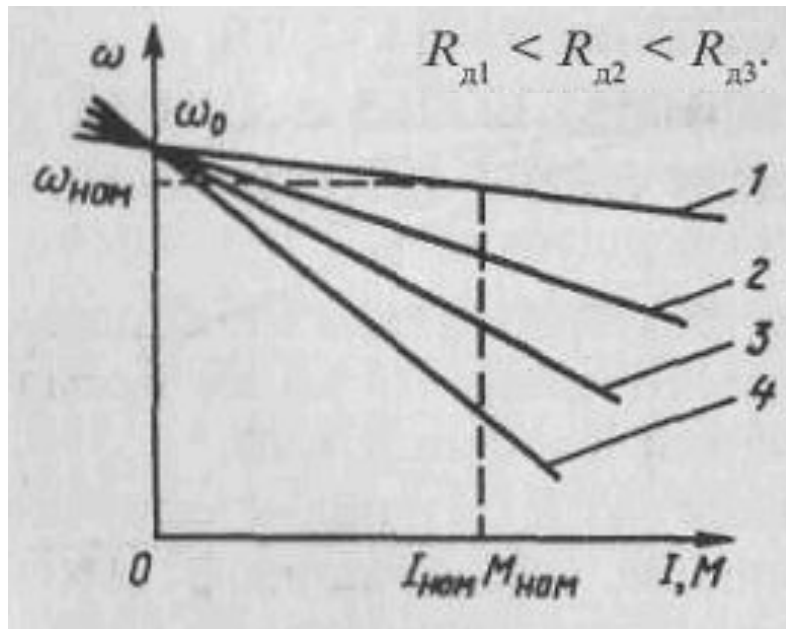
Диапазон регулирования небольшой – 2 ... 3, из-за снижения жесткости по мере увеличения R_d .

Направление скорости регулирования – вниз от естественной характеристики.

Плавность регулирования определяется характером изменения R_d . Используется либо плавное, либо ступенчатое изменение сопротивления. Чаще применяется ступенчатое изменение R_d .

Стабильность снижается по мере увеличения диапазона регулирования, так как уменьшается жесткость.





$$P_1 = P_{эл} = UI \longrightarrow \text{Мощность потребляемая из сети}$$

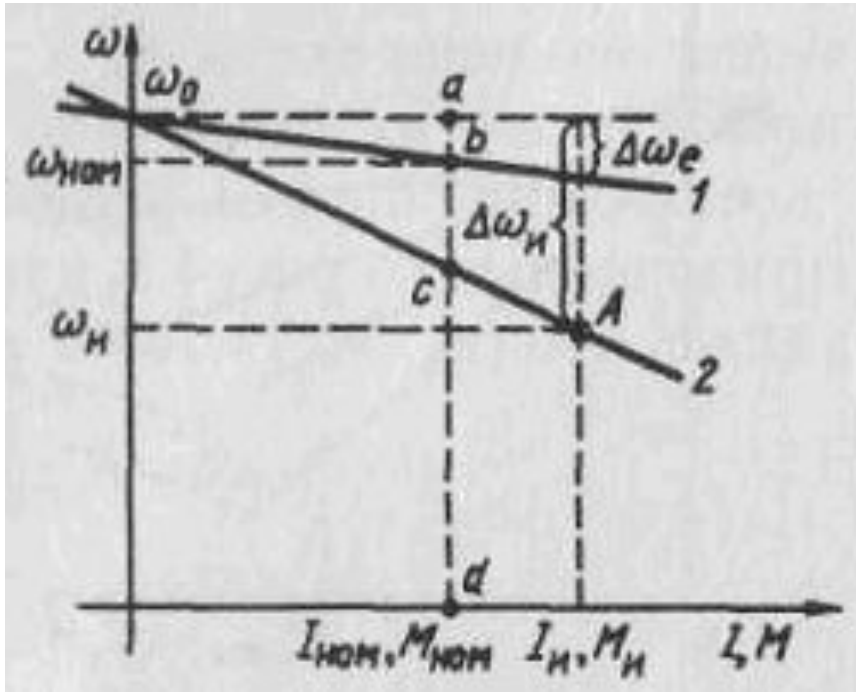
$$P_2 = P_{мех} = M \omega \longrightarrow \text{Полезная мощность на валу}$$

$$\Delta P_{я} = UI - M\omega = k\Phi\omega_0 I - k\Phi I\omega = k\Phi\omega_0 I(\omega_0 - \omega)/\omega_0 = P_1 \delta$$

$$\delta = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 = \Delta\omega/\omega_0 \longrightarrow \text{Относительный перепад скорости}$$

$$M_{доп} = k\Phi_{ном} I_{ном} = M_{ном}$$

Расчет регулировочных сопротивлений в цепи якоря



$$R_d = ?$$

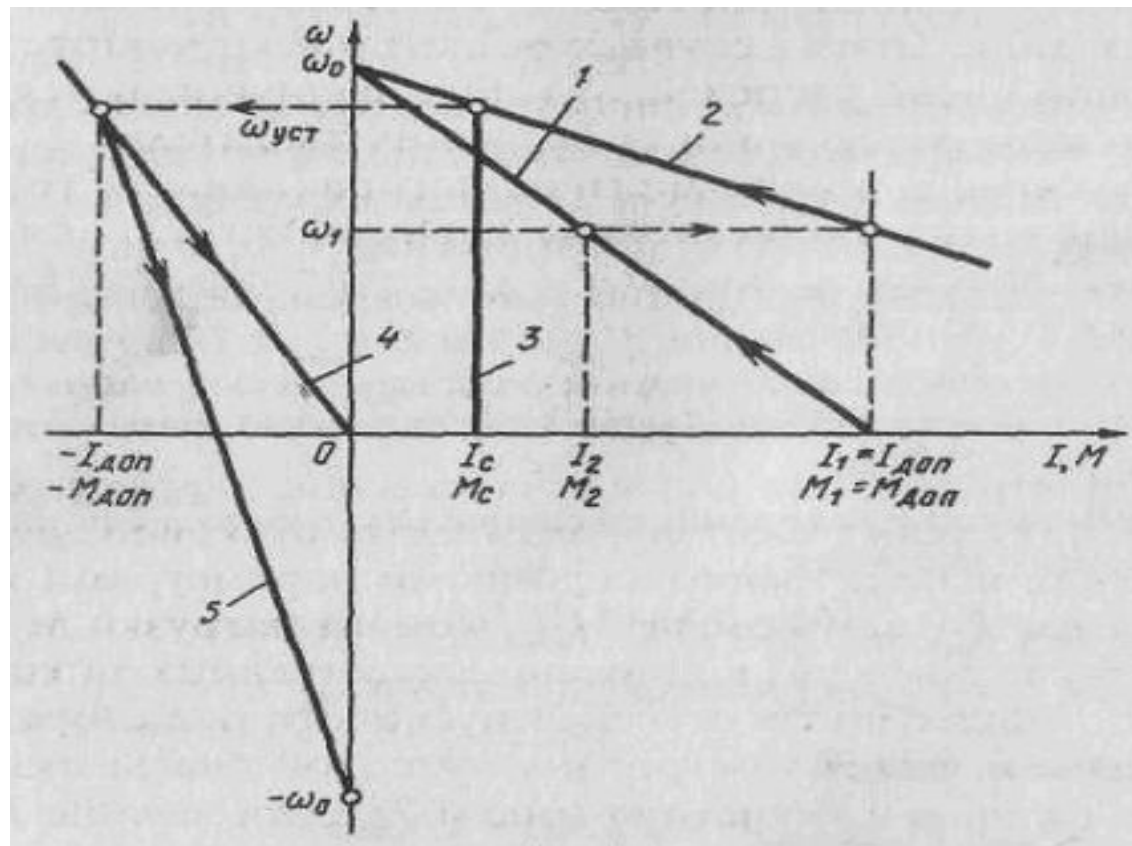
Метод пропорций -

$$\Delta\omega = IR / (k\Phi) = MR / (k\Phi)^2$$

$$\Delta\omega_e / \Delta\omega_n = I_n R_{я} / (I_n (R_{я} + R_d)) = R_{я} / (R_{я} + R_d)$$

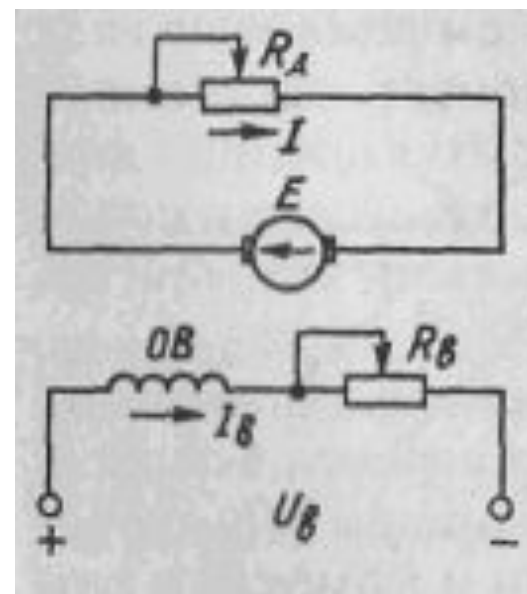
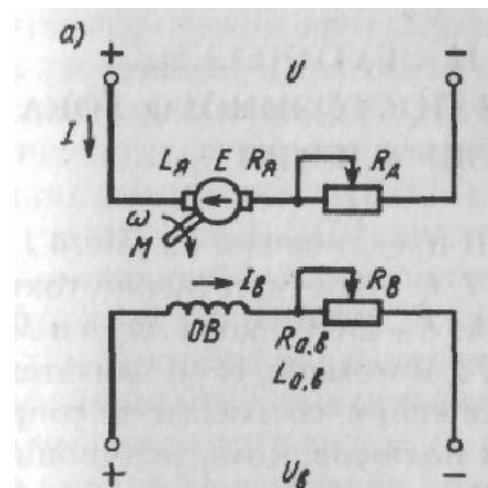
$$R_d = R_{я} (\Delta\omega_n / \Delta\omega_e - 1)$$

Регулирование тока и момента при пуске, торможении и реверсе ДПТНВ

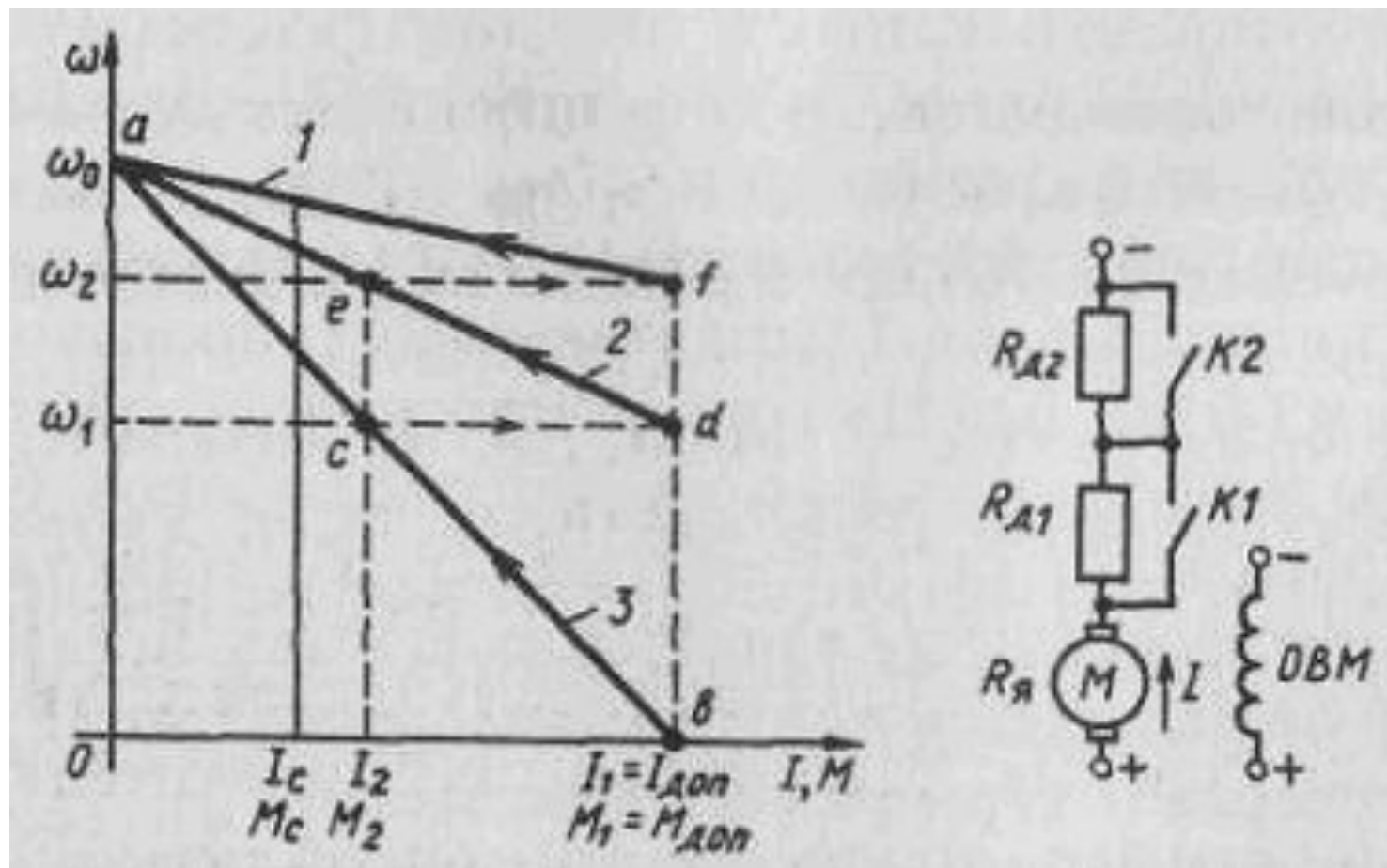


Пуск (характеристики 1, 2)
 Динамическое торможение (характеристика 4)
 Реверс и торможение противовключением
 (характеристика 5)

$$m = \lg(I_2/I_1) / \lg(I_1 R_a / U)$$

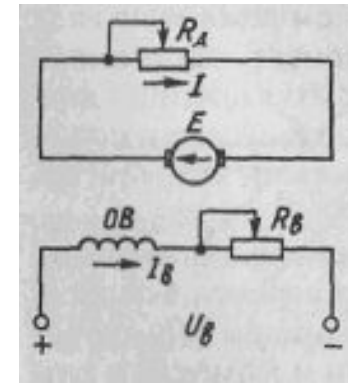
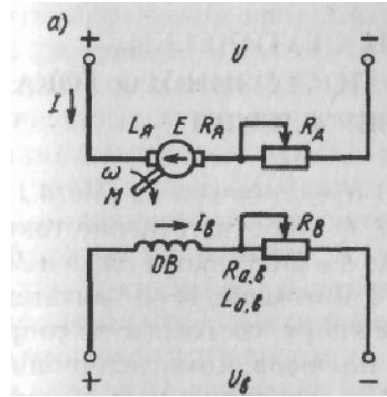
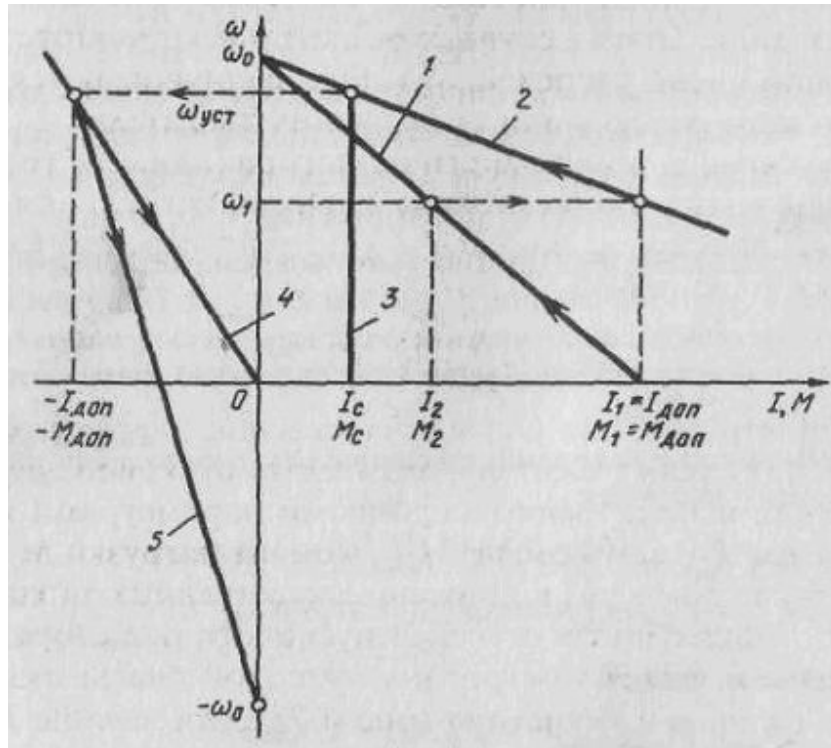


Порядок построения пусковых диаграмм



$$I_2 = (1,1 \dots 1,2) I_c$$

Динамическое торможение и торможение противовключением



Сопротивление добавочного резистора в одну ступень

$$R_d = U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}$$

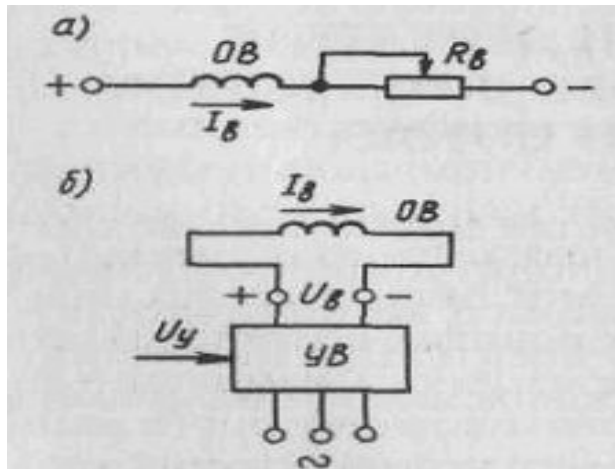
Сопротивление добавочного резистора при динамическом торможении

$$R_d = E/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}$$

Сопротивление добавочного резистора при реверсе или торможении

$$R_d = (U + E)/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx 2U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}$$

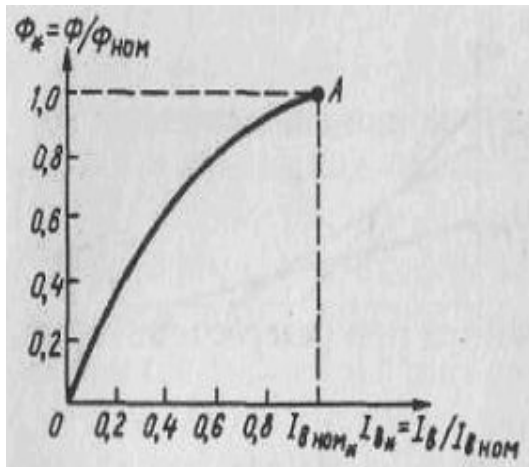
Регулирование скорости ДВПТНВ изменением магнитного потока



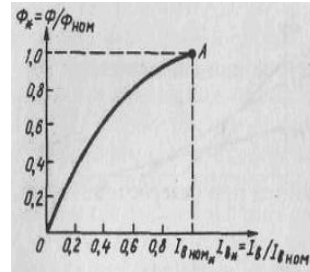
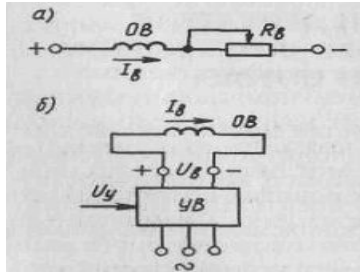
Регулирование тока в цепи возбуждения может осуществляться или с помощью добавочного резистора R_B или изменением напряжения питания обмотки возбуждения, например с помощью управляемого выпрямителя $УВ$, выходное напряжение которого U_B регулируется по сигналу управления U_y .

