

Вентильные двигатели

Разновидности, устройство, принцип действия



Вентильные двигатели / Бесконтактные двигатели

Вентильный двигатель получает питание от сети постоянного тока и обладает характеристиками двигателя постоянного тока

Основной недостаток двигателей постоянного тока – наличие щеточно-коллекторного узла (искрение, радиопомехи, износ щеток)

- » невозможно обеспечить надежность работы в тяжелых условиях эксплуатации (тряска, вибрация, меняющиеся температуры, вакуум)

В вентильном двигателе полупроводниковый коммутатор / преобразователь частоты

- » заменяет щеточно-коллекторный узел
- » сохраняя свойства и достоинства двигателя постоянного тока

Терминология

- » вентильный двигатель: инвертор [с ШИМ] + обычный АД/СДПМ → **sin** токи
- » бесконтактный / бесколлекторный двигатель постоянного тока: коммутатор с прямоугольным напряжением + ЭМ с сосредоточенными обмотками
- » Electronically commutated motor / Inverter-fed motor
- » BLDC – brushless direct current [motor]

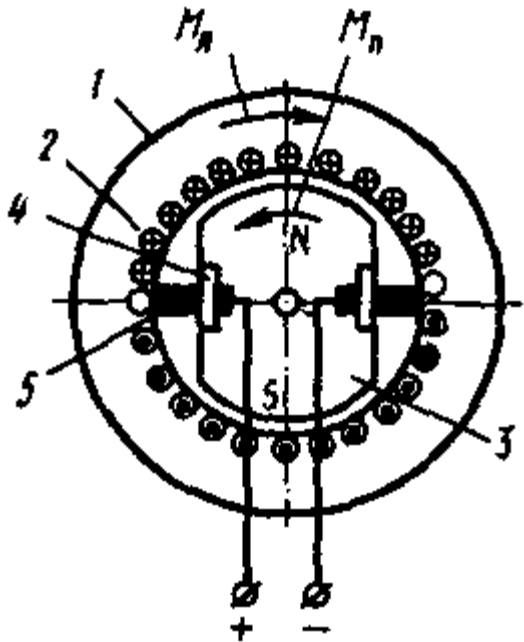
Здесь рассматривается бесконтактный ДПТ



Принцип действия вентильного двигателя (бесконтактного ДПТ)

Рассмотрим работу ДПТ обращенной конструкции

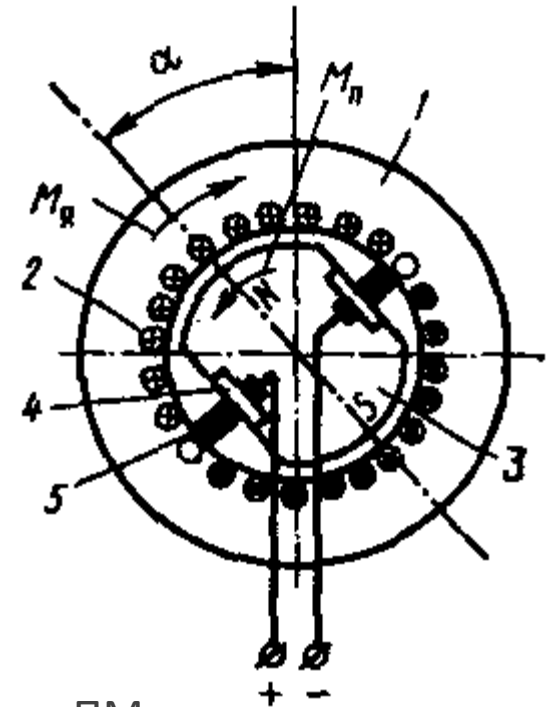
Пусть на роторе вращается индуктор (с ПМ), а якорь расположен вокруг него на статоре
Вместо коллектора – открытые проводники секций якорной обмотки
Щетки вращаются вместе с ротором, скользя по проводникам якоря



- 1 – неподвижный статор
- 2 – обмотка якоря
- 3 – ПМ на роторе
- 4 – щеткодержатель на роторе
- 5 – щетки

