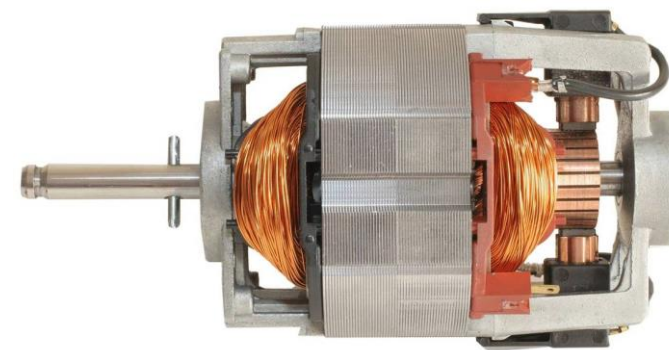


Коллекторные двигатели

Коллекторные микродвигатели
постоянного и переменного тока



Коллекторные микродвигатели

Отличительная особенность – наличие щеточно-коллекторного узла

Недостатки

- » наличие щеточно-коллекторного узла
 - низкая надежность
 - необходимость периодического ухода
 - шум и радиопомехи

Достоинства

- » возможность получения любых n при любой частоте сети
- » простое, плавное и экономичное регулирование n
- » сравнительно высокий КПД
- » хорошие пусковые свойства (большой момент, малый ток)
- » хорошие массогабаритные показатели

Особенности микродвигателей – по сравнению с известными ДПТ

- » нет дополнительных полюсов и компенсационной обмотки
 - плохая коммутация
- » почти всегда только двухполюсное исполнение
- » относительно большие потери в меди и механические потери

Наибольшее распространение получили коллекторные микродвигатели с повышенной частотой вращения $n = 5,000 \dots 10,000$ об/мин

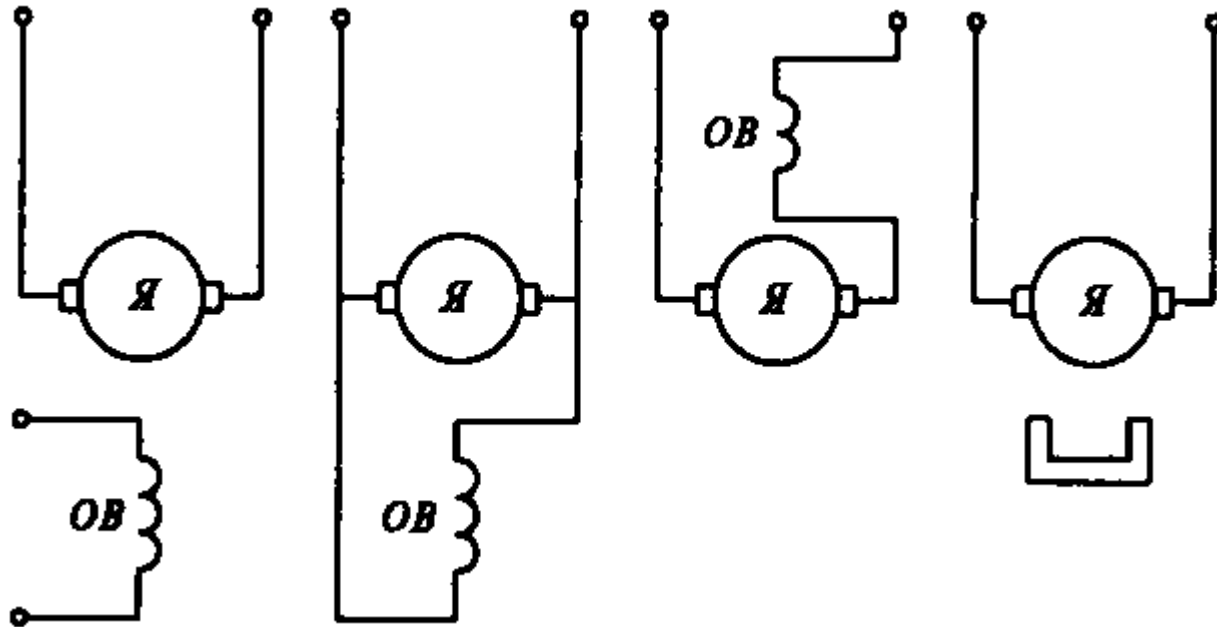
Теория коллекторных микродвигателей практически не имеет особенностей (по сравнению с теорией ДПТ средней и большой мощности)