Вторая схема применяется для регулирования в широких пределах тока возбуждений мощных двигателей, работающих в замкнутых структурах ЭП. При использовании в ней реверсивных управляемых выпрямителей обеспечивается также изменение направления тока возбуждения.

- **Магнитный поток** при регулировании скорости **обычно уменьшают по сравнению с номинальным** (точка А на кривой намагничивания, см. рис.) за счет снижения тока возбуждения, так как его увеличение выше номинального вызывает дополнительный нагрев обмотки возбуждения.
- Кроме того, **двигатели рассчитываются и конструируются таким образом, что бы его магнитная система была близка к насыщению**, поэтому увеличение тока возбуждения не приводит к заметному увеличению магнитного потока.



Регулирование скорости ДВПТНВ изменением магнитного потока (продолжение)



$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I,$$

$$\omega = U/k\Phi - IR/k\Phi$$

$$\omega = U/(k\Phi) - MR_d/(k\Phi)^2.$$

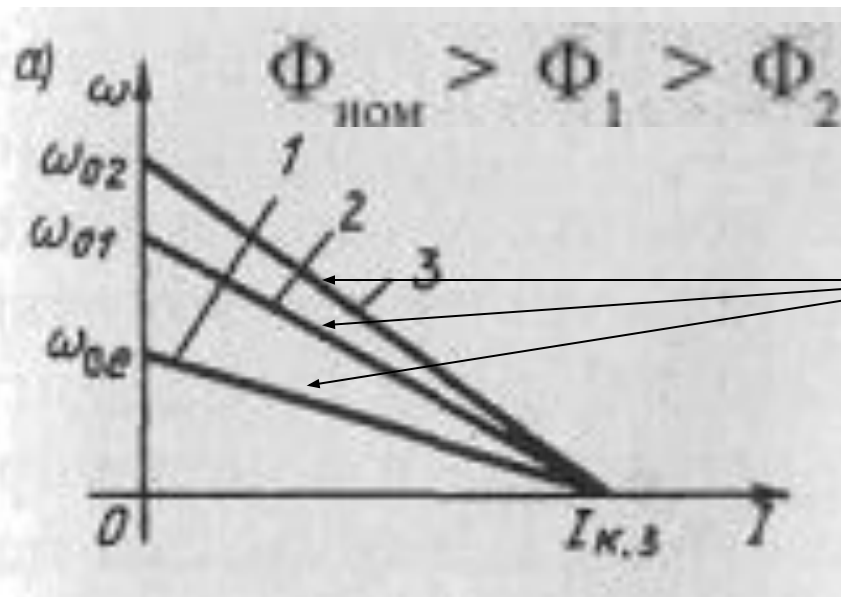
Уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости идеального холостого хода ω_0 .

Ток короткого замыкания $I_{к.з.} = U/R_{я}$, т.е. от магнитного потока не зависит и при его варьировании будет оставаться неизменным. Таким образом, электромеханические характеристики при различных значения магнитного потока $\Phi_{ном} > \Phi_1 > \Phi_2$ будут иметь вид прямых 1....3. Регулирование вверх

Показатели данного способа регулирования скорости ДПТНВ следующие:

1. диапазон регулирования 3...4;
2. направление регулирования - вверх от естественной характеристики;

3. плавность регулирования определяется плавностью регулирования тока возбуждения;
4. стабильность скорости достаточно высокая, хотя она и снижается при уменьшении магнитного потока.
5. Способ экономичен, так как регулирование скорости не сопровождается значительными потерями мощности, а реализация его не требует больших капитальных затрат.



$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I,$$

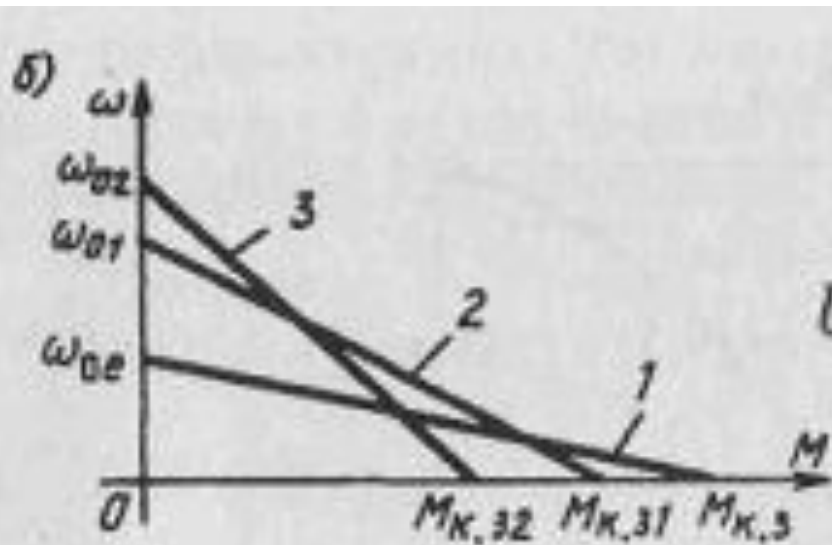
$$\omega = (U - IR) / (k\Phi).$$

$$\omega = U / (k\Phi) - MR_{\Sigma} / (k\Phi)^2.$$

$$\omega = U / k\Phi - IR / k\Phi$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad \omega_0 = U / (k\Phi)$$

$$\Delta\omega = IR / (k\Phi) = MR_{\Sigma} / (k\Phi)^2$$



$$E_c = k\Phi_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\Sigma};$$

$$E_{\text{н}} = k\Phi_{\text{н}} \omega_{\text{н}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\Sigma}.$$

$$U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\Sigma} = \text{const}, \rightarrow$$

$$E_c = E_{\text{н}}$$

$$\Phi_{\text{н}} = \Phi_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} / \omega_{\text{н}}$$

$$M_{\text{доп}} \omega_{\text{н}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} = \text{const}$$

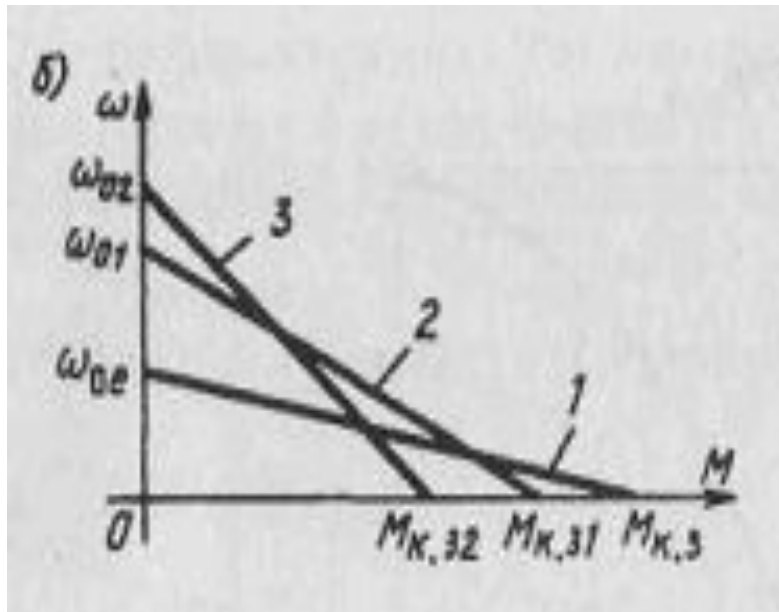
Регулирование скорости ДВПТНВ изменением магнитного потока (продолжение)

Допустимую нагрузку ДПТ при его работе на искусственных характеристиках определим, полагая

$I = I_{в.ном}$, $M_{доп} = k\Phi I_{и.ном}$, где $\Phi_{и}$ - магнитный поток на искусственной характеристике.

Так как при данном способе регулирования $\Phi_{и} < \Phi_{ном}$, то и $M_{доп} < M_{ном}$, т.е. **двигатель по условиям нагрева не может быть нагружен на искусственных характеристиках номинальным моментом**. Для определения допустимой нагрузки двигателя сделаем дополнительный расчет.

Запишем выражение для ЭДС якоря на естественной и искусственной характеристиках при номинальном токе:



$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I;$$

$$E_c = k\Phi_{ном}\omega_{ном} = U_{ном} - I_{ном}R_x;$$

$$E_{и} = k\Phi_{и}\omega_{и} = U_{ном} - I_{ном}R_x;$$

$$E_c = E_{и}$$

$$U_{ном} - I_{ном}R_x = \text{const.}$$

$$\Phi_{и} = \Phi_{ном}\omega_{ном}/\omega_{и}$$

$$M_{доп} = k\Phi_{и}I_{ном}$$

$$M_{доп}\omega_{и} = M_{ном}\omega_{ном} = P_{ном} = \text{const}$$

Как видно из приведенных выше соотношений, при работе двигателя на искусственных характеристиках он может быть нагружен на свою номинальную мощность. Объясняется это тем, что **хотя момент нагрузки при уменьшении магнитного потока снижается, но одновременно повышает скорость двигателя, а их произведение, определяющее механическую мощность, остается неизменным и равным номинальной мощности**.

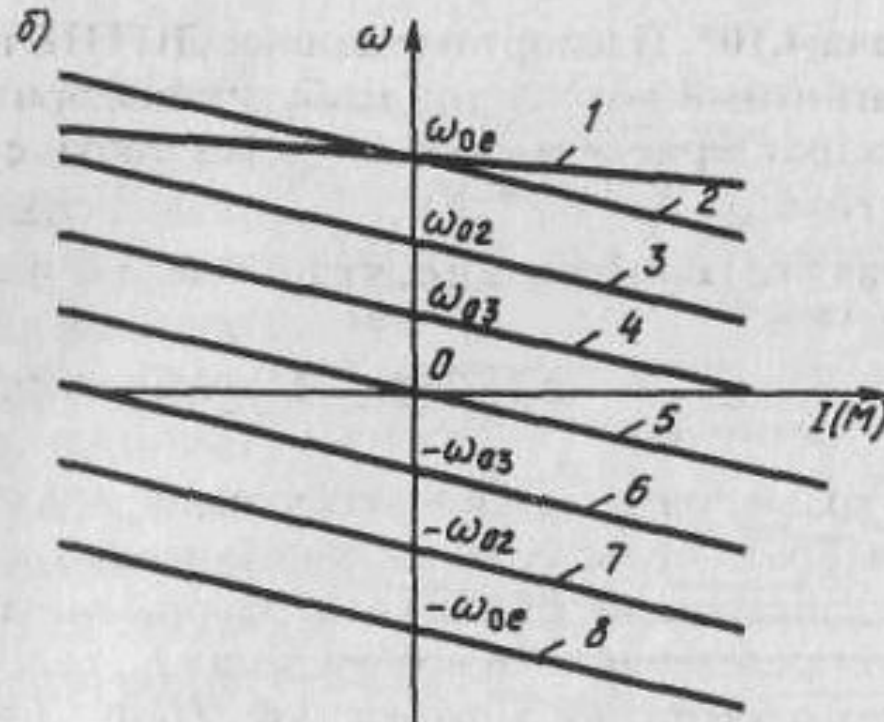
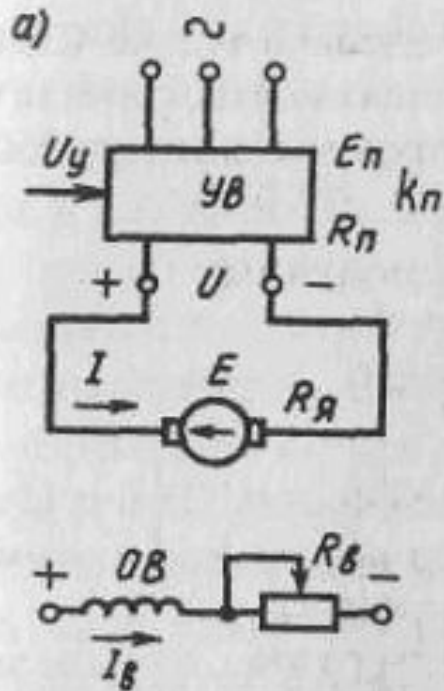
Таким образом, регулирование скорости изменением магнитного потока целесообразно при постоянной механической мощности нагрузки, что обеспечивает полное его использование при работе на всех искусственных характеристиках.

Регулирование координат в системе ДПТНВ изменением напряжения якоря. Система преобразователь двигатель

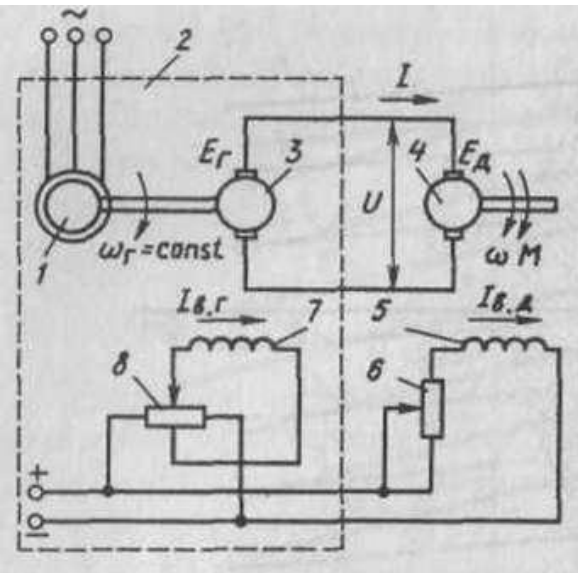
$$U = E_{\pi} - IR_{\pi} \quad \omega = (U - IR) / (k\Phi) \quad \omega = U / (k\Phi) - MR_{\pi} / (k\Phi)^2. \quad \omega = U/k\Phi - IR/k\Phi$$

$$\omega = E_{\pi} / (k\Phi) - I(R_{\text{я}} + R_{\pi}) / (k\Phi) = \omega_0 - \Delta\omega;$$

$$\omega = E_{\pi} / (k\Phi) - M(R_{\text{я}} + R_{\pi}) / (k\Phi)^2 = \omega_0 - \Delta\omega.$$

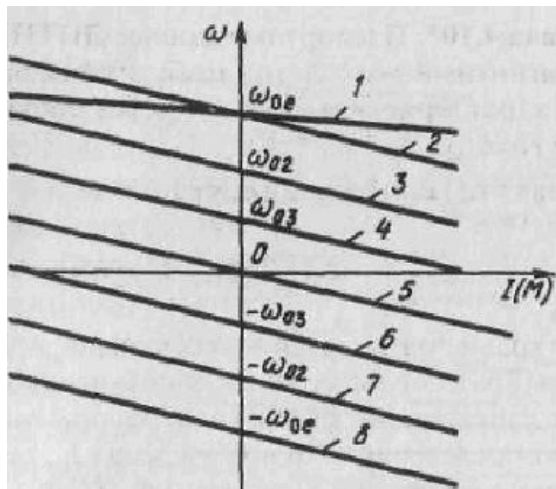


Система «генератор - двигатель»



В этой системе, схема которой показана на рисунке, якорь **4** двигателя непосредственно присоединяется к якорю **3** генератора, образующего вместе с приводным двигателем **1** электромашинный выпрямитель **2** трехфазного переменного тока в постоянный, вращающийся со скоростью ω_0 .

Регулирование напряжения на якоре двигателя происходит за счет изменения тока возбуждения генератора $I_{\text{в.г}}$ с помощью потенциометра **8**, при этом изменяется ЭДС генератора и соответственно напряжение на якоре двигателя U .



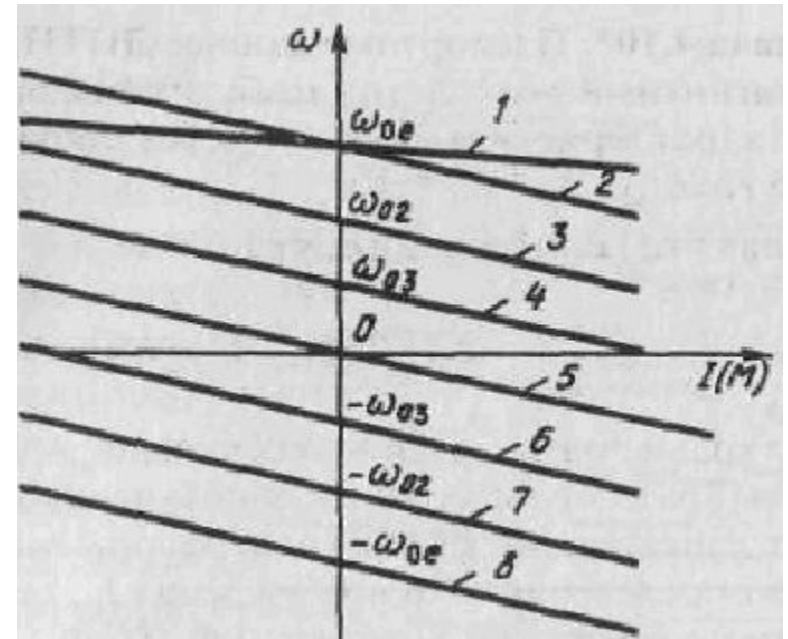
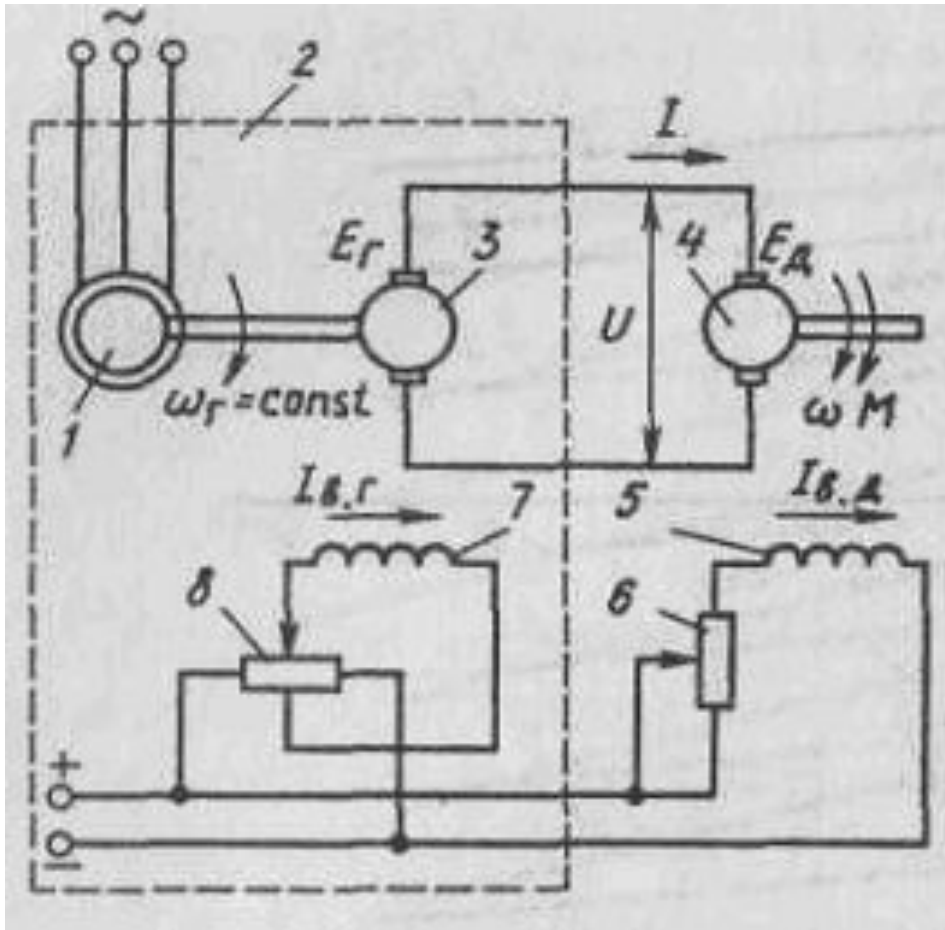
Регулирование напряжения в этой системе может сочетаться с воздействием на магнитный поток двигателя, что обеспечит двухзонное регулирование скорости.