- » к щеткам подают напряжение постоянного тока
- » щетки подводят ток к якорю
- » по одну сторону линии щеток ток в якоре течет в одном направлении, по другую сторону – в противоположном направлении
- » вектор тока ОЯ перпендикулярен потоку ПМ
- » ток ОЯ взаимодействует с полем ПМ, создавая вращающий момент
- » Поворот щеток вместе с ротором изменяет распределение токов ОЯ

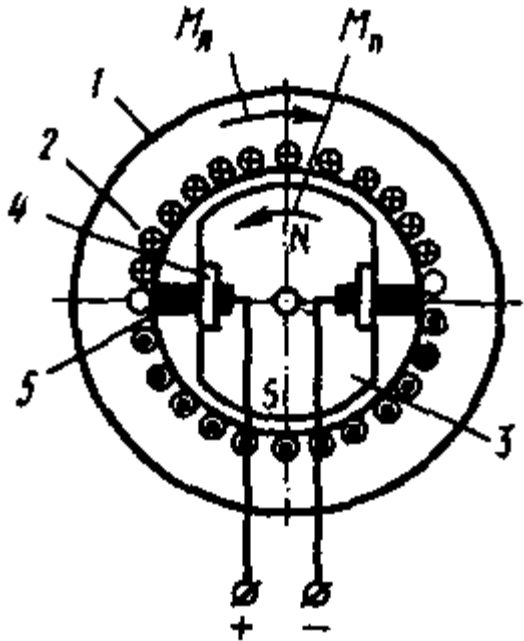
При этом вектор тока ОЯ остается перпендикулярен потоку ПМ
→ сохраняется вращающий момент
→ обеспечивается непрерывное вращение двигателя



Рассмотрим работу ДПТ обращенной конструкции

Под действием вращающего момента возрастает частота вращения n

При этом в якоре наводится ЭДС $E = c_E n \Phi$



В установившемся режиме напряжение питания двигателя

$$U = E + Ir = c_E n \Phi + Ir$$

При этом установившаяся частота вращения $n = \frac{U - Ir}{c_E \Phi}$

Ток якоря $I = \frac{U - E}{r}$

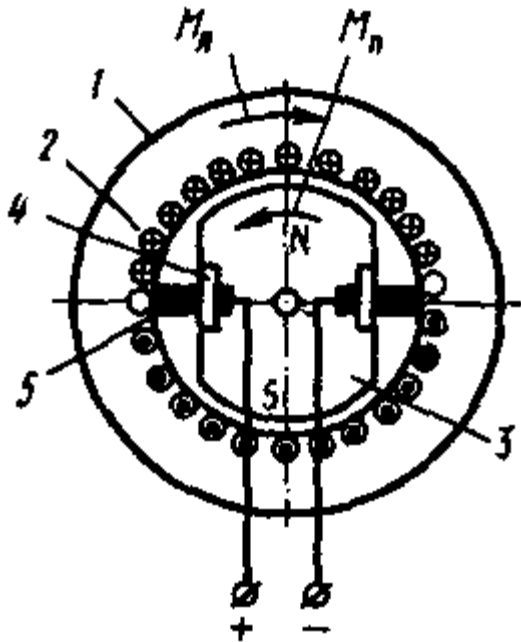
Вращающий момент $M = c_M I \Phi$ (в установившемся режиме момент двигателя уравнивает момент сопротивления)

Можно получить выражение для механической характеристики двигателя независимого возбуждения

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{Mr}{c_E c_M \Phi^2}$$

Принцип действия вентильного двигателя

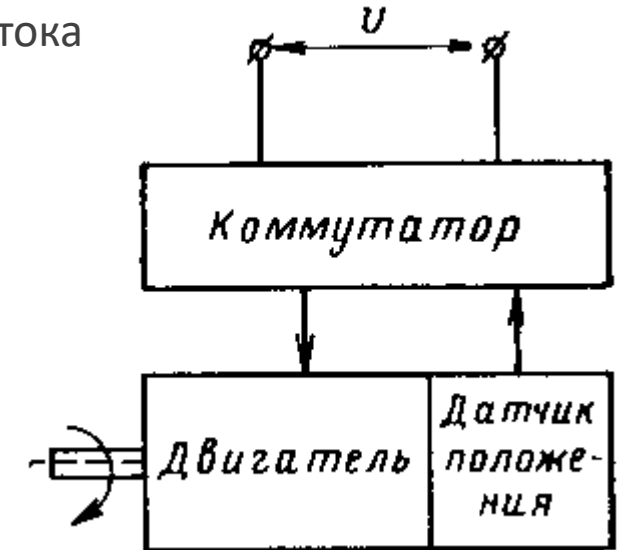
В ДПТ щетки с коллектором переключают секции обмотки якоря синфазно с вращением ротора