Коллекторные двигатели постоянного тока

Микродвигатели

Схемы включения микродвигателей постоянного тока

Схемы включения аналогичны ДПТ



Независимое
возбуждение

Параллельное
возбуждение

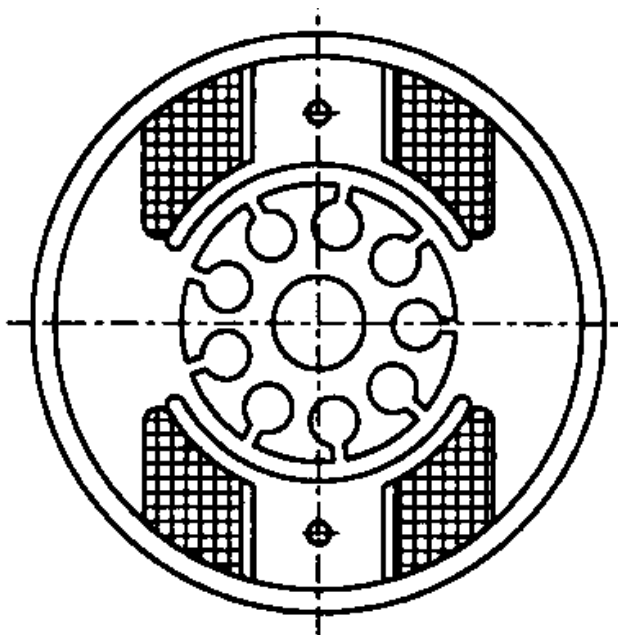
Последовательное
возбуждение

Возбуждение
от постоянных
магнитов

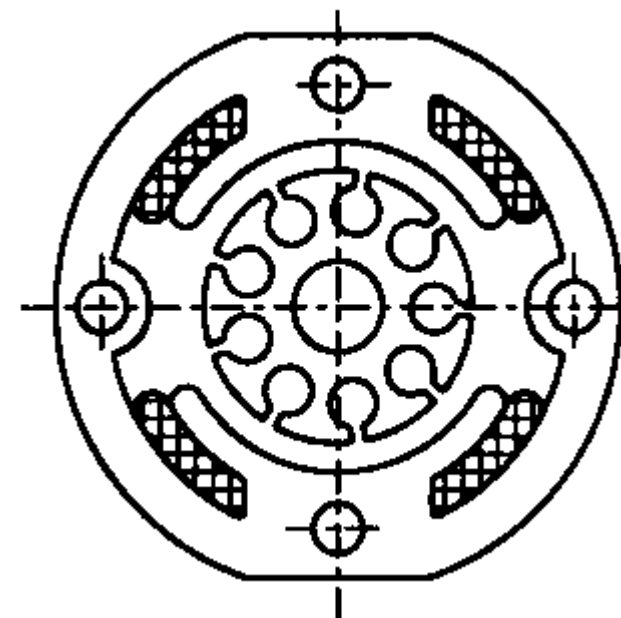
- » не применяется смешанное возбуждение
- » часто применяется возбуждение от ПМ

Конструкции микродвигателей постоянного тока

Классический вариант статора – целая станина + полюсы с обмоткой возбуждения
Полюсы сплошные или шихтованные



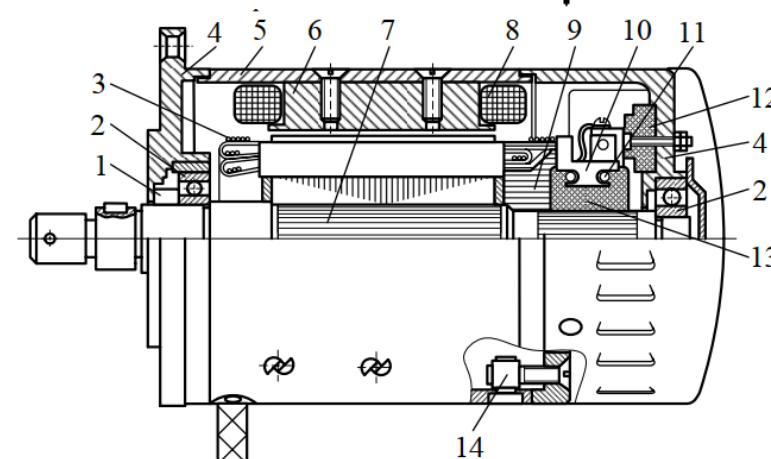
Иногда полюс и станина штампуются как единое целое