Регулирование магнитного потока двигателя осуществляется изменением $I_{\text{в}}$ за счет включения в цепь обмотки **5** возбуждения двигателя резистора **6**.

В замкнутых ЭП питание обмотки **7** возбуждения генератора происходит от регулируемого источника постоянного тока, например полупроводникового УВ.

Характеристики системы Г - Д соответствуют приведенным на рисунке.

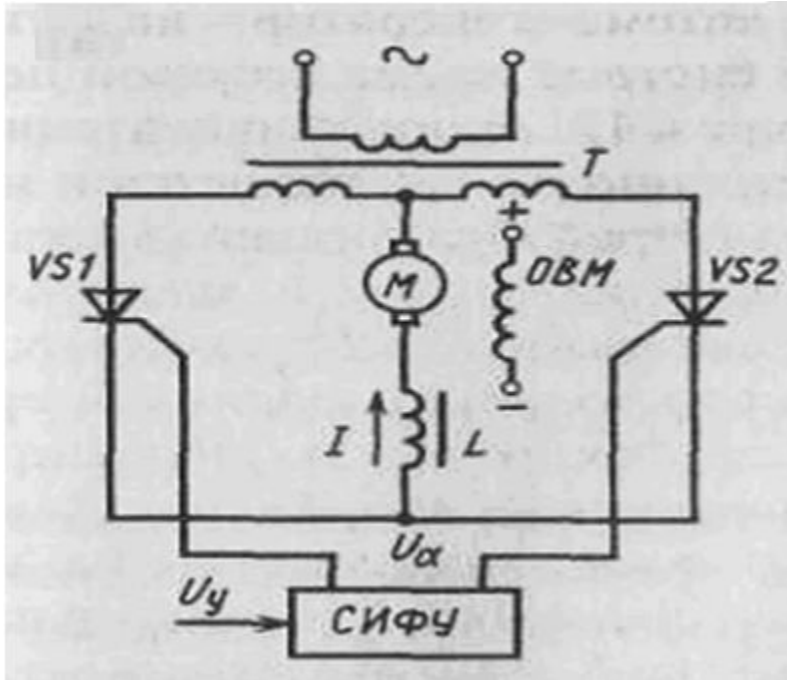
Система Г - Д



Основными достоинствами системы Г - Д являются большой диапазон и плавность регулирования скорости двигателя, высокая жесткость и линейность характеристик, возможность получения всех энергетических режимов работы, в том числе и рекуперативного торможения.

В то же время для нее характерны такие недостатки, как утроенная установленная мощность системы, низкий КПД, инерционность процесса регулирования скорости, шум при работе.

Система тиристорный преобразователь - двигатель

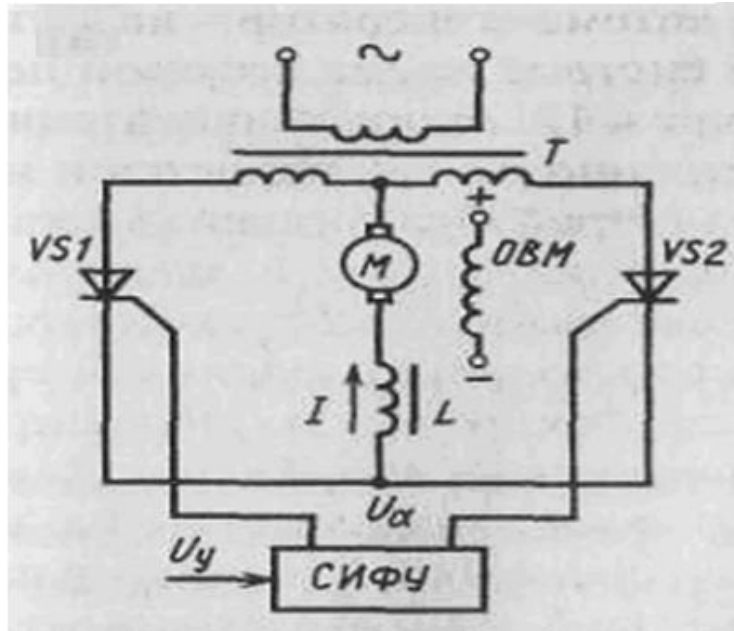


На рисунке показан однофазный двухполупериодный нереверсивный тиристорный выпрямитель, собранный по нулевой схеме.

Основным типом преобразователей, являются полупроводниковые статические преобразователи и, в первую очередь, тиристорные. Они представляют собой управляемые **реверсивные или нереверсивные выпрямители**, собранные по **нулевой или мостовой однофазной или трехфазной схемам.**

Определенные перспективы связаны с использованием в них силовых транзисторов, которые в настоящее время применяются в основном для импульсного регулирования напряжения в ЭП небольшой мощности.

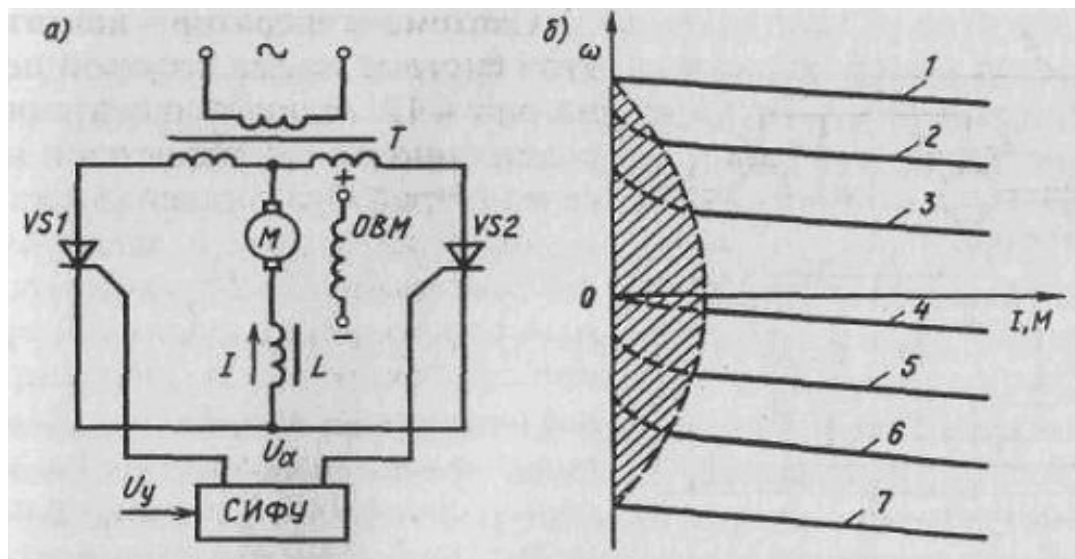
Система тиристорный преобразователь - двигатель



Согласующий трансформатор **T**, имеющий две вторичные обмотки, два тиристора **VS1** и **VS2**, сглаживающий реактор с индуктивностью **L** и систему импульсно-фазового управления СИФУ. Обмотка возбуждения двигателя OBM питается от своего источника.

Выпрямитель обеспечивает регулирование напряжения на двигателе за счет изменения среднего значения своей ЭДС E_n . Это достигается с помощью СИФУ, которая по сигналу U_y изменяет угол управления тиристорами α (угол задержки открытия тиристоров **VS1** и **VS2** относительно момента, когда потенциал на их анодах становится положительным по сравнению с потенциалом на катоде). Когда $\alpha = 0$, т.е. тиристоры **VS1** и **VS2** получают импульсы управления U_a от СИФУ в указанный момент, преобразователь осуществляет двухполупериодное выпрямление и на якорь двигателя подается полное напряжение. Если с помощью СИФУ подача импульсов управления на тиристоры **VS1** и **VS2** происходит со сдвигом (задержкой) на угол $\alpha \neq 0$, то ЭДС преобразователя снижается, а следовательно, уменьшается среднее напряжение, подводимое к двигателю.

Система тиристорный преобразователь - двигатель



$$\omega = E_n / (k\Phi) - I(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) / (k\Phi) = \omega_0 - \Delta\omega;$$

$$\omega = E_n / (k\Phi) - M(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) / (k\Phi)^2 = \omega_0 - \Delta\omega.$$

$$E_{\text{ср}} = E_{\text{max}} m \sin(\pi/m) \cos(\alpha/\pi) = E_{\text{ср0}} \cos \alpha$$

$$\omega = E_{\text{ср0}} \cos \alpha / (k\Phi) - I(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) / (k\Phi);$$

$$\omega = E_{\text{ср0}} \cos \alpha / (k\Phi) - M(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) / (k\Phi)^2,$$

Ввиду пульсирующего характера ЭДС

преобразователя ток в цепи якоря также является пульсирующим, что оказывает вредное влияние на работу двигателя.

Это приводит к ухудшению условий работы его коллектора, дополнительным потерям энергии и нагреву.

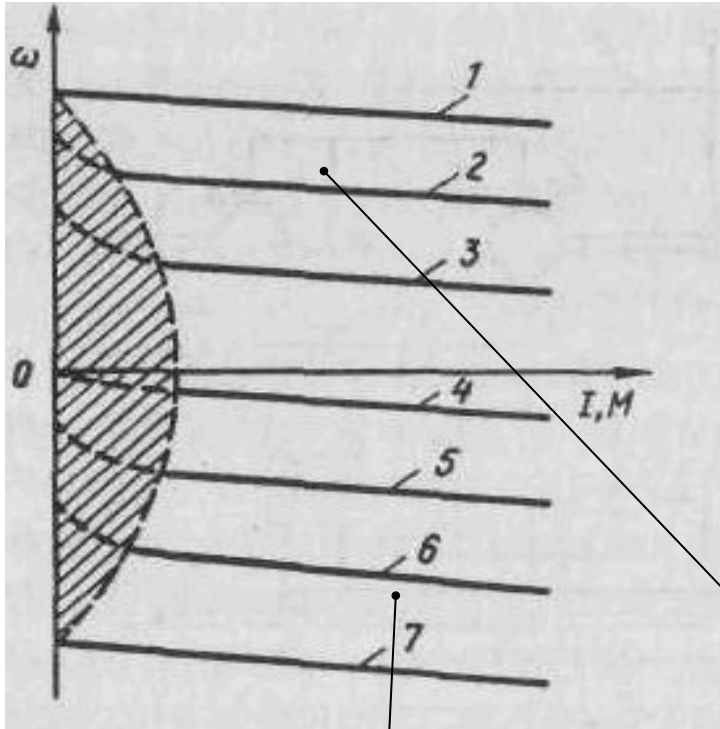
Для уменьшения вредного влияния

пульсации тока в цепь якоря обычно включается сглаживающий реактор.

Индуктивность L

выбирается в зависимости от допустимого уровня пульсации тока.

Система тиристорный преобразователь - двигатель



Особенностью характеристик двигателя при его питании от УВ является наличие области (заштрихована на рисунке), где его **характеристики нелинейны**.

В этой области двигатель работает в **режиме прерывистого тока**, что определяет **заметное изменение (уменьшение) жесткости** характеристик.

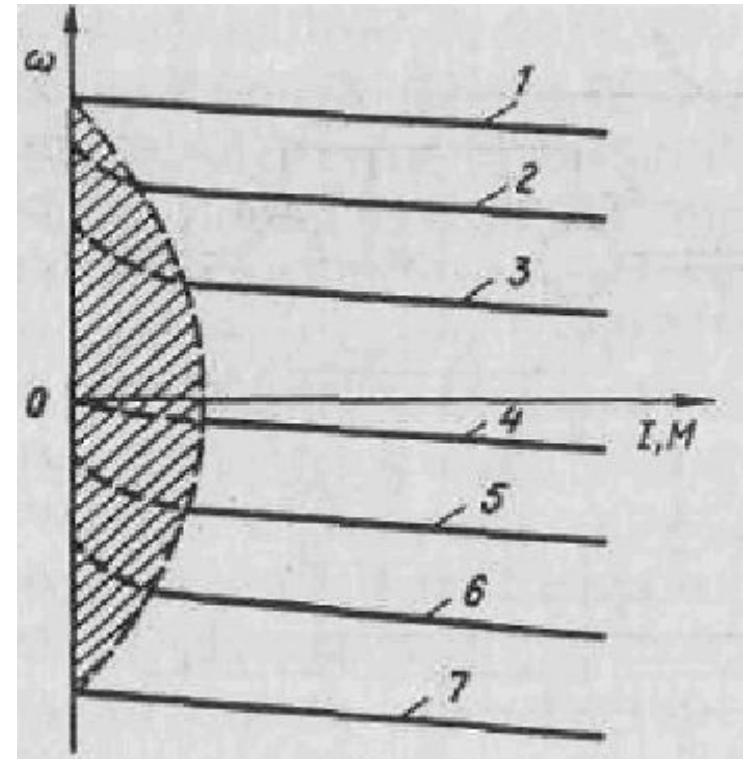
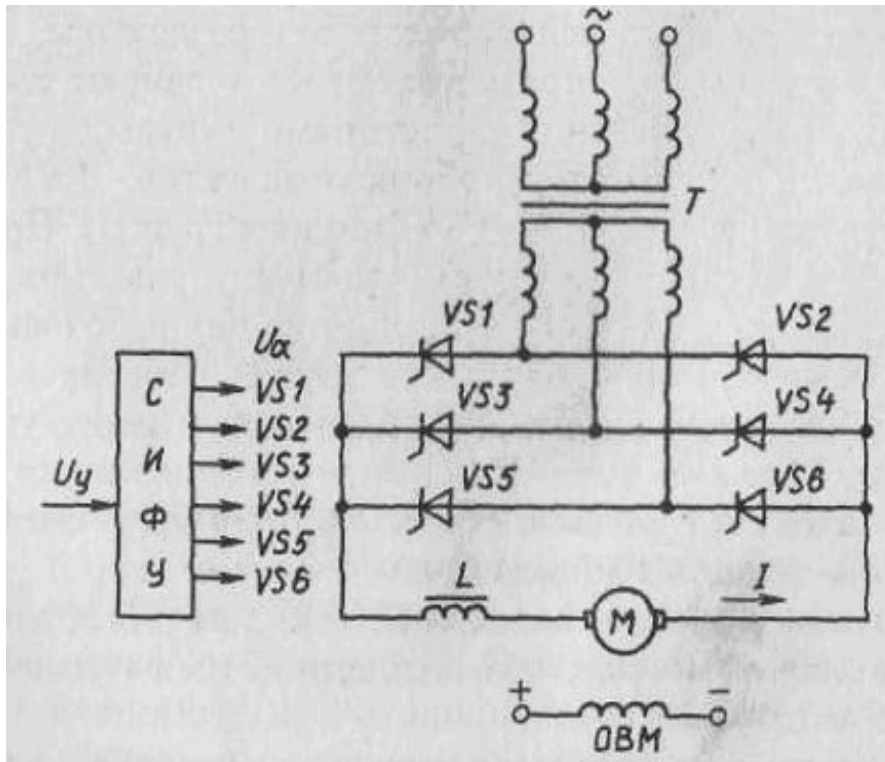
Вследствие односторонней проводимости преобразователя характеристики располагаются только в первом (1 ... 3 при $\alpha = 0; 30, 60$) и четвертом (4 ... 7 при $\alpha = 90, 120, 150, 180^\circ$) квадрантах.

Меньшим углом управления соответствует большая E_n и, следовательно, более высокая скорость двигателя.

При $\alpha = 90$ ЭДС УВ $E_n = 0$ и двигатель работает в режиме динамического торможения.