При неподвижном якоре можно переключать секции ОЯ с помощью статического коммутатора
Для управления моментами коммутации использовать сигналы датчика положения ротора

Получится бесконтактный двигатель постоянного тока

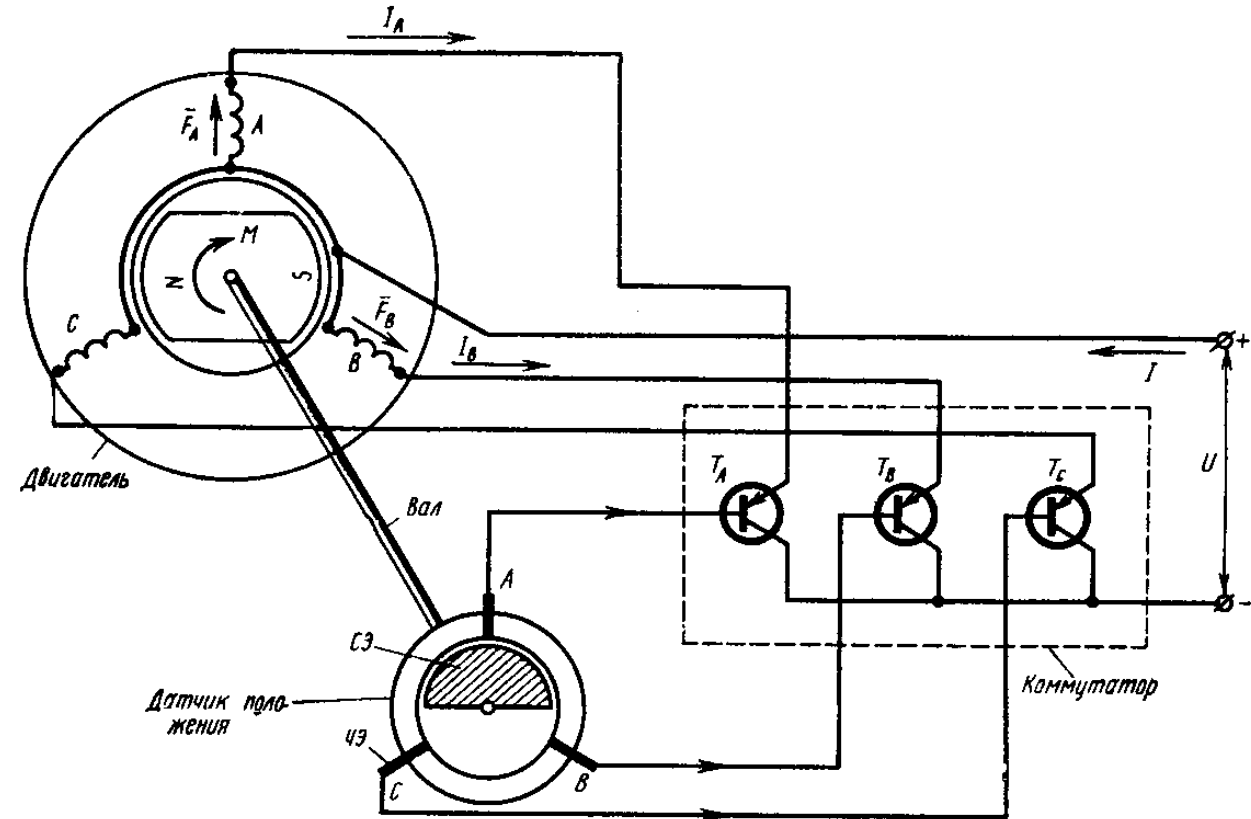
- » Двигатель с m -фазной обмоткой на статоре и ПМ на роторе (бесконтактное возбуждение)
- » Датчик положения ротора формирует сигнал синфазно с поворотом ротора
- » Коммутатор (бесконтактный / статический) переключает токи в обмотках обмотки якоря по сигналам датчика положения ротора