Якорь – штампованный со скосом пазов на t_z
Обмотка якоря – петлевая, реже волновая

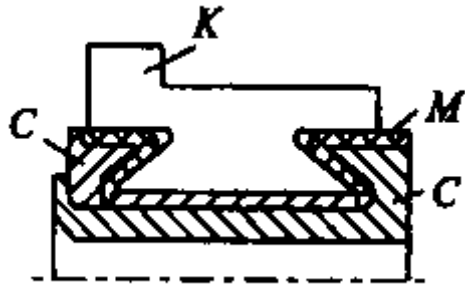
Особенность маленького якоря – малое число зубцов
→ особое внимание оптимизации полюсной дуги

Общий вид микродвигателя постоянного тока



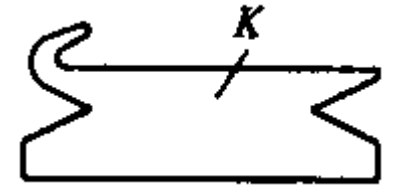
Конструкции микродвигателей постоянного тока

В высокоскоростных микродвигателя коллекторы аналогичны традиционным ДПТ

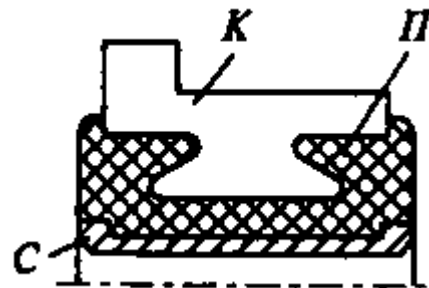


K – коллекторная пластина
C – сталь
M – миканит

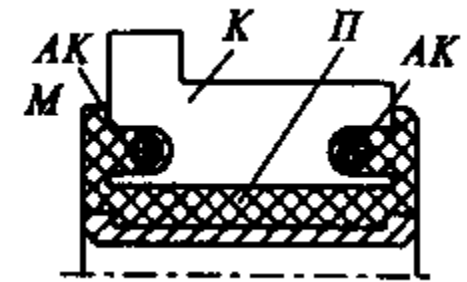
Для автоматизации
производства – крючки
вместо петушков



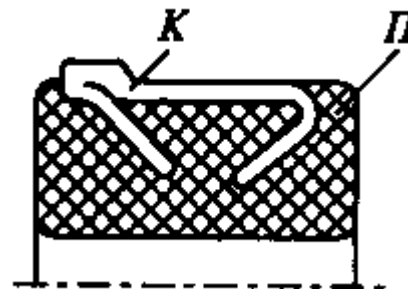
Чаще делают
пластмассовый
коллектор
(*П* – пластмасса)



Для прочности
добавляют
армирующие
кольца (АК)



В самых маленьких двигателях
– коллекторные пластины
из проволоки в пластмассе



Щеточный узел – традиционный
щеткодержатели / пружины / щетки

Конструкции микродвигателей постоянного тока

Магнитные системы микродвигателей с возбуждением от ПМ

» ферриты или литые сплавы ЮНДК

а) радиальное намагничивание

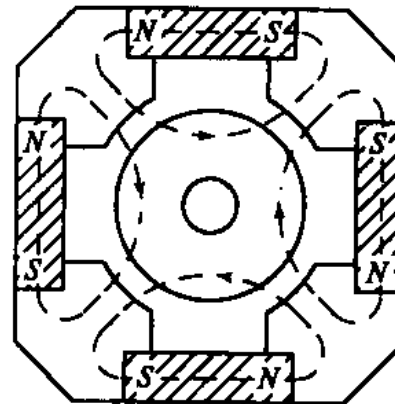
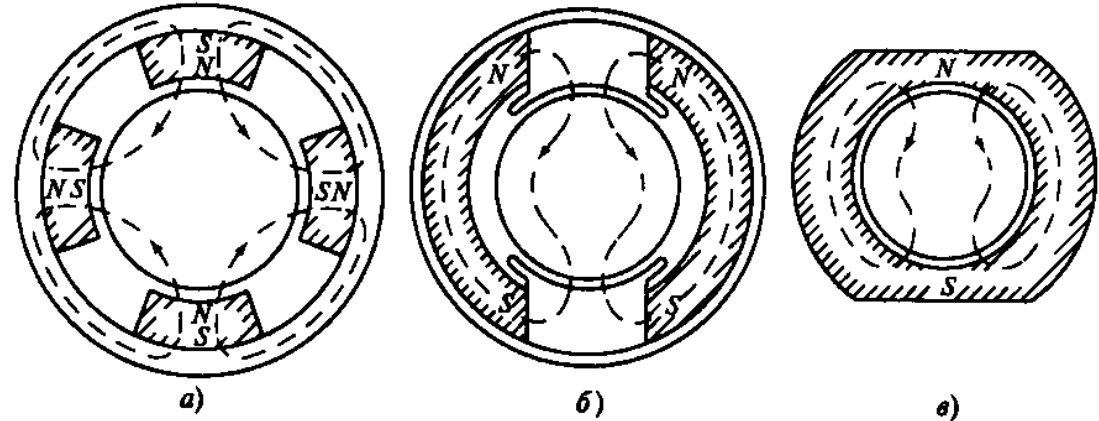
- простая конструкция
- станина – магнитопровод
- малая МДС магнита $F = H_c h_M$