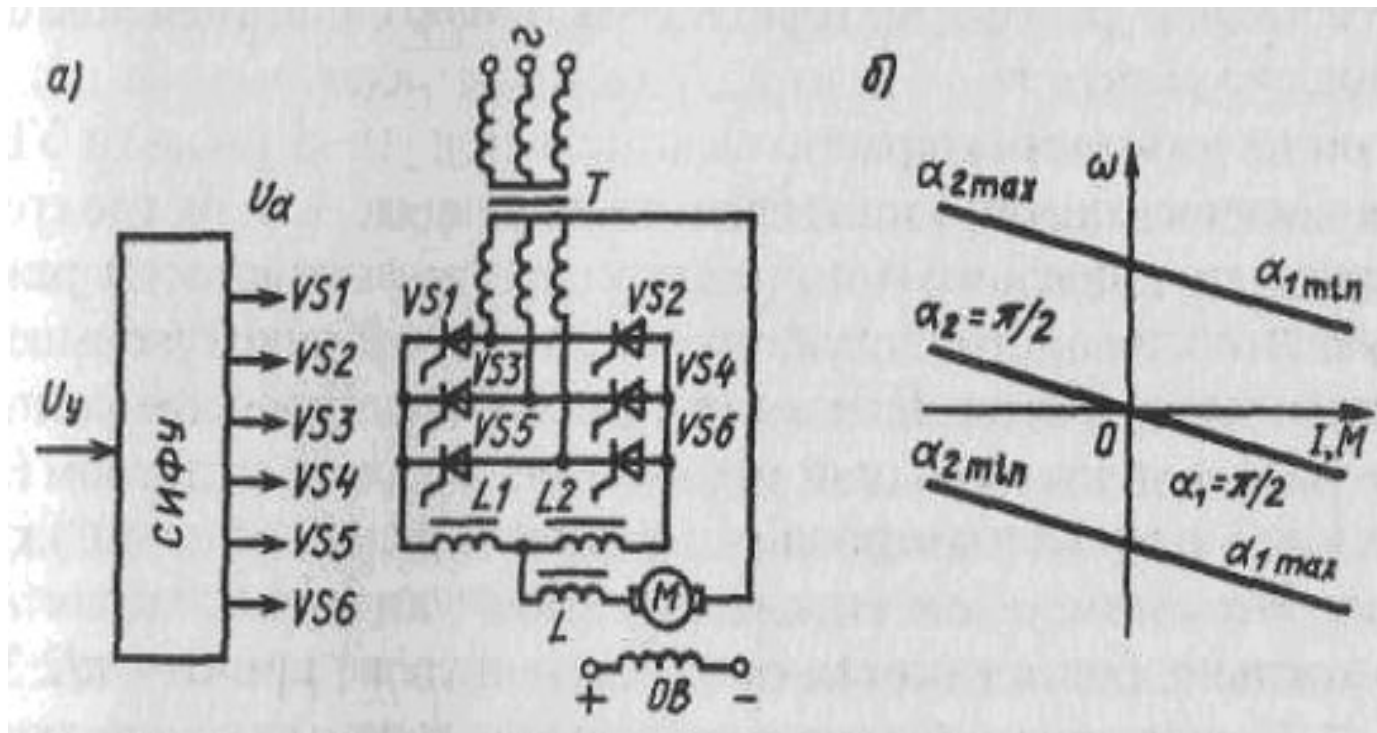
Система тиристорный преобразователь - двигатель

Трехфазный мостовой нереверсивный УВ



Пульсации тока в якоре двигателя при использовании такой схемы меньше, чем при использовании схемы, рассмотренной в предыдущем случае. В некоторых случаях можно также не использовать согласующий трансформатор.

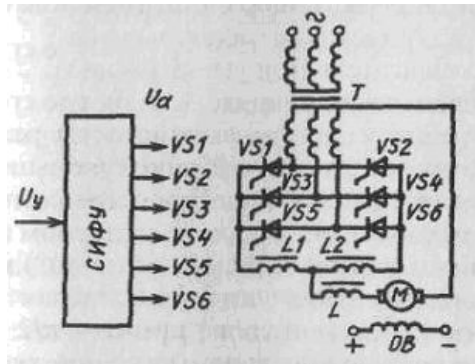
Система тиристорный преобразователь - двигатель



Для получения характеристик двигателя во всех четырех квадрантах используются реверсивные управляемые выпрямители, которые состоят из двух нереверсивных выпрямителей, например с нулевым выводом. Получить характеристики ДПТ в четырех квадрантах можно также и при использовании нереверсивного преобразователя за счет изменения направления тока возбуждения двигателя.

Система тиристорный преобразователь - двигатель

В реверсивных УВ используются два основных принципа управления комплектами вентиляей: **совместное и раздельное**



Совместное управление предусматривает подачу от системы импульсно-фазового управления тиристорами импульсов управления U_y , одновременно на тиристоры обоих комплектов - $VS1, VS3, VS5$ (катодная группа) и $VS2, VS4, VS6$ (анодная группа). При этом за счет наличия угла сдвига между импульсами управления двух комплектов тиристоров, близкого к 180° , **один из них работает в выпрямительном режиме** и проводит ток, а другой, **работая в инверторном режиме**, ток не проводит.

Для обеспечения такого управления между средними значениями ЭДС выпрямителя и инвертора должно существовать соотношение $E_{ср.и} > E_{ср.в}$, однако за счет разности мгновенных значений ЭДС между комплектами тиристоров протекает так называемый уравнивающий ток. Для его ограничения в схеме, предусмотрены уравнивательные реакторы $L1$ и $L2$.

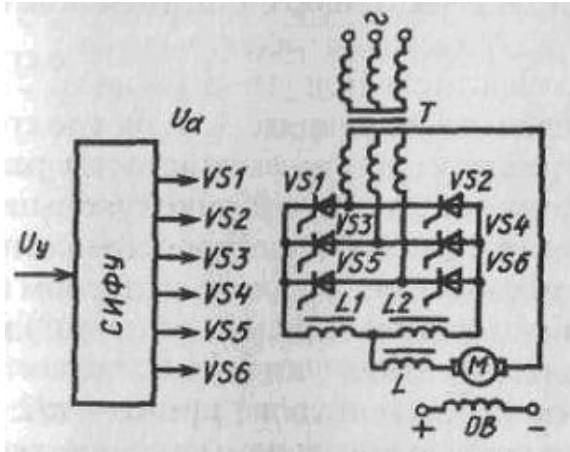
Вид характеристик двигателя зависит от способа согласования углов управления двумя комплектами тиристоров.

При линейном согласовании сумма углов выпрямителя α_1 и инвертора α_2 поддерживается равной 180 , характеристики двигателя линейны и аналогичны характеристикам системы Г - Д.

Для уменьшения уравнивающих токов в ряде случаев используется нелинейное согласование, при котором сумма углов α_1 и α_2 , несколько отличается от 180 .

В этом случае имеет место заметное увеличение скорости двигателя при переходе от двигательного режима к генераторному. В силу этого обстоятельства нелинейное согласование применяется относительно редко.

Система тиристорный преобразователь - двигатель



Раздельное управление используется для полного исключения уравнивающих токов между комплектами тиристоров реверсивного УВ.

Сущность его состоит в том, что импульсы управления подаются только на один из комплектов, который должен в данный момент проводить ток. На второй комплект импульсы не подаются, и он не работает (закрит).

Управление преобразователем осуществляется в этом случае помощью специального логического переключающего устройства (ЛПУ).

Это устройство, осуществляя контроль за током преобразователя, обеспечивает включение в работу и выключение комплектов тиристоров с небольшой паузой в 5... 10 мс. **Вследствие этого вблизи оси скорости имеет место режим прерывистых токов, что отражается в нелинейности характеристик двигателя.**

В заключение остановимся на основных свойствах системы ТП - Д. К достоинствам рассматриваемой системы относятся:

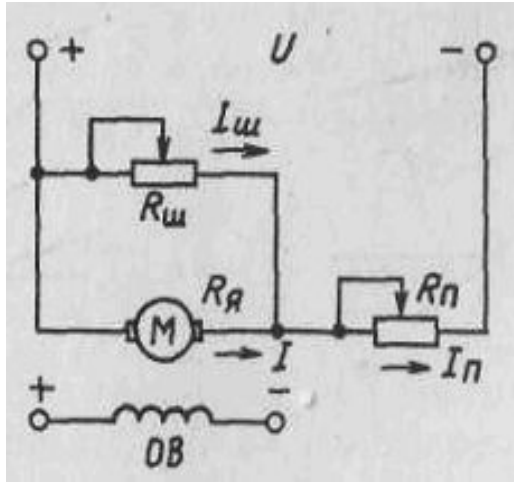
- плавность и значительный диапазон регулирования скорости (более 1 в замкнутых ЭП);
- большая жесткость получаемых искусственных характеристик;
- высокий КПД электропривода, определяемый высокими КПД трансформаторов (0,93...0,98) и УВ (0,9...0,92);
- бесшумность в работе;
- простота в обслуживании и эксплуатации.

Наряду со значительными достоинствами системе ТП - Д присущи следующие недостатки:

- преобразователь имеет одностороннюю проводимость;
- для получения характеристик во всех четырех квадрантах необходимо использовать реверсивный двухкомплектный преобразователь;
- напряжение на якоре и ток имеют пульсирующий характер, что ухудшает условия работы двигателя;
- для сглаживания пульсации тока в большинстве случаев применяют сглаживающий реактор или более сложные многофазные схемы выпрямления;
- работа УВ характеризуется режимом прерывистого тока, при котором резко падает жесткость характеристик и они становятся нелинейными;
- с ростом диапазона регулирования скорости снижается коэффициент мощности ($\cos \phi$) ЭП, определяемый для системы ТП - Д по приближенной формуле $\cos \phi = \cos \alpha$;
- при работе электропривода вносятся искажения в форму тока и напряжения источника питания, что отрицательно сказывается на работе других приемников электроэнергии
- тиристорные преобразователи обладают невысокой помехозащищенностью;
- малой перегрузочной способностью, по току и напряжению.

Несмотря на отмеченные недостатки, система ТП-Д является высокоэффективным регулируемым ЭП постоянного тока и широко применяется для привода таких ответственных рабочих машин, как прокатные станы, металлорежущие станки, экскаваторы и др.

Регулирование скорости ДПТНВ шунтированием якоря



$$U = E + I R_a + I_n R_n;$$

$$U = I_{ш} R_{ш} + I_n R_n;$$

$$I_n = I + I_{ш}.$$

$$U = E + I R_a;$$

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

$$M = k \Phi I,$$

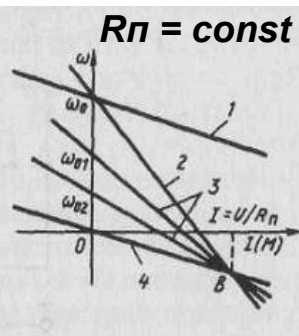
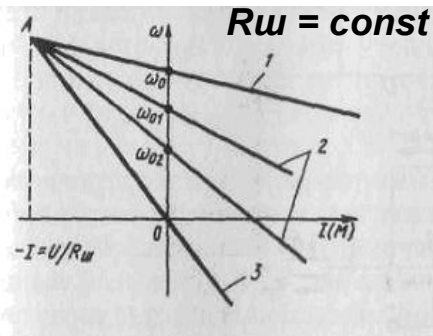
Для ЭП ряда подъемно-транспортных машин и механизмов с целью получения пониженных (посадочных) скоростей движения их исполнительных органов применяется так называемая схема с шунтированием якоря ДПТНВ.

Из уравнений видно, что в схеме с шунтированием якоря снижается скорость идеального холостого хода и падает жесткость характеристик по сравнению с основной схемой включения двигателя.

$$\omega = a \omega_0 - I (R_a + a R_n) / c;$$

$$\omega = a \omega_0 - M (R_a + a R_n) / c^2,$$

$$a = R_{ш} / (R_{ш} + R_n); c = k \Phi$$



На рисунке показаны характеристики 1...5 при условии $R_{ш} = \text{const}$, $R_n = \text{var}$ (от 0 до ∞).

На следующем рисунке характеристики 2... 4 - при условии $R_n = \text{const}$, $R_{ш} = \text{var}$ (от 0 до ∞).

Эти зависимости можно получить, анализируя формулы или построив граничные искусственные характеристики, соответствующие предельным значениям (нулю и бесконечности) сопротивлений резисторов $R_{ш}$ и R_n .

$$\omega = R_{ш} / (R_{ш} + R_n) \omega_0 - I (R_a + R_{ш} / (R_{ш} + R_n) * R_n) / (k \Phi)$$

$$\omega = R_{ш} / (R_{ш} + R_n) \omega_0 - M (R_a + R_{ш} / (R_{ш} + R_n) * R_n) / (k \Phi)^2$$

Регулирование скорости ДПТНВ шунтированием якоря

Рассмотренный способ регулирования скорости имеет следующие показатели:

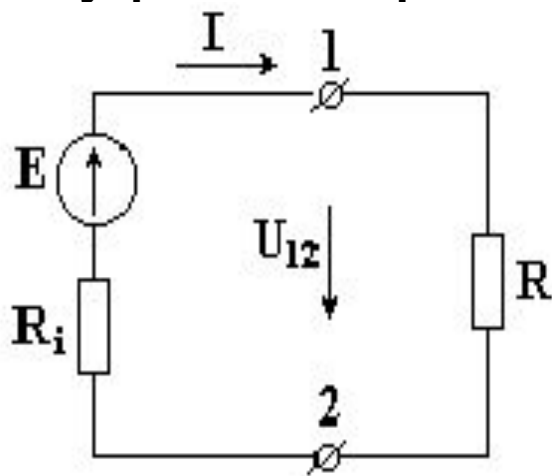
- диапазон регулирования скорости 5...6 ($D = \omega_{max} / \omega_{min}$);
- плавность регулирования, определяемую плавностью изменения сопротивлений $R_{ш}$ и R_n регулирование осуществляется вниз от основной скорости при постоянном моменте нагрузки;
- жесткость получаемых искусственных характеристик относительно высокая в области малых скоростей.

Экономичность этого способа невысока из-за значительных потерь мощности в цепи якоря, поэтому он используется для регулирования скорости двигателей небольшой мощности или при кратковременной работе ЭП на пониженных скоростях.

Источники энергии (справка)

Любой источник энергии можно представить в виде **источника ЭДС** или **источника тока**.

Источник ЭДС - это источник, характеризующийся электродвижущей силой и внутренним сопротивлением. **Идеальным** называется источник ЭДС, **внутреннее сопротивление которого равно нулю**.



На рисунке изображен источник ЭДС, к зажимам которого подключено сопротивление **R**.

R_i - внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Стрелка ЭДС направлена от точки низшего потенциала к точке высшего потенциала, стрелка напряжения на зажимах источника **U₁₂** направлена в противоположную сторону от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

$$I = \frac{E}{R_i + R}, \quad E = R_i \cdot I + I \cdot R = R_i \cdot I + U_{12}, \quad U_{12} = I \cdot R = E - I \cdot R_i$$

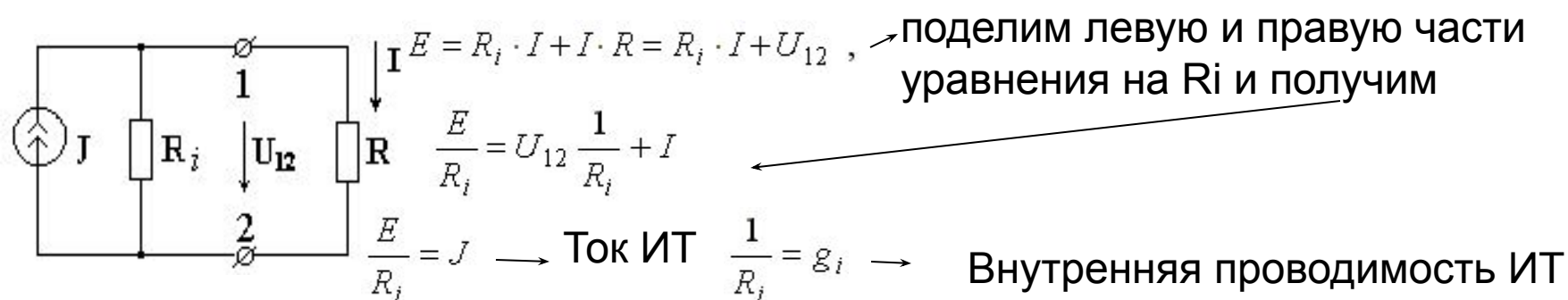
У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление $R_i = 0$, $U_{12} = E$. Из формул видно, что напряжение на зажимах реального источника ЭДС уменьшается с увеличением тока. У идеального источника напряжение на зажимах не зависит от тока и равно электродвижущей силе.

Источники энергии (справка)

Возможен другой путь идеализации источника: **представление его в виде источника тока.**

Источником тока называется источник энергии, **характеризующийся величиной тока и внутренней проводимостью.**

Идеальным называется источник тока, внутренняя проводимость которого равна нулю.



$$J = U_{12} \cdot g_i + I$$

У идеального источника тока $g_i = 0$ и $J = I$.

Ток идеального источника не зависит от сопротивления внешней части цепи. Он остается постоянным независимо от сопротивления нагрузки. **Любой реальный источник ЭДС можно преобразовать в источник тока и наоборот.**

- **Источник энергии, внутреннее сопротивление которого мало по сравнению с сопротивлением нагрузки, приближается по своим свойствам к идеальному источнику ЭДС.**
- **Если внутреннее сопротивление источника велико по сравнению с сопротивлением внешней цепи, он приближается по своим свойствам к**

Регулирование координат в системе «ИТ-Д»

В рассмотренных ранее схемах системы «преобразователь - двигатель» якорь питался от преобразователя со свойствами источника напряжения.

Такой преобразователь имеет небольшое (в идеале нулевое) собственное внутреннее сопротивление, за счет чего падение напряжения в нем при протекании тока также невелико и подаваемое на двигатель напряжение изменяется мало.

В пределе при нулевом внутреннем сопротивлении преобразователя напряжение на его выходе постоянно и не зависит от тока нагрузки.

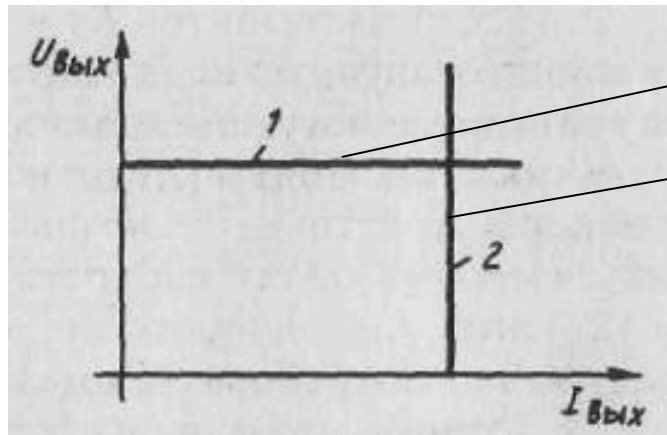
Вольтамперная характеристика идеального преобразователя со свойствами источника напряжения горизонтальной линией.

В последние годы широкое распространение в электропривод находят и преобразователи со свойствами источника тока.

Они характеризуются тем, что выдают в нагрузку мало изменяющийся ток.

Двигатель, питаемый от такого преобразователя, приобретает специфические характеристики и возможности по регулированию координат и, в первую очередь, момента.

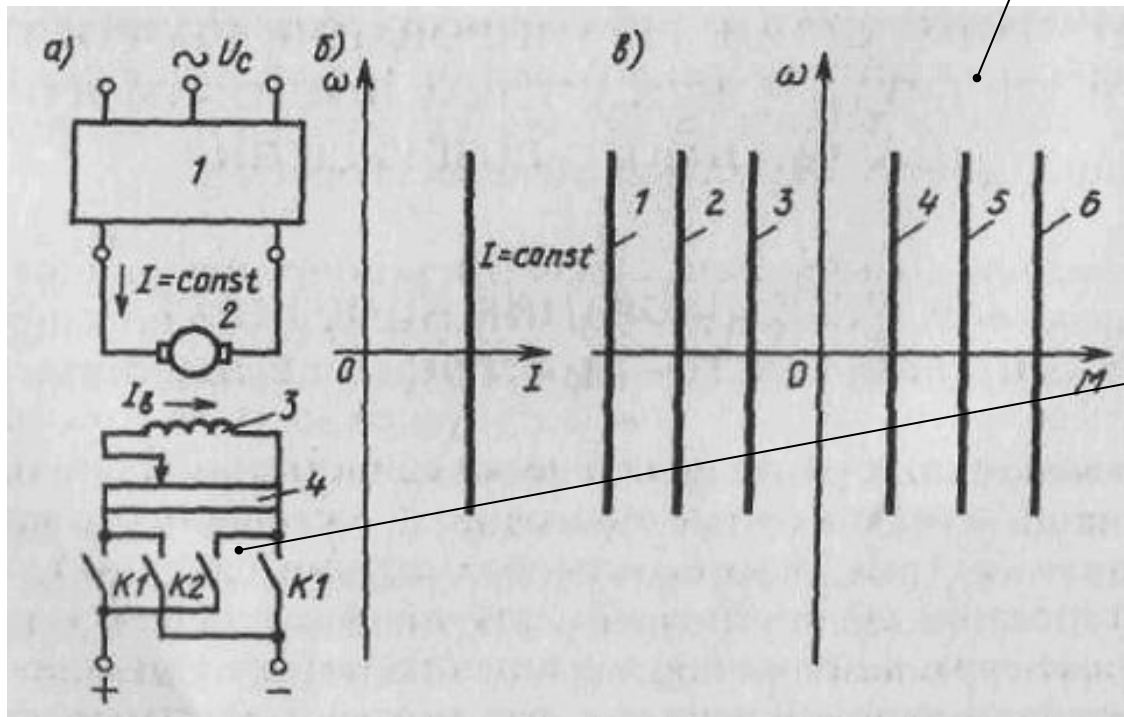
Регулирование координат в системе «ИТ-Д» (продолжение)



Источник напряжения

Источник тока
(источник момента)

$$P = \omega M \rightarrow \omega = P/M$$



Изменяют
направление и ток в
ОВ

$$M = k\Phi I$$

Регулирование координат в системе «ИТ-Д» (продолжение)

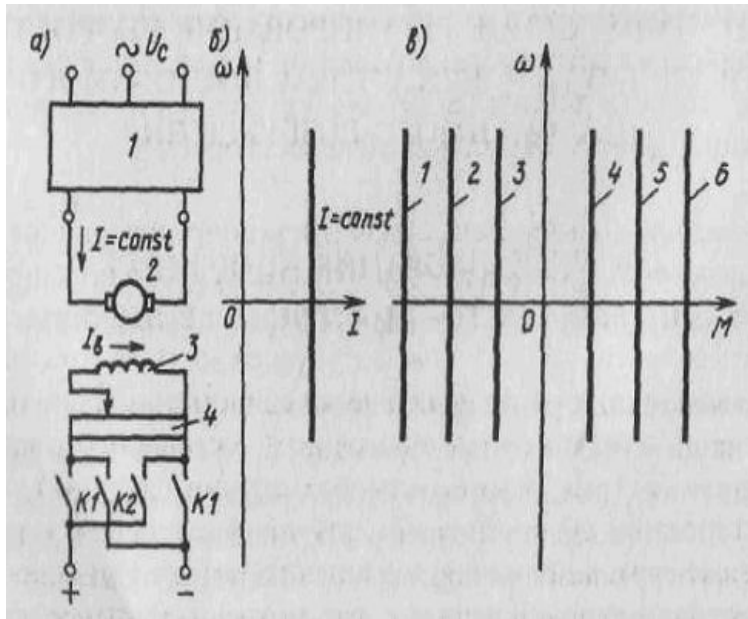


Схема системы, получившей название «источник тока - двигатель» (ИТ - Д), показана на рисунке (а). В этой схеме якорь двигателя подключен к источнику тока 1 и обтекается постоянным током. Значение тока в обмотке возбуждения 3 и его направление могут изменяться с помощью потенциометра 4 и контактов К1 и К2.

Так как $I = \text{const}$, электромеханическая характеристика двигателя будет представлять собой вертикальную прямую линию.

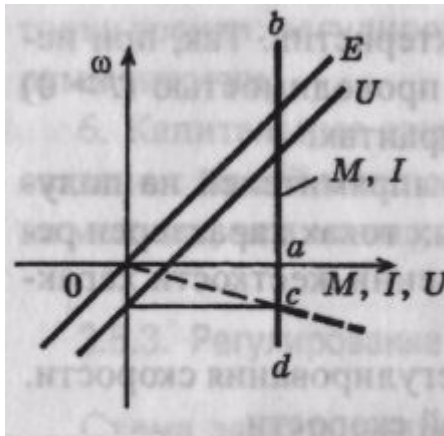
Семейство механических характеристик легко получить на основании формулы $M = k\Phi I$. Из нее видно, что при $I = \text{const}$ момент двигателя и его направление определяются соответственно значением магнитного потока и его знаком. Таким образом, **если с помощью потенциометра 4 и контактов К1 и К2 изменять значение тока возбуждения и его направление, а тем самым и магнитный поток Φ** , можно получить механические характеристики в виде прямых 1 ...6 при различных магнитных потоках от $-\Phi_1$, до $+\Phi_6$. Такие характеристики обеспечивают постоянство момента на валу двигателя при любой его скорости, а **ЭП приобретает свойства источника момента, управляемого по цепи возбуждения.**

Энергетические режимы работы электропривода. Система ИТ- ДПТ

$$I = \text{const},$$

$$M = k\Phi I = \text{const},$$

$$U = E + IR = k\Phi\omega + IR$$



Характеристики электропривода при питании якоря от источника тока

1. Двигательный режим соответствует участку **ab** в I квадранте

$$M\omega > 0,$$

$$UI > 0$$

механическая энергия поступает к потребителю — технологической машине, электрическая энергия поступает к своему потребителю — двигателю

2. Режим короткого замыкания — точка **a**

$$E = 0 \text{ и } U = IR.$$

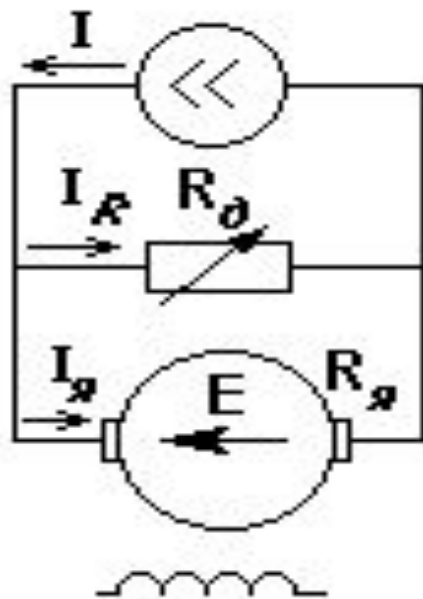
3. На участке **ac** $M\omega < 0$, т.е. механическая энергия поступает от технологической машины и, преобразуясь в электрическую, передается в якорную цепь;

по-прежнему — $IU > 0$ электрическая энергия от источника тока также поступает в якорную цепь. Этот режим мы определили раньше как **торможение противовключением**.

4. В точке **c** $U = 0$ — режим **динамического торможения**: вся поступившая механическая энергия **рассеивается в сопротивлениях якорной цепи**.

5. На участке **cd** $M\omega < 0$ и $UI < 0$ — **рекуперативное торможение**, если источник тока позволяет передать энергию в сеть. Если источник тока обладает односторонней проводимостью (пунктир на рисунке), этого режима не будет, и электропривод будет продолжать работать в режиме динамического торможения (полуштриховая линия на рисунке).

Система ИТ- ДПТ



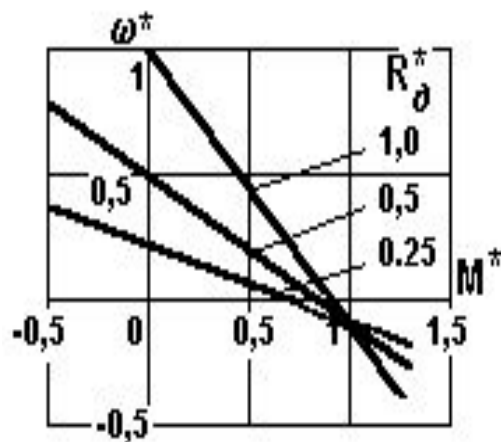
При питании якорной цепи от источника тока ($I=const$) **реостатное регулирование осуществляется включением R_d параллельно якорю** – рисунок а. Характеристики при этом существенно изменяются, появляется возможность регулировать как момент, так и скорость - рисунок б.

$$M^* = I_{я}^* \Phi^*$$

$$E^* = \Phi^* \omega^*,$$

$$I^* = I_{я}^* + I_R^*,$$

$$E^* = I_R^* R_d^* - I_{я}^* R_{я}^*.$$



$$\omega^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*} - \frac{M^* (R_d^* + R_{я}^*)}{(\Phi^*)^2}$$

$$\omega_0^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*}$$

$$M_{к.з}^* = I^* \Phi^* \frac{R_d^*}{R_d^* + R_{я}^*} \approx I^* \Phi^*$$

Из графиков на рисунке б следует, что **реостатное регулирование скорости в системе источник тока - двигатель более благоприятно при малых скоростях** как с точки зрения жесткости характеристик - **она тем выше, чем меньше скорость** - так и с точки зрения потерь - они **уменьшаются с уменьшением скорости.**

Система ИТ- ДПТ



$$M^* = I_{я}^* \Phi^*$$

$$E^* = \Phi^* \omega^*,$$

$$I^* = I_{я}^* + I_R^*,$$

$$E^* = I_R^* R_d^* - I_{я}^* R_{я}^*.$$

$$\omega^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*} - \frac{M^* (R_d^* + R_{я}^*)}{(\Phi^*)^2}$$

$$\omega_0^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*}$$

Скорость идеального холостого хода теперь зависит от сопротивления дополнительного резистора.

Момент короткого замыкания при малых сопротивлениях якоря практически не зависит от добавочного сопротивления

$$M_{к.з}^* = I^* \Phi^* \frac{R_d^*}{R_d^* + R_{я}^*} \approx I^* \Phi^*$$

Одна из функций ЭП связана с обеспечением регулируемого по значению усилия или момента для создания на исполнительном органе рабочей машины **требуемого натяжения** в обрабатываемом или изготавливаемом материале или изделии (**производство листового металла, проводов, бумаги, текстильного полотна и др.**).

ЭП с такими механическими характеристиками наиболее просто обеспечит выполнение этой функции, а также позволит получить постоянные по значению ускорения или замедления движения.

Импульсное регулирование скорости ДПТНВ

В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники получил распространение импульсный способ регулирования скорости ЭП, применение которого позволяет в ряде случаев упростить его силовую схему и повысить надежность ее работы.

Этот способ является к тому же практически единственным при питании двигателя от нерегулируемого источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, неуправляемого выпрямителя и др.).

Регулирование скорости в этом случае осуществляется импульсным изменением напряжения, магнитного потока или сопротивления резистора в якорной цепи, т.е. рассмотренными ранее основными способами получения искусственных характеристик двигателя.

Импульсное регулирование осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых ключей любого типа.

Основным показателем работы ключа является заполнение (скважность его работы), определяемое отношением времени его замкнутого состояния к периоду коммутации:

$$\gamma = t_3 / T_k = t_3 / (t_3 + t_0)$$

где t_0 - время разомкнутого состояния ключа; t_3 — время замкнутого состояния ключа.

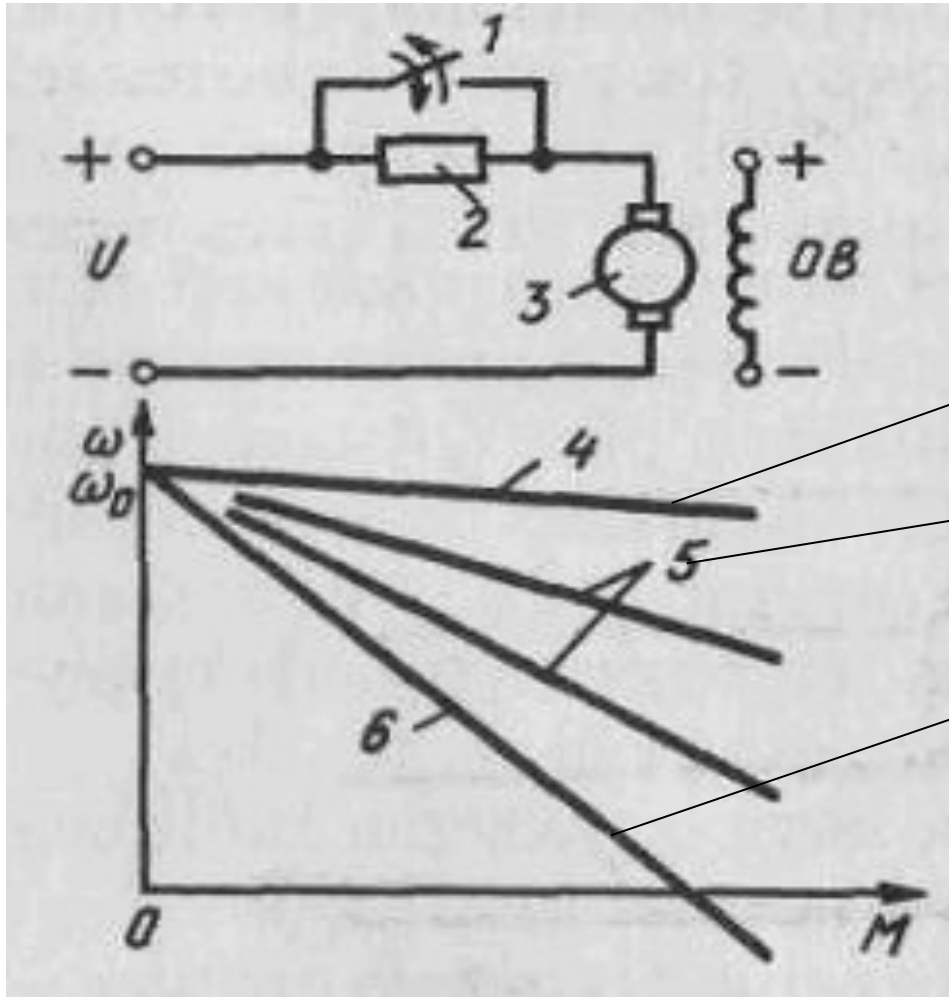
На практике применяются **два основных способа управления ключом - широтно-импульсная и частотно-импульсная модуляции.**

При широтно-импульсной модуляции период коммутации ключа T_k остается постоянным, а изменяется время его замкнутого состояния t_3 .

При частотно-импульсной модуляции время t_3 остается неизменным, а меняется период коммутации ключа T_k , который обратно пропорционален частоте коммутации.

Импульсное регулирование скорости ДПТНВ

$$\gamma = t_3 / T_K = t_3 / (t_3 + t_0)$$



$$\omega = U / (k\Phi) - M (R_d(1-\gamma) + R_a) / (k\Phi)^2$$

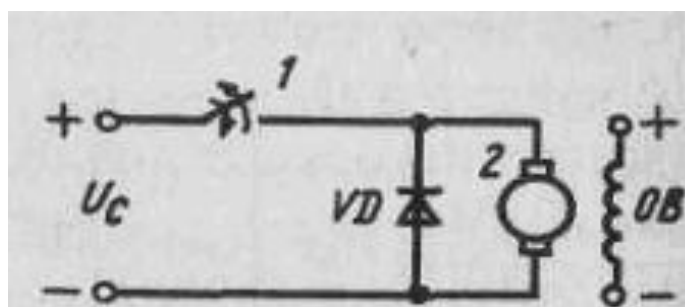
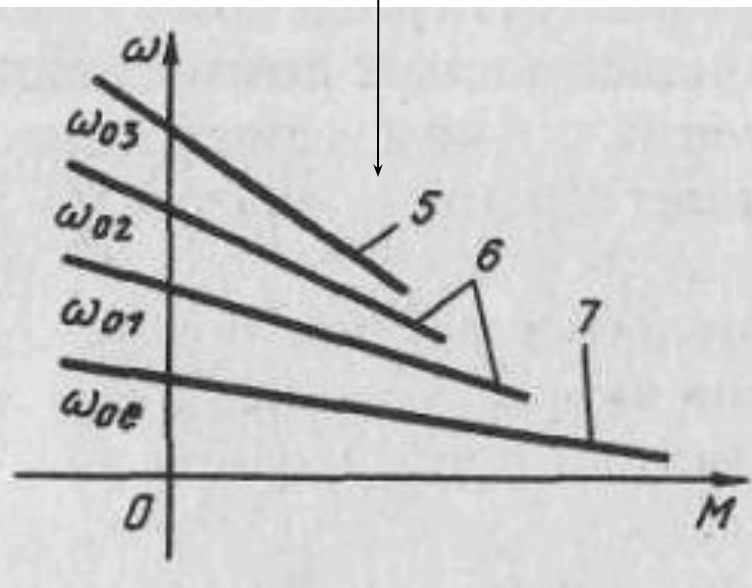
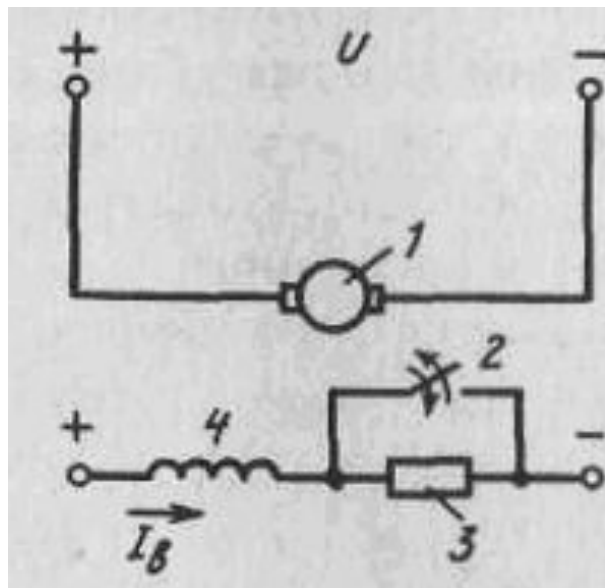
$$\gamma = 1$$

$$0 < \gamma < 1$$

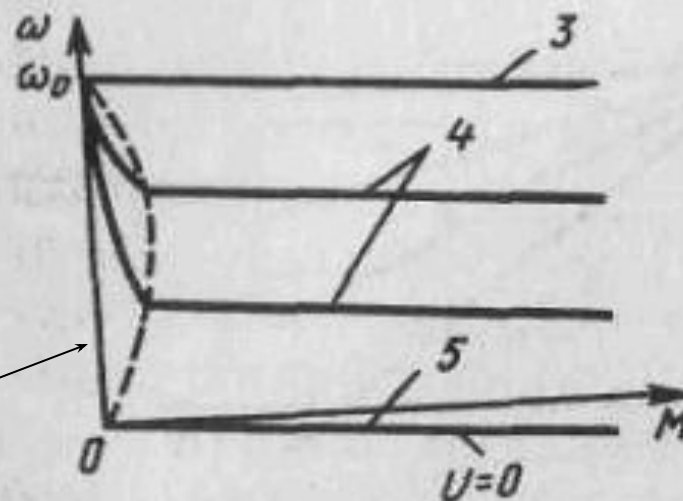
$$\gamma = 0$$

Импульсное регулирование скорости ДПТНВ

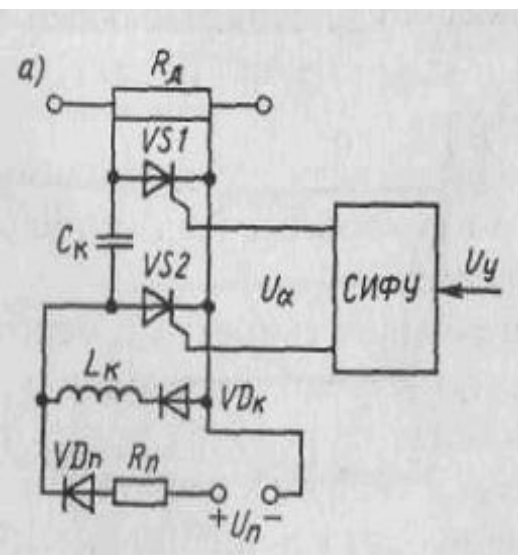
$$\omega = U / (k\Phi) - M (R_{\text{д}}(1 - \gamma) + R_{\text{я}}) / (k\Phi)^2$$



$$\omega = \gamma U_c / (k\Phi) - MR_{\text{я}} / (k\Phi)^2$$



Принцип действия ключа



В схемах импульсного регулирования современных ЭП применяются бесконтактные полупроводниковые ключи, обычно тиристорные.