б) тангенциальное намагничивание

- больше МДС в малом объеме
- сложно намагнитить

в) вариант для очень маленькой мощности

» редкоземельные магниты –
бруски/призмы простой формы +
концентраторы магнитного потока



Конструкции микродвигателей постоянного тока

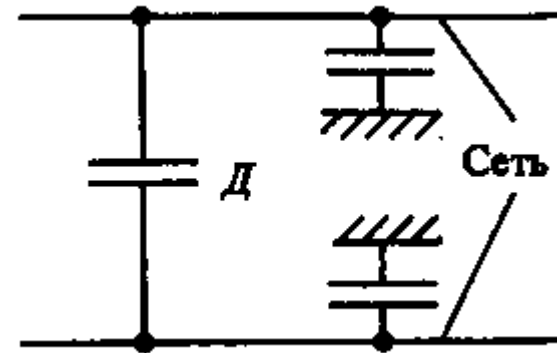
ДПТ ответственных систем часто имеют стабилизацию частоты вращения

- » центробежный выключатель r_d в цепи якоря или ОВ (точность 3...5%)
- » электронный регулятор тока ОВ с датчиком скорости (точность до 0,01%)

Коммутация – изменение тока в замкнутых щетками секциях ОЯ

- » пульсации ЭДС и тока якоря
- » гармоники тока в питающей сети
- » искрение на коллекторе

Для защиты – блокировочные конденсаторы
Иногда – экранирование и электрические фильтры,
симметрирование ОВ



Уравнения и характеристики

Двигатель с параллельным возбуждением

Уравнение баланса напряжений $U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}} = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{щ}} + r_{\text{д}})$

ЭДС якоря $E_{\text{я}} = c_E n \Phi$ где $c_E = \frac{pN}{60a}$ Ток якоря $I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{\Sigma r_{\text{я}}}$

При пуске $n = 0 \rightarrow E_{\text{я}} = 0 \rightarrow$ пусковой ток $I_{\text{я.к}} = \frac{U}{\Sigma r_{\text{я}}}$ (в машинах малой мощности можно не ограничивать)

Частота вращения может быть выражена как $n = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_E \Phi}$

Вращающий момент $M = c_M \Phi I_{\text{я}}$ где $c_M = \frac{pN}{2\pi a}$

Рабочие характеристики ДПТ

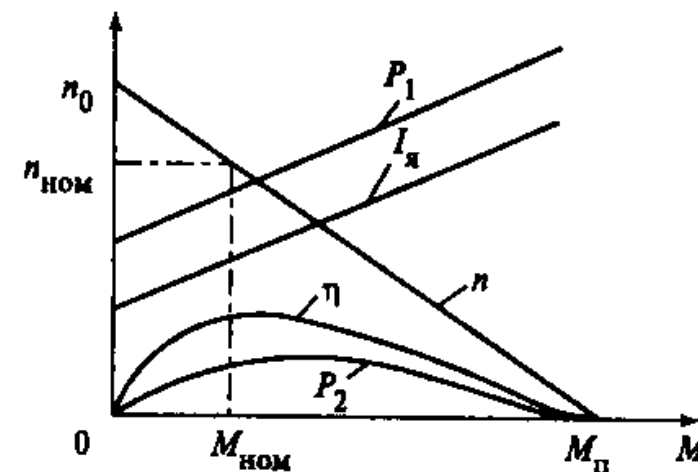
» зависимость $n, I_{\text{я}}, P_1, P_2, \eta$ от момента нагрузки M при постоянных $I_{\text{в}}$ и U

$$n = n_0 - \frac{I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_E \Phi} = n_0 - \frac{\Sigma r_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M \quad \text{где} \quad n_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$$