Работу такого ключа поясним на примере схемы импульсного регулирования сопротивления добавочного резистора, включенного в цепь постоянного тока (рис. а).

Роль ключа в этой схеме выполняет тиристор **VS1**, включенный параллельно резистору R_d .

Открываясь, тиристор шунтирует резистор R_d , закрываясь, тиристор вводит в электрическую цепь этот резистор.

Для выключения тиристора VS1 необходимо обеспечить более высокий (положительный) потенциал катода по сравнению с потенциалом анода.

В рассматриваемой схеме это достигается благодаря использованию вспомогательного тиристора VS2 и коммутирующих элементов - конденсатора C_k , реактора L_k , диода VD_k , маломощного источника постоянного тока с напряжением U_n , диода VD_n и резистора R_n .

Управление тиристорами **VS1** и **VS2** осуществляется СИФУ, которая подает на них импульсы управления U_α с необходимой частотой и последовательностью.

Допустим, что **в исходном положении** тиристор **VS1** открыт, тиристор **VS2** закрыт, а конденсатор C_k заряжен от источника питания с напряжением U_n со знаком «+» на нижней обкладке. Закрытие тиристора **VS1** происходит путем подачи импульса на тиристор **VS2**.

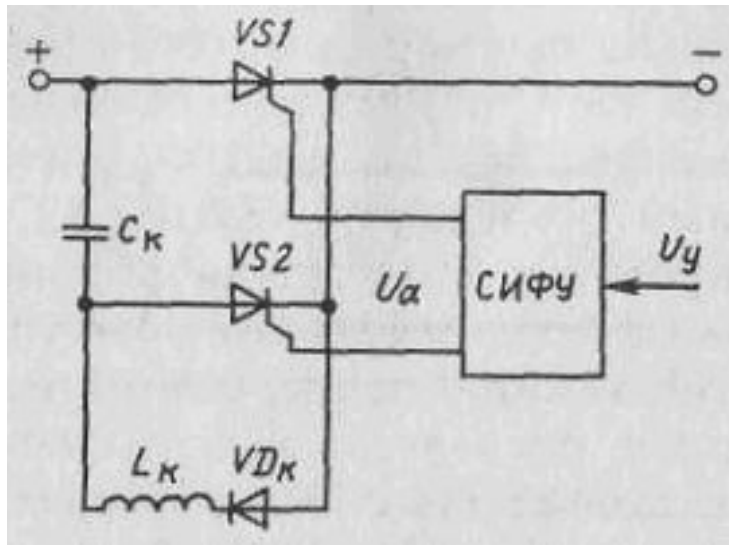
Последний открывается и пропускает к катоду тиристора **VS1** «+» напряжения конденсатора C_k , а к аноду - «-» этого напряжения. После закрытия **VS1** конденсатор C_k заряжается через открытый тиристор **VS2** плюсом на верхней обкладке. Если теперь снять импульс управления с **VS2**, то он к концу заряда конденсатора закроется.

При последующей подаче импульса на **VS1** он вновь откроется, замыкая накоротко резистор R_d , при этом вновь начнется перезарядка конденсатора по цепи C_k - **VS1** - VD_k - L_k , которая будет идти до тех пор, пока потенциал его нижней обкладки не станет положительным.

Описанный процесс работы схемы повторится, если опять открыть тиристор **VS2**, и т.д.

Для первоначальной зарядки конденсатора C_k служит источник тока с напряжением U_n и элементы VD_n и R_n .

Принцип действия ключа



На рис. 6 представлена еще одна распространенная схема тиристорного ключа, которая обычно используется для импульсного регулирования напряжения.

В этой схеме нет дополнительного источника постоянного тока, поскольку предварительная зарядка конденсатора C_k с плюсом на верхней обкладке происходит от напряжения сети при открытии тиристора $VS2$. Тиристор $VS1$ при этом закрыт и двигатель отключен от сети.

При подаче управляющего импульса U_α на тиристор $VS1$ он открывается, и на двигатель подается напряжение.

Одновременно через этот тиристор и элементы VD_k и L_k начинается перезарядка конденсатора C_k уже с минусом на верхней обкладке. Поэтому при последующем открытии тиристора $VS2$ потенциал анода тиристора $VS1$ окажется более отрицательным, чем потенциал его катода, и тиристор $VS1$ закроется.

В дальнейшем цикл будет повторяться.

Изменяя с помощью СЯФУ интервал между управляющими импульсами тиристоров $VS1$ и $VS2$, можно обеспечить импульсное регулирование напряжения на двигателе.

Показатели импульсного регулирования скорости в основном такие же, как при непрерывном регулировании. Вместе с тем энергетические показатели импульсных электроприводов постоянного тока несколько хуже. Это объясняется наличием в кривой тока якоря переменной составляющей, что приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе.

$$\omega = \gamma U_c / (k\Phi) - MR_{\text{я}} / (k\Phi)^2$$

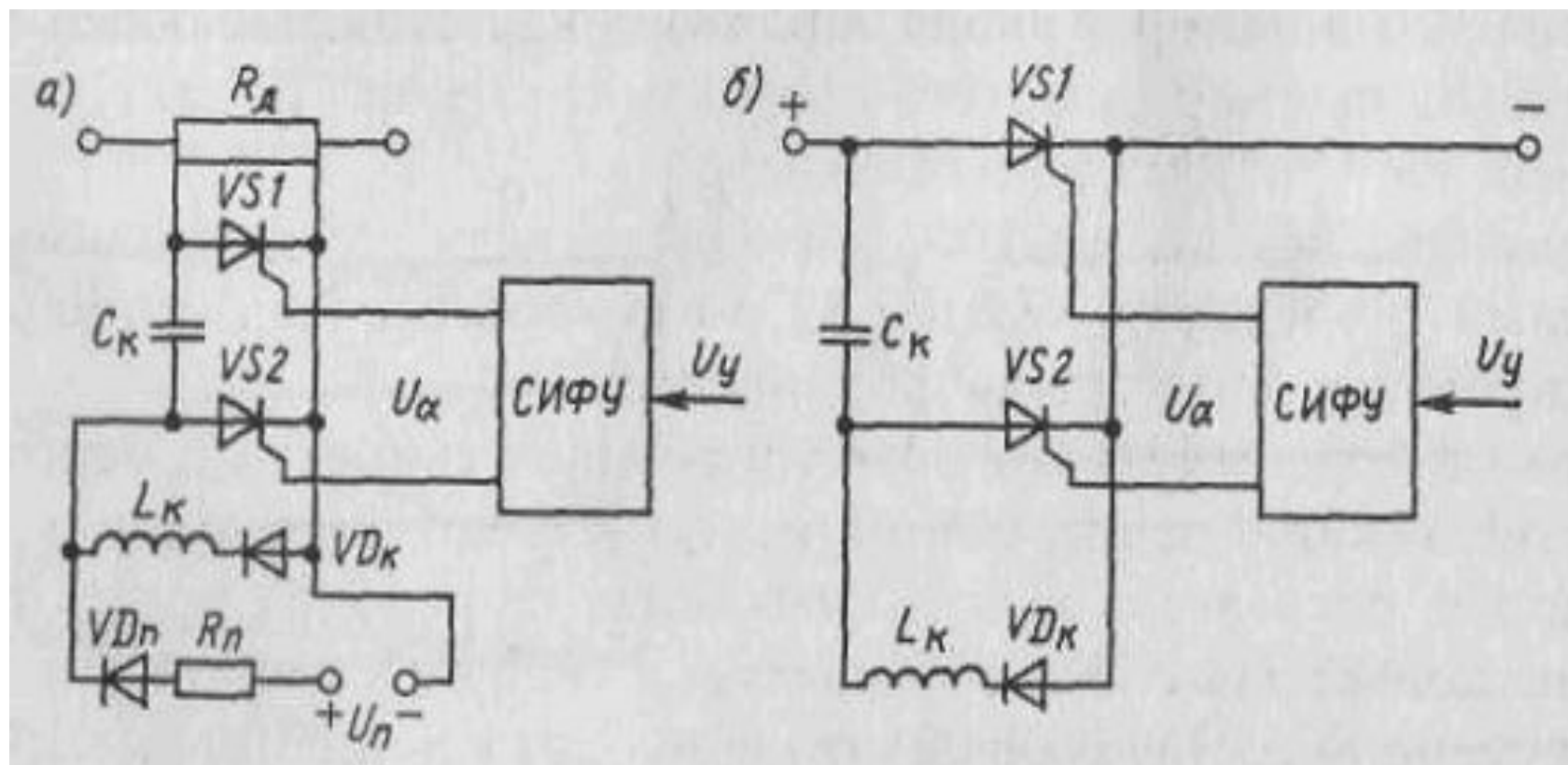
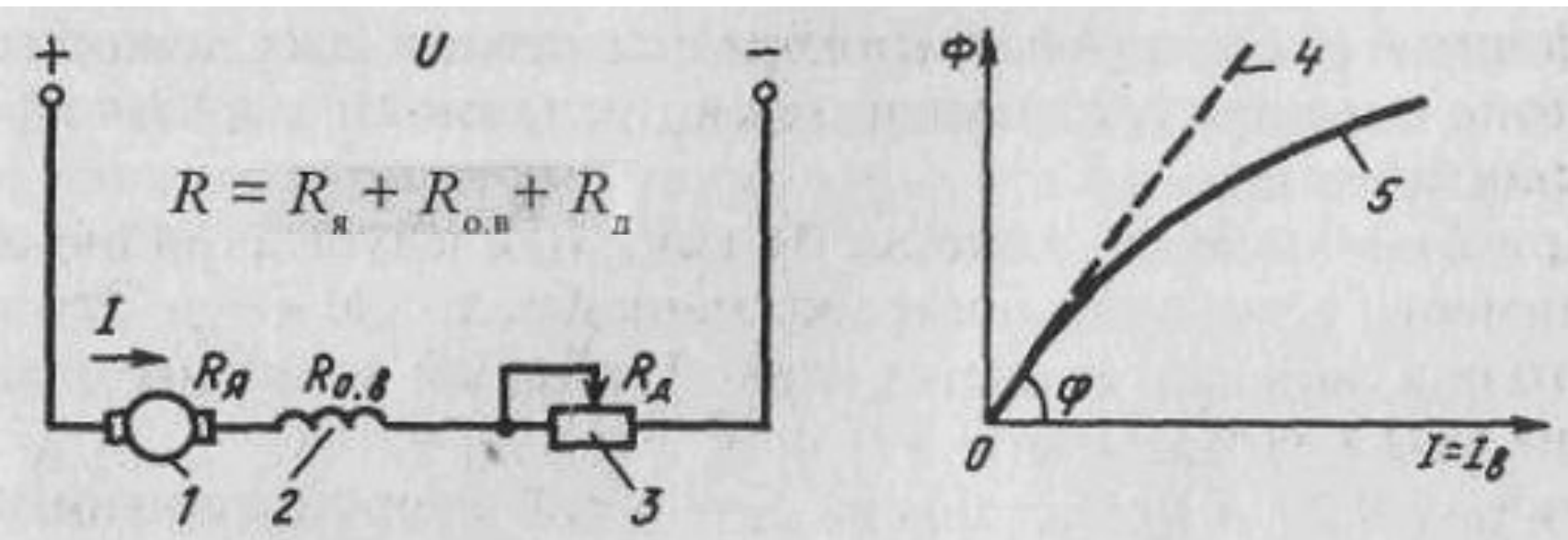


СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В ЭП электрического транспорта и ряда грузоподъемных машин и механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТПВ), схема включения и кривая намагничивания которых показаны на рисунке. Основной особенностью этих двигателей является включение обмотки возбуждения 2 последовательно с обмоткой якоря 1 и добавочным резистором 3, вследствие чего ток якоря одновременно является и током возбуждения.



$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

$$\Phi = aI,$$

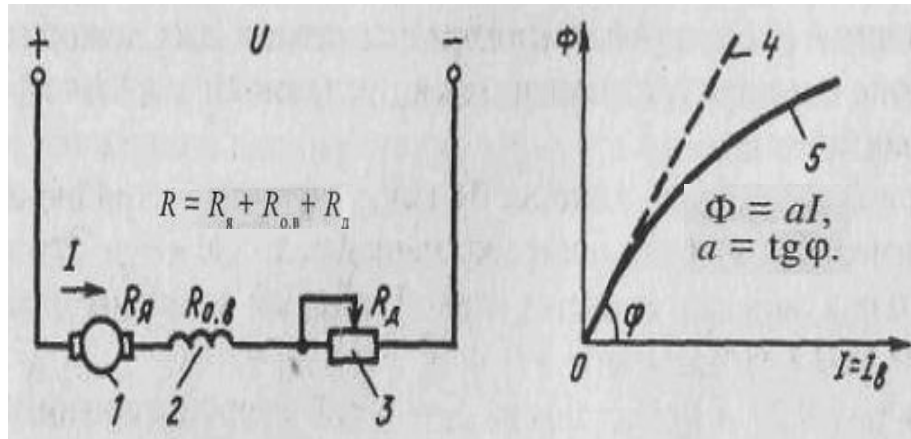
$$a = \tan \varphi.$$

$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I,$$

Двигатель последовательного возбуждения (продолжение)



Магнитный поток и ток связаны между собой кривой намагничивания 5, описав которую с помощью приближенного аналитического выражения, можно получить формулы для характеристик двигателя. В простейшем случае кривую намагничивания представляют прямой линией 4. Такая аппроксимация по существу означает пренебрежение насыщением магнитной системы двигателя и позволяет представить зависимость потока от тока следующим образом:

$$\Phi = aI, \text{ где } a = \tan \varphi.$$

$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

При линейной аппроксимации момент является квадратичной функцией тока:

$$M = k\Phi I = kaI^2.$$

Можно получить следующее выражение для электромеханической характеристики двигателя:

$$\omega = U / (kaI) - R / (ka).$$

Выразив ток через момент, получим следующее выражение для механической характеристики:

$$\omega = U / \sqrt{kaM} - R / (ka)$$

$$U = E + IR;$$

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

$$M = k\Phi I,$$

Двигатель последовательного возбуждения (продолжение)

$$M = k\Phi I = kaI^2.$$

$$\omega = U / (kaI) - R / (ka)$$

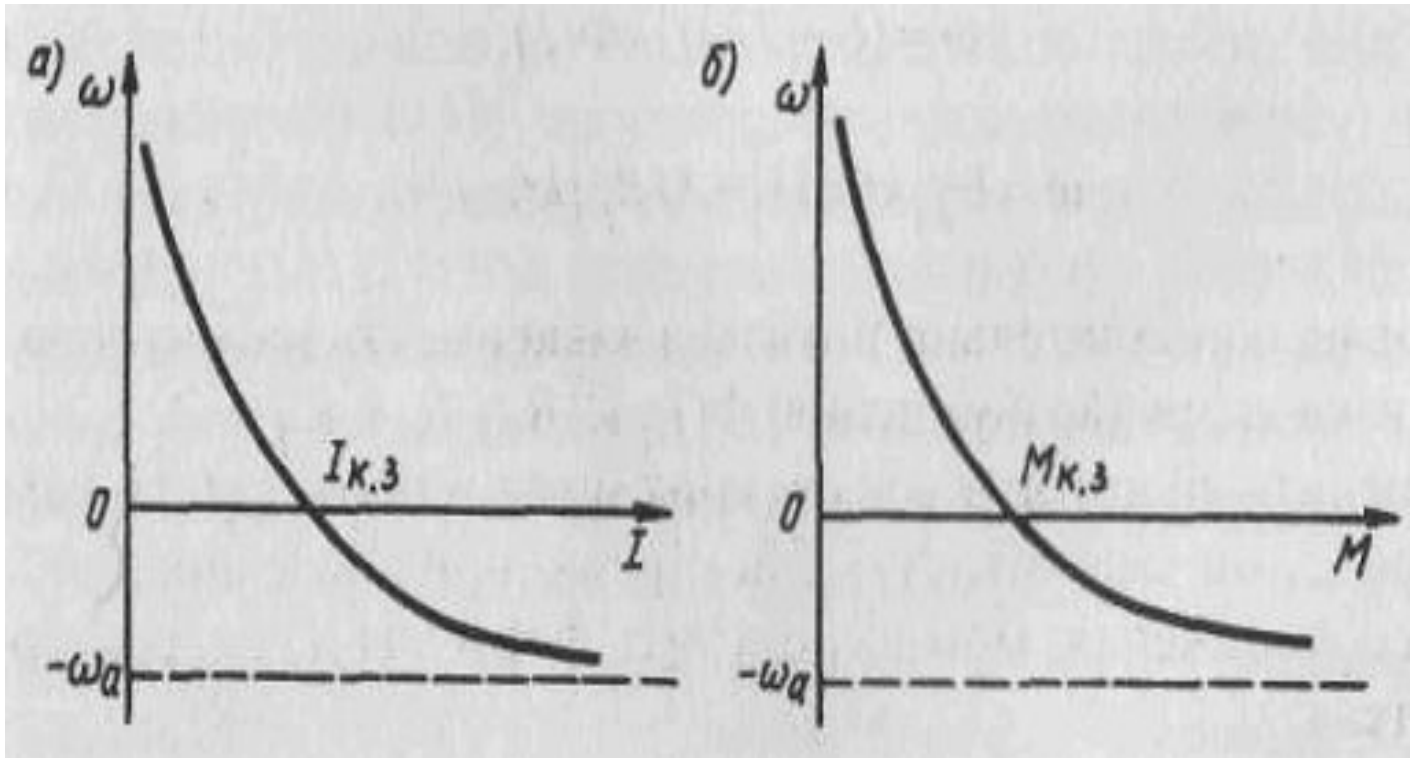
$$\omega = U / \sqrt{kaM} - R / (ka)$$

Двигательный режим – $0 < \omega < \infty$

Режим короткого замыкания $\omega = 0$

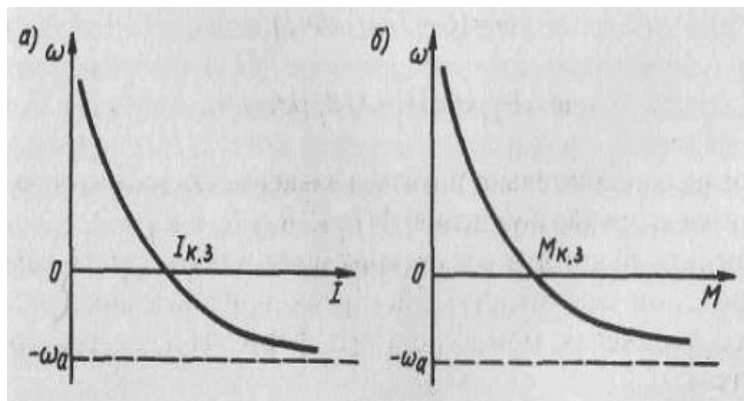
Нет режима холостого хода и генератора, работающего параллельно с сетью

При $\omega < 0$ – режим торможения
противовключением или режим генератора,
включенного последовательно с сетью



Двигатель последовательного возбуждения (продолжение)

$$U = E + IR;$$
$$E = k\Phi\omega;$$
$$M = k\Phi I,$$



Особенность полученных характеристик состоит в том, что при небольших токах и моментах двигателя, соответствующих малым моментам нагрузки, **его скорость принимает большие значения, при этом характеристики не пересекают ось скорости.**

Таким образом, для двигателя последовательного возбуждения, включенного по основной схеме, **не существуют режимы холостого хода и генератора, работающего параллельно с сетью** (или режима рекуперативного торможения), так как **характеристики во втором квадранте не проходят.**

Это объясняется тем, что при $I, M \rightarrow 0$ магнитный поток $\Phi \rightarrow 0$, а следовательно, $E \rightarrow U$. Другими словами, при любой скорости $E < U$, в силу чего отдачи энергии в сеть происходить не может.