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{c_M \Phi} \quad P_1 = UI_{\text{я}} \quad P_2 = \frac{2\pi n M}{60} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Способы регулирования n

- » изменение U
- » изменение $r_{\text{д}}$ в цепи якоря
- » изменение Φ (тока ОБ)



Уравнения и характеристики

Двигатель с последовательным возбуждением

Магнитный поток пропорционален току якоря $\Phi = c_{\Phi} I_{\text{я}}$

Вращающий момент $M = c_M \Phi I_{\text{я}} = c_M c_{\Phi} I_{\text{я}}^2$

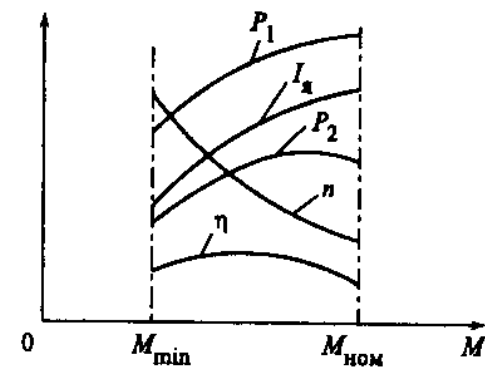
Уравнение баланса напряжений $U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}} = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{щ}} + r_{\text{д}} + r_{\text{в}})$

Тогда частота вращения может быть выражена как $n = \frac{U / I_{\text{я}} - \Sigma r_{\text{я}}}{c_E c_{\Phi}}$

Механическая характеристика $n = \frac{U}{c_E \sqrt{c_{\Phi} / c_M} \sqrt{M}} - \frac{\Sigma r_{\text{я}}}{c_E c_{\Phi}}$

Рабочие характеристики ДПТ

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M}{c_M c_{\Phi}}} \quad P_1 = U I_{\text{я}} \quad P_2 = \frac{2\pi n M}{60} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

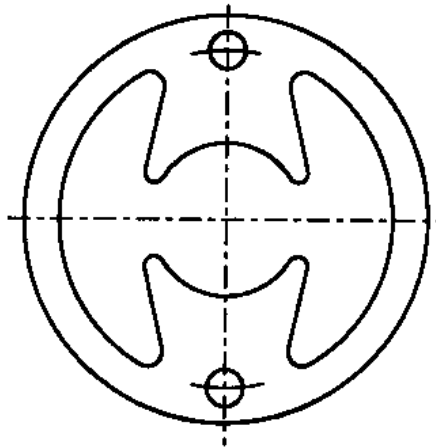


Коллекторные двигатели переменного тока микродвигатели

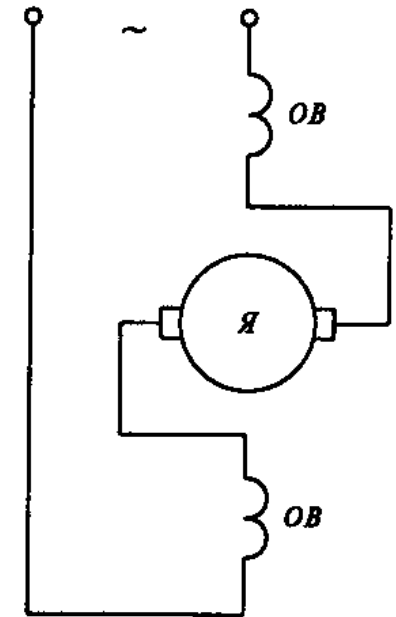
Особенности коллекторных двигателей переменного тока

На практике применяются однофазные коллекторные двигатели с последовательным возбуждением

Конструкция КД аналогична ДПТ,
но станина и полюсы всегда шихтованные
(из-за вихревых токов при переменном потоке)



Кроме того, всегда применяется симметрирование
(две половины обмотки возбуждения
с разных сторон якоря)



Особенности коллекторных двигателей переменного тока

Уравнение баланса напряжений сложнее, т.к. нельзя не учитывать ЭДС, наводимые в ОЯ и ОВ переменным потоком