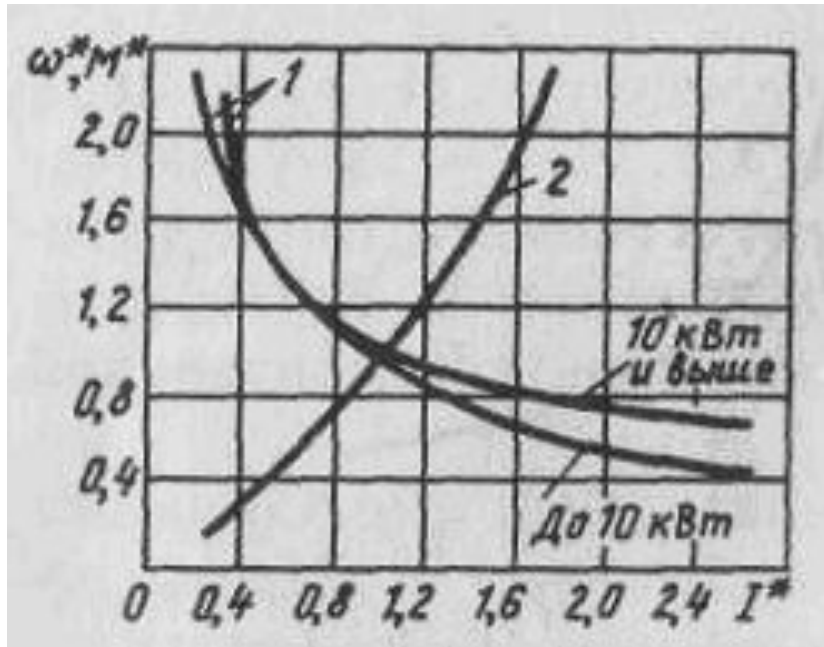
Отметим, что **из-за наличия в двигателе потока остаточного намагничивания $\Phi_{\text{ост}}$ практически скорость холостого хода существует и равна в этом случае отношению $U/(k\Phi_{\text{ост}})$.**

Остальные режимы работы ДПТПВ аналогичны режимам работы ДПТНВ:

- **двигательный режим имеет место при $0 < \omega < \infty$,**
- **режим короткого замыкания при $\omega = 0$,**
- **а режим генератора, включенного последовательно с сетью (торможение противовключением), при $\omega < 0$.**

Кроме того, ДПТПВ может работать в генераторном режиме независимо от сети постоянного тока (динамическое торможение).

Двигатель последовательного возбуждения (продолжение)



Выше приведенные выражения для механических и электромеханических характеристик, являются приближенными и не могут быть использованы для точных инженерных расчетов.

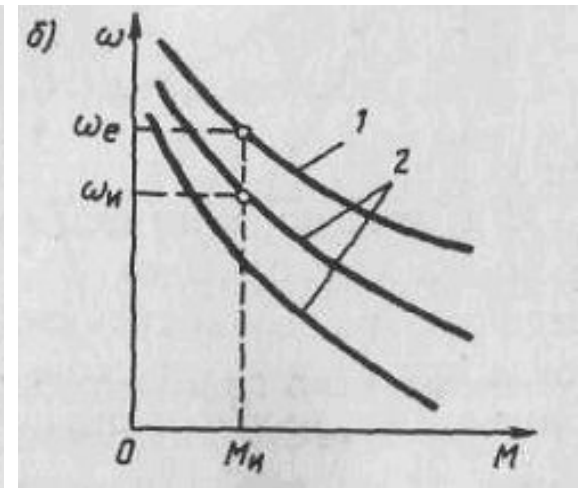
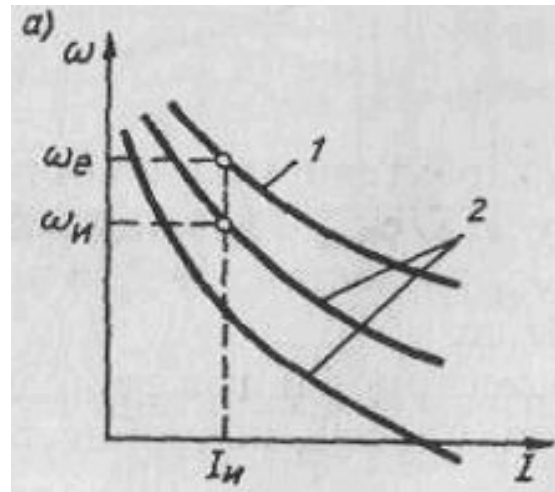
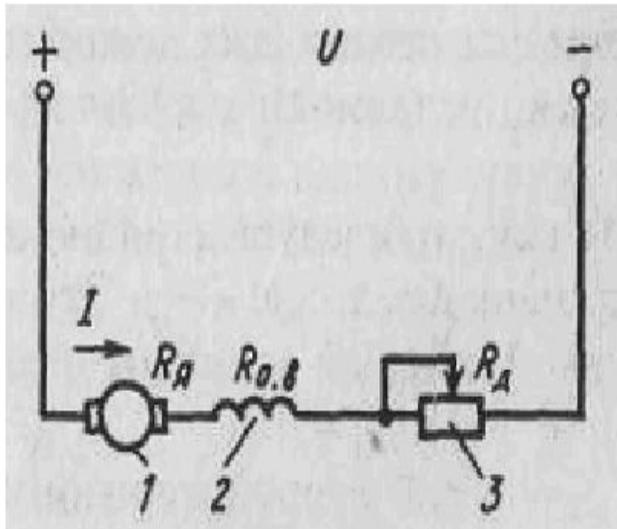
Причина этого заключается в принятой линейной аппроксимации кривой намагничивания, в то время как реально двигатели работают в области насыщенной магнитной системы.

Поэтому для точных практических расчетов используются так называемые универсальные характеристики ДППВ, приведенные на рисунке.

Они представляют собой зависимости относительных скорости $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ном}}$ (кривые 1) и момента (кривая 2) от относительного тока $I^* = I / I_{\text{ном}}$.

Для получения $M^* = M / M_{\text{ном}}$ характеристик с большей точностью зависимость $\omega^*(I^*)$ представляется двумя кривыми для двигателей до 10 кВт и двигателей на 10 кВт и выше.

Регулирование координат ДПТПВ с помощью резисторов



$$\omega = U / (kaI) - R / (ka)$$

$$\omega = U / \sqrt{kaM} - R / (ka)$$

$$\omega_n = \omega_e \left(U_{\text{ном}} - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{о.в}} + R_{\text{д}}) \right) / \left(U_{\text{ном}} - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{о.в}}) \right)$$

$$R_{\text{д}} = (1 - \omega_n / \omega_e) (U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} - R_{\text{я}} - R_{\text{о.в}})$$

$$R_{\text{д}} + R_{\text{о.в}} \approx 0,75 U_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / I_{\text{ном}}$$

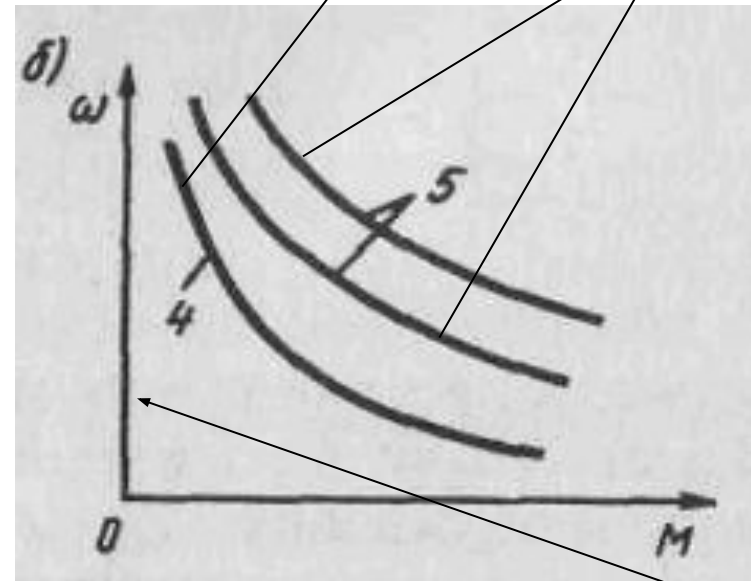
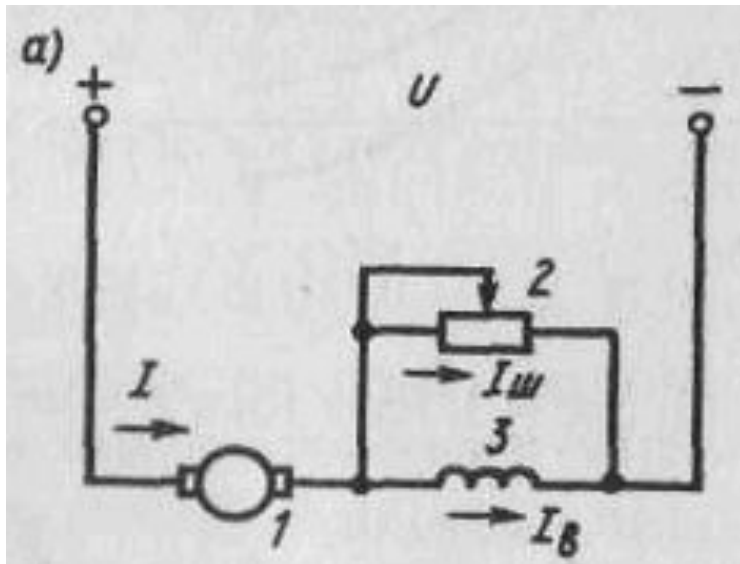
Регулирование скорости ДПТПВ изменением магнитного потока, напряжения и шунтированием резистором якоря

$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - IR / [k\Phi(I)]$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

Регулирование магнитного потока



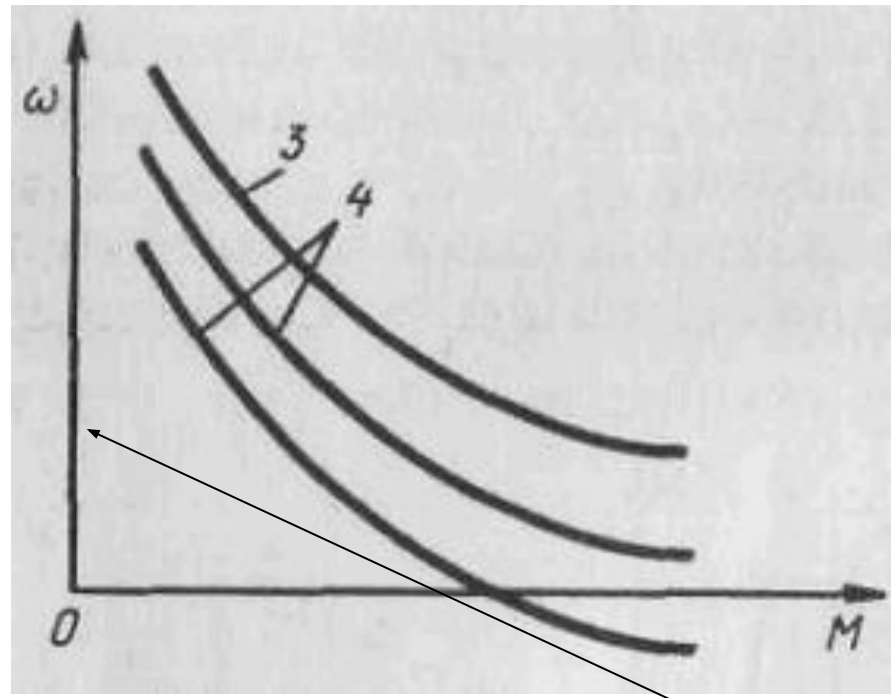
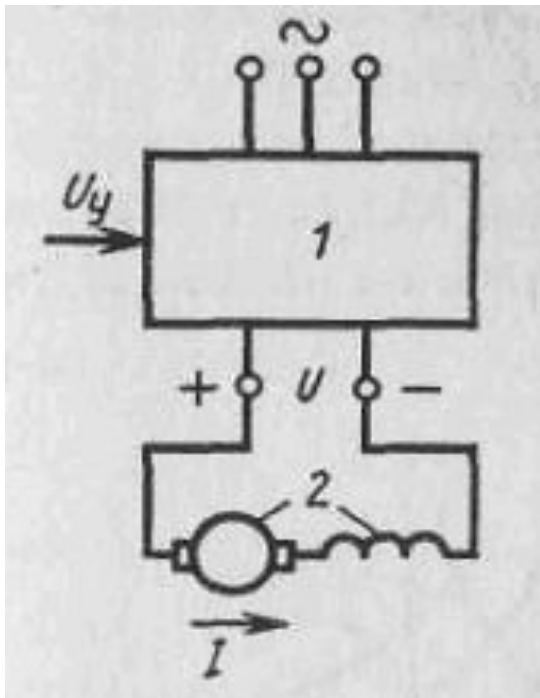
$M \rightarrow 0, I \rightarrow 0, I_{ш} \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0$ и скорость $\omega \rightarrow \infty$

Регулирование изменением напряжения

$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

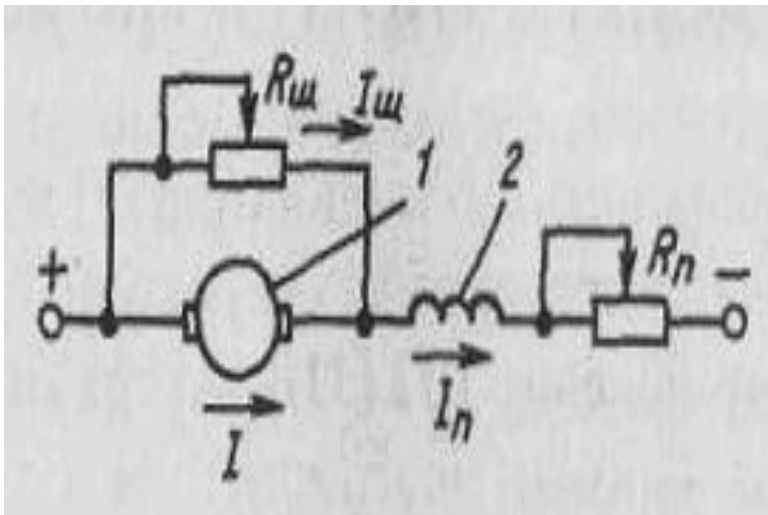
$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - IR / [k\Phi(I)]$$



$I \rightarrow 0, M \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0$ скорость $\omega \rightarrow \infty$