Пульсирующий поток ОВ $\Phi_B = \Phi_{Bm} \sin \omega_1 t$ наводит

- » ЭДС самоиндукции в ОВ $E_B = 4,44 f_1 w_B \Phi_{Bm}$
 - отстает от потока Φ_B на $\pi/2$ во времени
- » ЭДС рассеяния ОВ $E_{B\sigma} = -j x_{\sigma B} I_B$
 - отстает от тока $I_B = I_{я}$ на $\pi/2$
- » ЭДС вращения в ОЯ $E_{вр} = c_E n \Phi_{Bm} / \sqrt{2}$
 - отстает от потока Φ_B на $\pi/2$ в пространстве, но совпадает во времени

ЭДС можно выразить как $E_{вр} = 4 f_{я} w_{я} \Phi_{Bm}$

где $f_{я} = \frac{pn}{60}$ – частота якоря $w_{я} = \frac{N}{4a}$ – число витков в одной параллельной ветви ОЯ

Кроме того, переменный ток якоря $i_{я} = \sqrt{2} I_{я} \sin(\omega_1 t + \beta)$ создает поток ротора $\Phi_{яq}$, который в свою очередь наводит

- » ЭДС самоиндукции в ОЯ $E_{яq} = 4,44 f_1 w_{я} k_{оя} \Phi_{яq}$ (где обмоточный коэффициент ОЯ $k_{оя} = 2/\pi$)
 - отстает от потока $\Phi_{яq}$ на $\pi/2$ во времени
- » ЭДС рассеяния ОЯ $E_{я\sigma} = -j x_{\sigma я} I_{я}$
 - отстает от тока $I_{я}$ на $\pi/2$

Особенности коллекторных двигателей переменного тока

Уравнение баланса напряжений

$$\dot{U} = -\dot{E}_B - \dot{E}_{B\sigma} + \dot{I}_я r_B - \dot{E}_{яq} - \dot{E}_{я\sigma} + \dot{I}_я r_я - \dot{E}_{вр}$$

Векторная диаграмма

(без учета потерь в стали от $\Phi_{B\sigma}$, $\Phi_{я\sigma}$ и $\Phi_{яq}$, т.е. в предположении, что $E_{B\sigma}$, $E_{я\sigma}$ и $E_{яq}$ отстают от $I_я$ на $\pi/2$)

Запишем ЭДС через индуктивные параметры и ток $I_B = I_я$

$$\dot{E}_{B\sigma} = -j\dot{I}_я x_{B\sigma} \quad \dot{E}_{я\sigma} = -j\dot{I}_я x_{я\sigma}$$

Пренебрегая потерями в стали (углом между током и потоком)

$$\dot{E}_{яq} = -j\dot{I}_я x_{яq} \quad \dot{E}_B = -j\dot{I}_я x_B$$

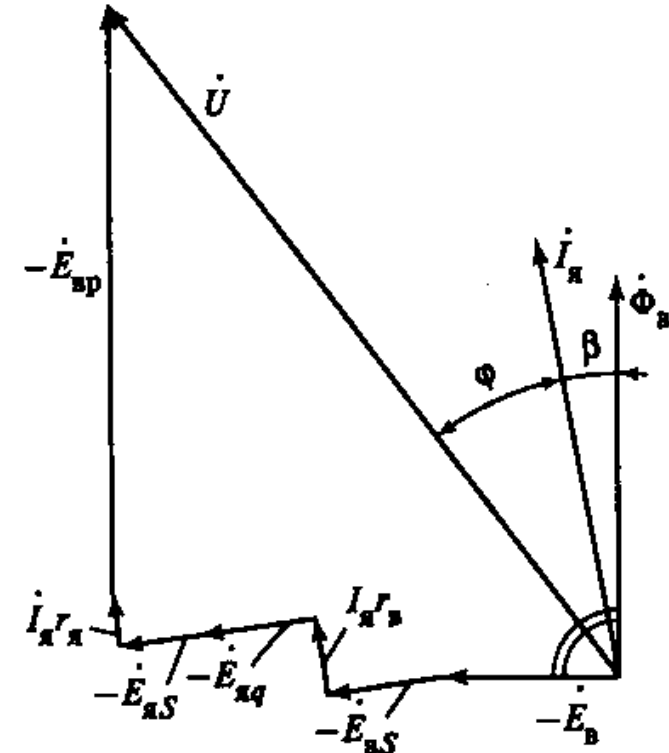
Уравнение баланса напряжений запишется как

$$\dot{U} = j\dot{I}_я x_B + j\dot{I}_я x_{B\sigma} + \dot{I}_я r_B + j\dot{I}_я x_{яq} + j\dot{I}_я x_{я\sigma} + \dot{I}_я r_я - \dot{E}_{вр}$$