Шунтирование якоря



$$U = E + IR;$$

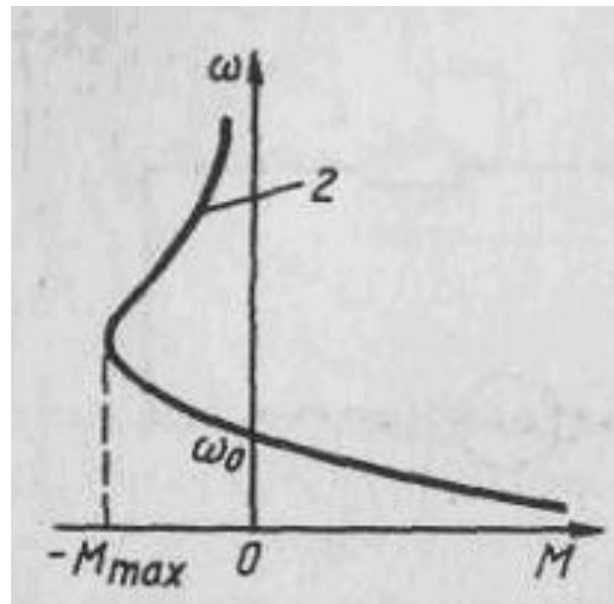
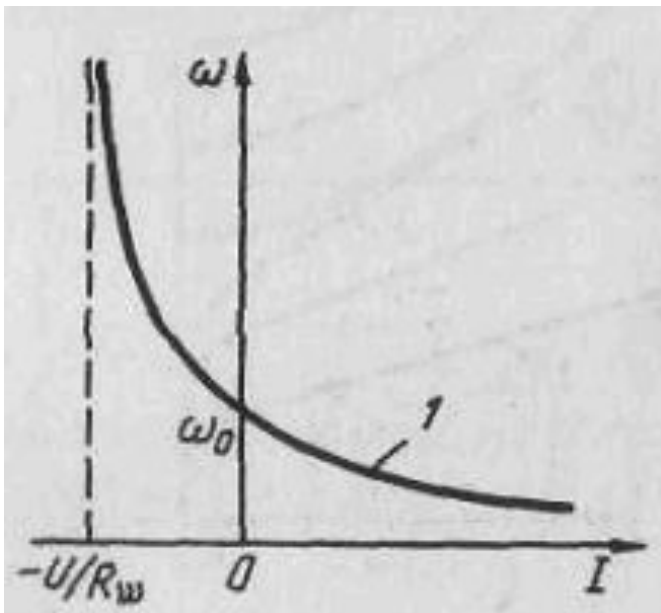
$$E = k\Phi\omega;$$

$$M = k\Phi I,$$

$$\omega = U/[k\Phi(I)] - IR/[k\Phi(I)]$$

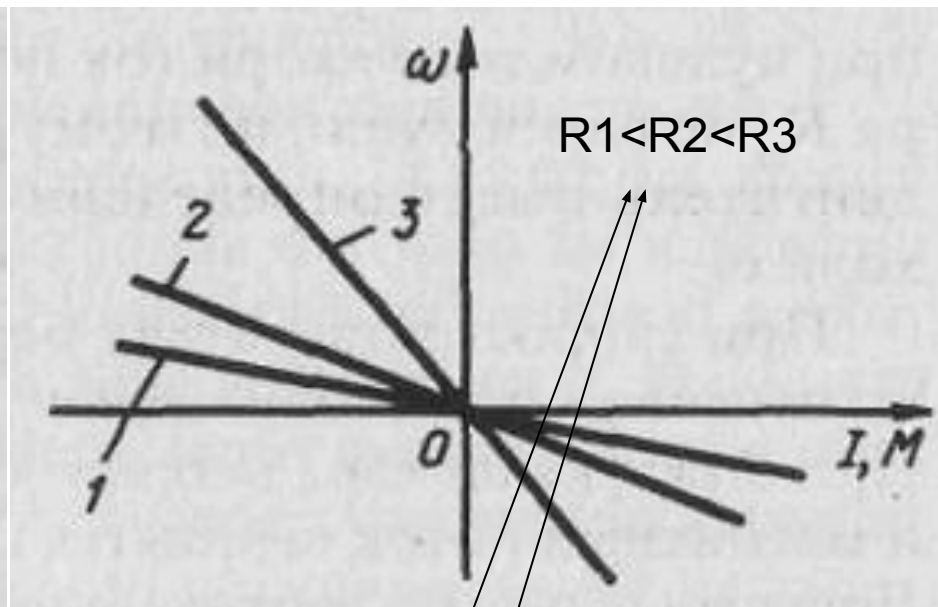
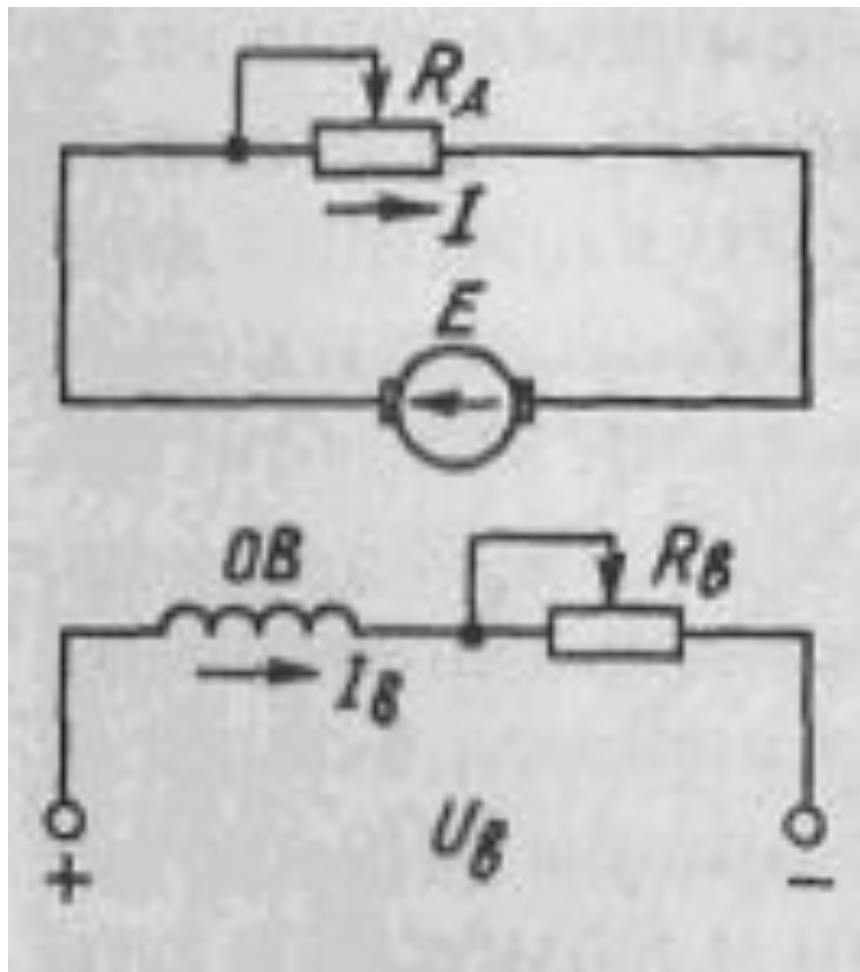
$$\omega = (U - IR)/[k\Phi(I)];$$

$$\omega = U/[k\Phi(I)] - MR/[k\Phi(I)]^2,$$



Торможение ДПТПВ

Динамическое торможение с независимым возбуждением



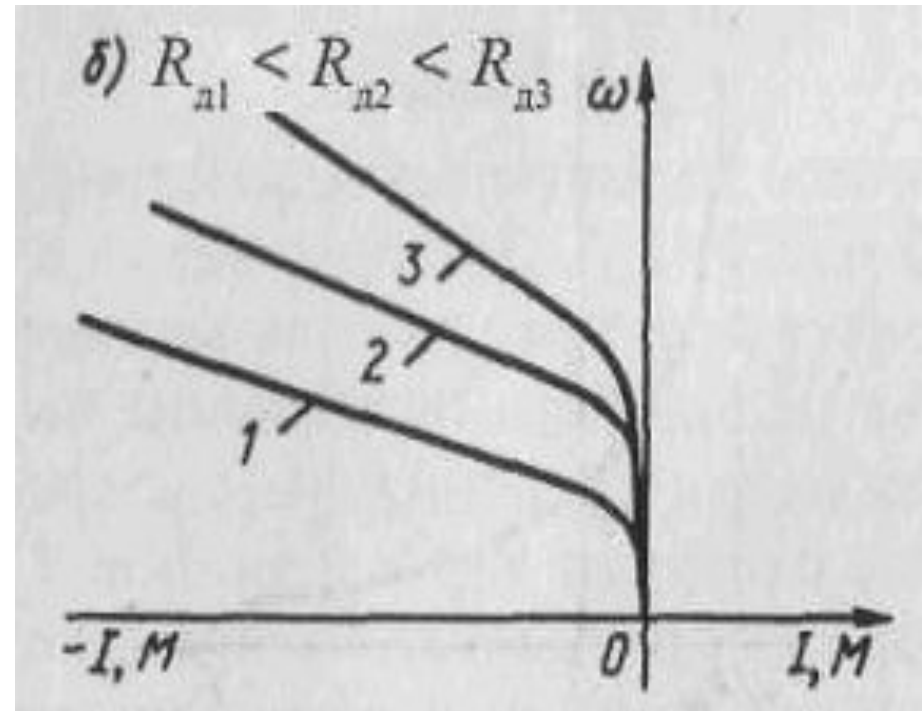
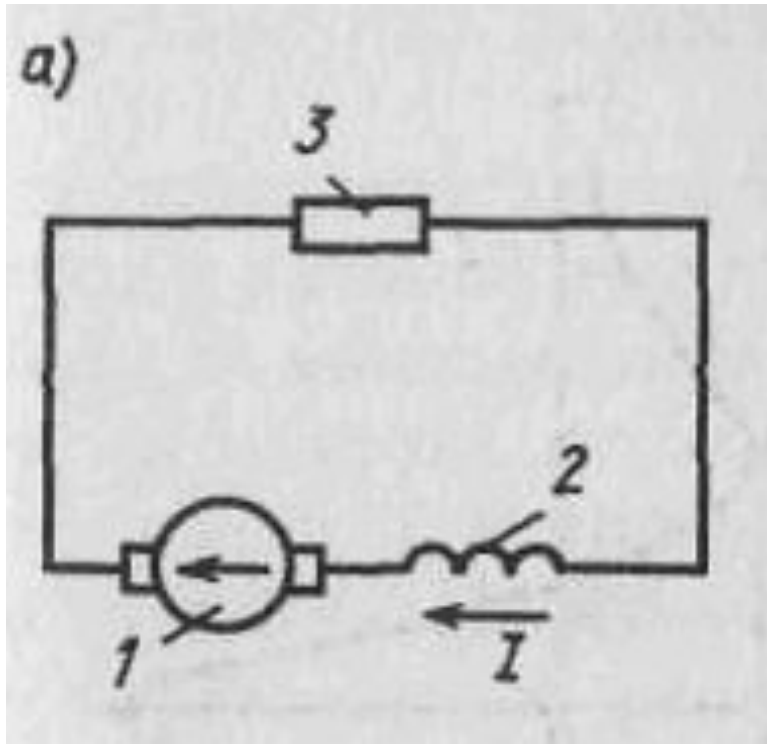
$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

$$\omega = -IR / (k\Phi);$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2.$$

Динамическое торможение с самовозбуждением



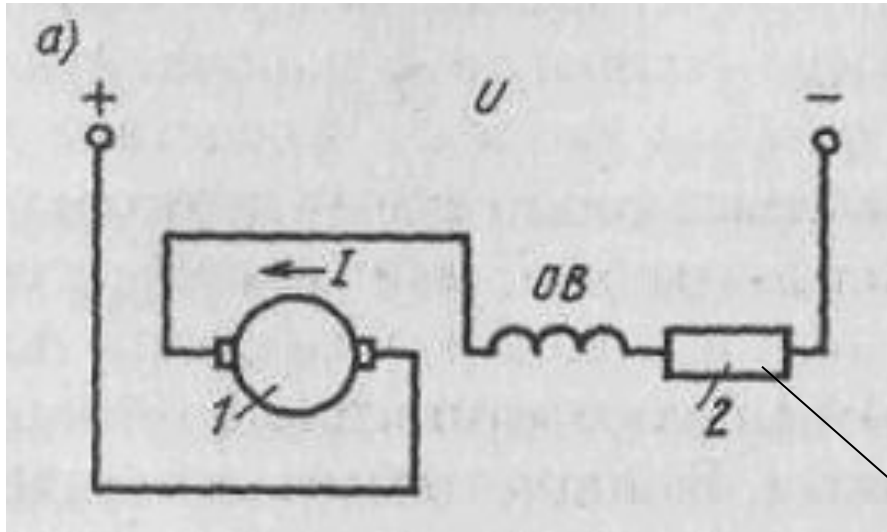
Условия самовозбуждения:

- наличие $\Phi_{\text{ост}}$;
- совпадение по направлению Фост и основного Φ ;
- сопротивление цепи якоря меньше критического

$$\omega = -IR / (k\Phi);$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2.$$

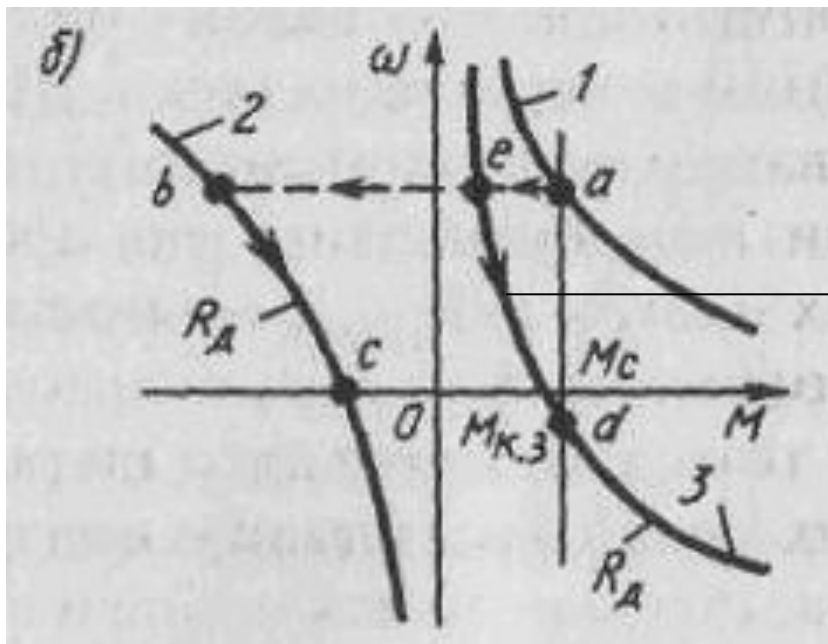
Торможение противовключением



$$M = k\Phi I$$

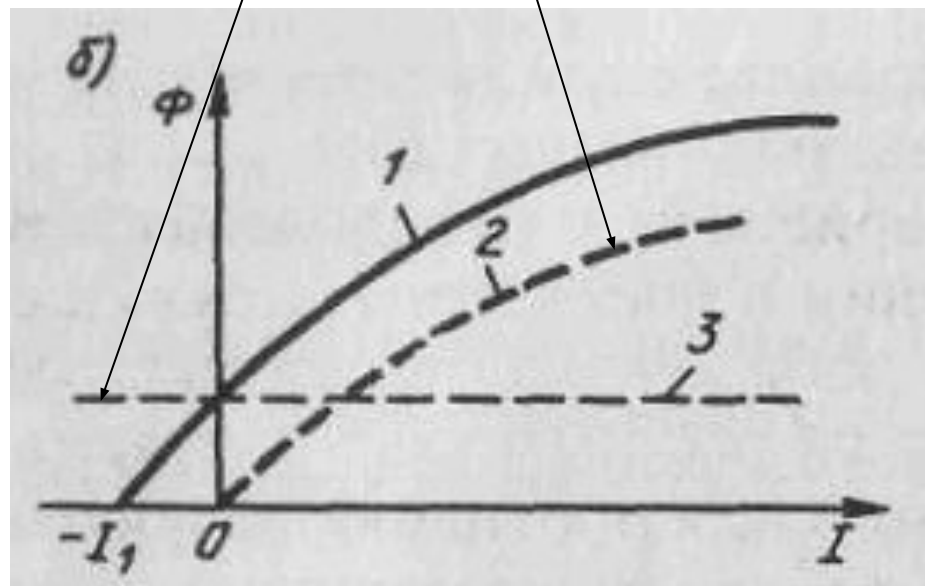
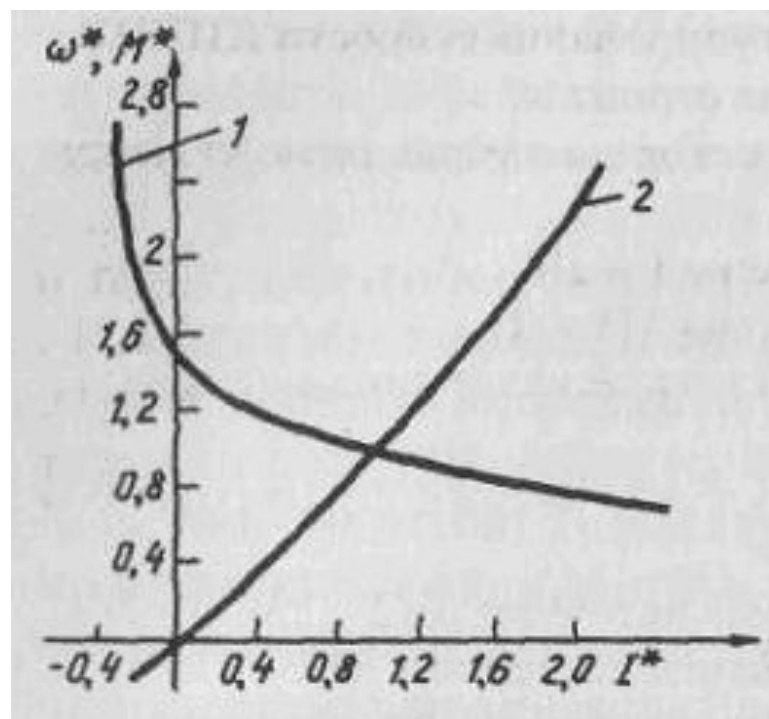
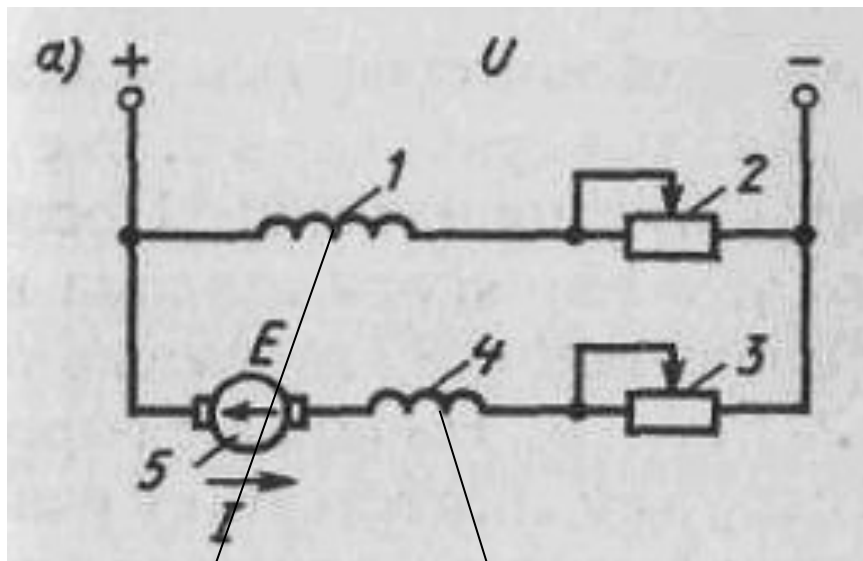
Осуществляется изменением полярности напряжения на обмотке якоря при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения (или наоборот)

↙ для ограничения тока



- Торможение включением R_d при условии $M_c > M_{k3}$

Электропривод с ДПТ смешанного возбуждения



$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)];$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2,$$

Электропривод с ДПТ смешанного возбуждения (продолжение)

Поскольку характеристики ДПТСМ располагаются и во втором квадранте, это означает, что он **может работать во всех возможных энергетических режимах. Регулирование координат ЭП с этим типом ДПТСМ может осуществляться:**

- **изменением напряжения,**
 - **магнитного потока**
 - **и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря.**
- ДПТСМ обеспечивает также следующие режимы торможения ЭП:
- **динамическое с независимым возбуждением и самовозбуждением,**
 - **противовключением**
 - **и рекуперативное.**

Отметим, что наличие двух обмоток возбуждения **существенно увеличивает расход материалов на изготовление двигателя и тем самым его массу, габаритные размеры и стоимость.**

По этой причине этот тип двигателя в настоящее время **применяется только в тех случаях, когда его использование диктуется какими-либо специфическими требованиями и подтверждается технико-экономическими расчетами.**