или
$$\dot{U} = -\dot{E}_{вр} + \dot{I}_я r + j\dot{I}_я x = -\dot{E}_{вр} + \dot{I}_я Z$$

где
$$r = r_B + r_я \quad x = x_B + x_{B\sigma} + x_{яq} + x_{я\sigma}$$

Уравнение аналогично уравнению ДПТ, только оно векторное и учитывает x



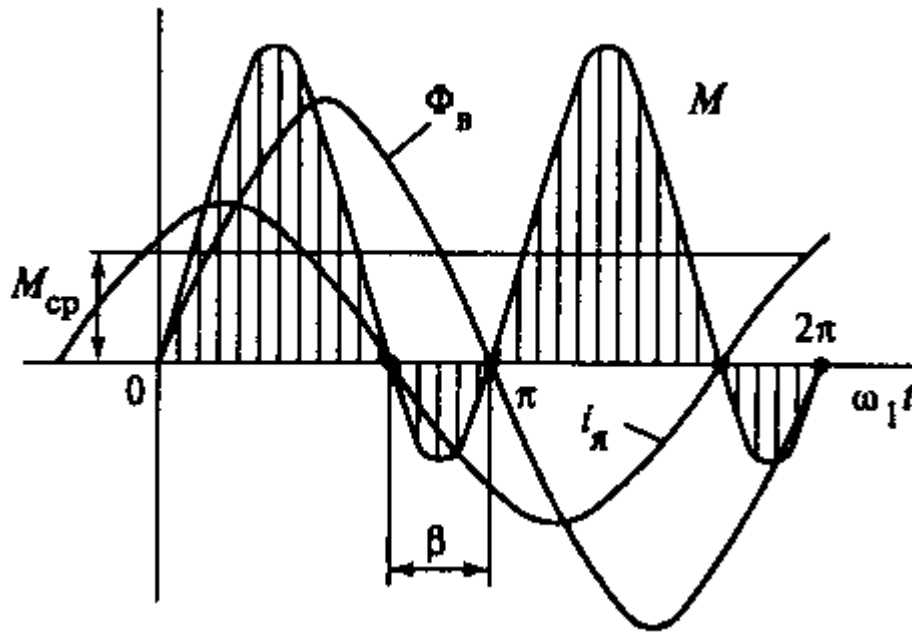
Частоту вращения можно выразить как в ДПТ
$$n = \left| \frac{\sqrt{2}(\dot{U} - \dot{I}_я Z)}{c_E \Phi_m} \right|$$

→ способы регулирования n аналогичны ДПТ

Вращающий момент

Вращающий момент – результат взаимодействия тока якоря $i_{\text{я}}$ с потоком полюсов $\Phi_{\text{в}}$

$$M = c_M i_{\text{я}} \Phi_{\text{в}} = c_M \sqrt{2} I_{\text{я}} \sin(\omega_1 t + \beta) \Phi_{\text{вм}} \sin \omega_1 t$$



Момент переменный – изменяется по величине и меняет знак (из-за фазового сдвига β вследствие потерь в стали)

Можно переписать выражение для момента

$$M = \frac{1}{2} c_M \sqrt{2} I_{\text{я}} \Phi_{\text{вм}} \cos \beta - \frac{1}{2} c_M \sqrt{2} I_{\text{я}} \Phi_{\text{вм}} \cos(2\omega_1 t + \beta) = M_{\text{ср}} + M_{\text{пер}}$$

На практике можно измерить лишь средний момент
Пульсации момента имеют двойную частоту
и при больших J не влияют на среднюю скорость

Соотношение среднего и переменного моментов зависит от β
Если $\beta = 0$, амплитуда $M_{\text{пер}}$ равна $M_{\text{ср}}$ и результирующий момент не имеет отрицательных значений

Механическая характеристика $n = f(M)$ аналогична характеристике ДПТ последовательного возбуждения (гипербола)

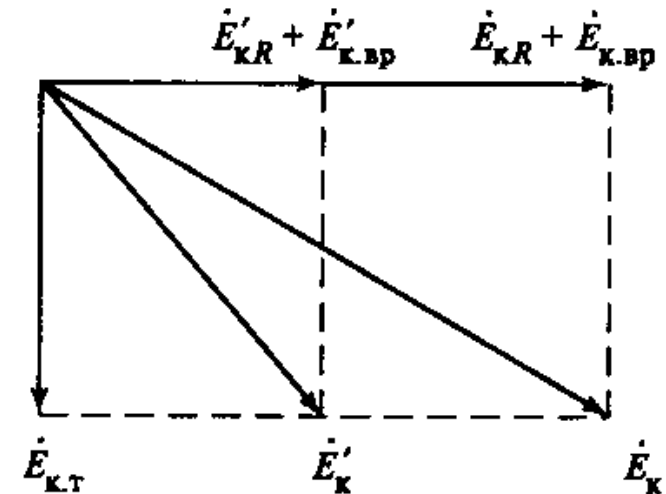
Коммутация в коллекторном двигателе

Недостаток однофазного коллекторного двигателя – плохая коммутация (значительное искрение под щетками)

В коммутируемой секции кроме реактивной ЭДС $E_{кR}$ и ЭДС вращения $E_{к.вр}$ также наводится ЭДС трансформаторная $E_{к.Т}$ (из-за пульсации Φ_B), т.к. ось коммутируемой секции совпадает с осью полюсов

- » величины $E_{кR}$ и $E_{к.вр}$ зависят от n и нагрузки (I_A)
- » величина трансформаторной ЭДС $E_{к.Т}$ не зависит от n , ни от нагрузки, но сдвинута по фазе относительно $E_{кR}$ и $E_{к.вр}$ на $\pi/2$

Это затрудняет минимизацию суммарной ЭДС в коммутируемой секции



Универсальный коллекторный двигатель

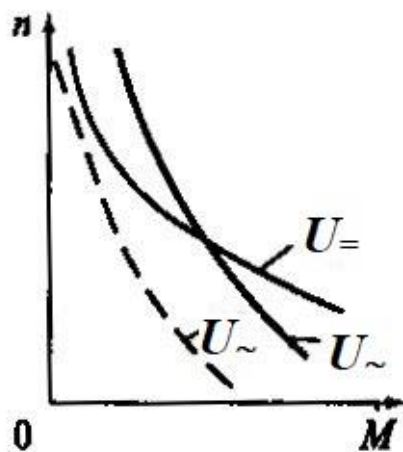
УКД способен работать от сети как постоянного, так и переменного тока

Конструкция УКД аналогична коллекторным двигателям переменного тока последовательного возбуждения

Отличительная особенность – дополнительные средние выводы у ОВ

- » при работе на постоянном токе – вся ОВ под напряжением U_{\pm}
- » при работе на переменном токе – напряжение U_{\sim} подается на часть витков ОВ

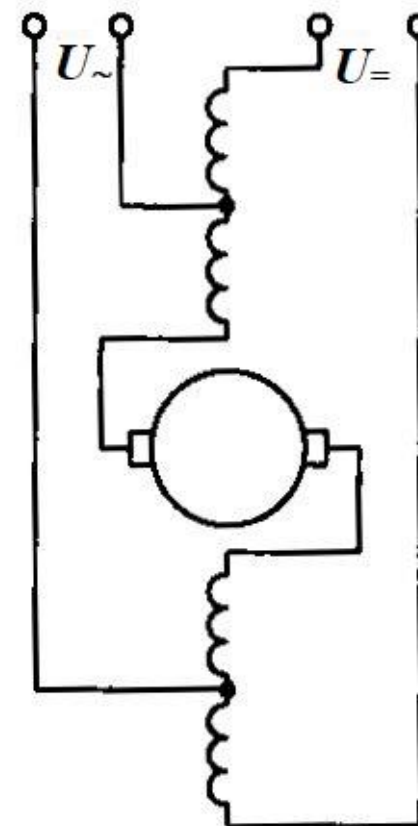
Цель переключения – сближение механических характеристик на постоянном и переменном токе, получение одинаковой мощности при номинальной n



При одинаковом числе витков ОВ момент УКД на постоянном токе больше, чем на переменном
Уменьшение $w_{\text{в}}$ при том же токе уменьшает МДС и поток $\Phi_{\text{в}}$ и «поднимает» механическую характеристику


При работе на переменном токе

- » ток УКД больше (+ намагничивающий ток)
- » потери больше (потери в стали + потери от бóльшего тока)
- » искрение, шум и помехи больше (+ трансформаторная ЭДС в коммутируемых секциях)




Далее

Тихоходные двигатели

 Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

 ShirinskiiSV@mpei.ru

 elmech.mpei.ac.ru/EMAU/
(srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/)