Принцип действия вентильного двигателя

Упрощенная схема бесконтактного двигателя

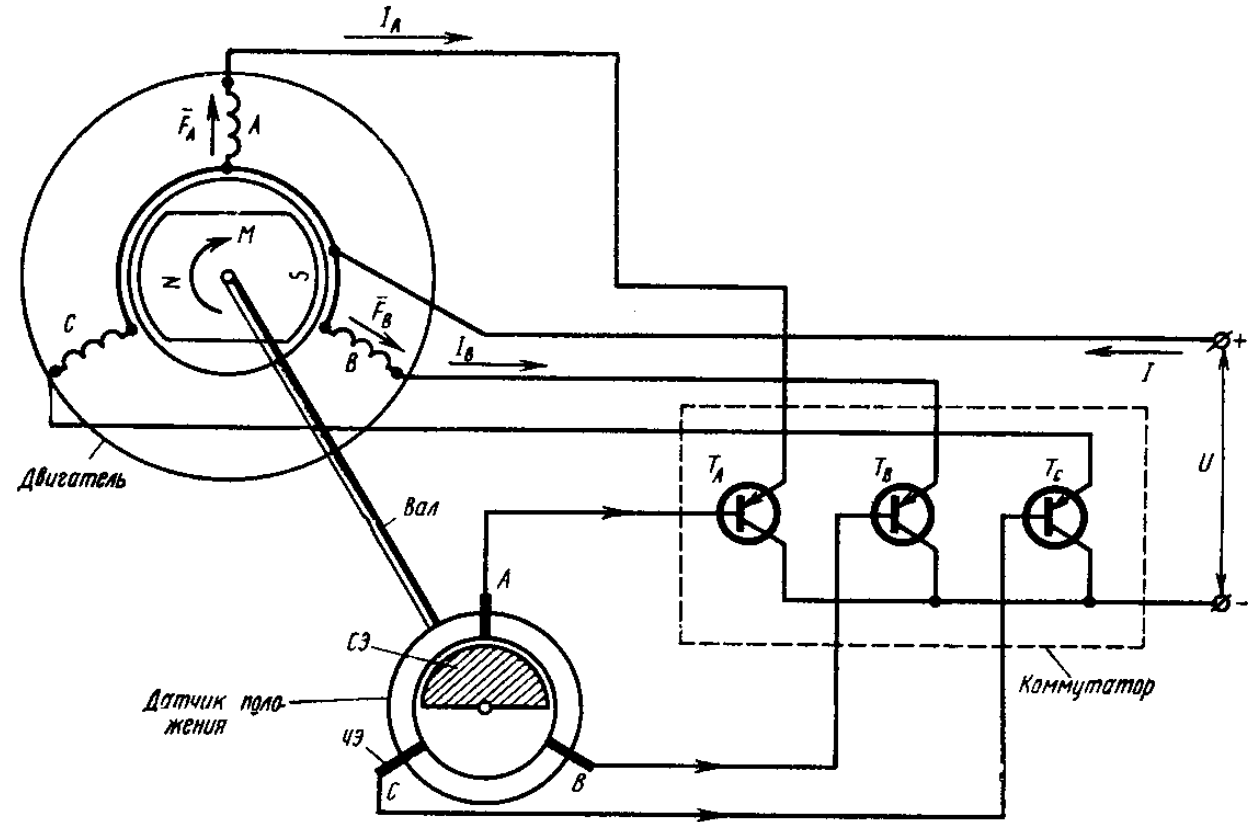
- » Двигатель: 3 обмотки на статоре (соединены в Y) и ПМ на роторе
- » Датчик: сигнальный элемент (сегмент 180°) и чувствительные элементы (число ЧЭ = числу обмоток, положение ЧЭ = положению осей фаз)
- » Коммутатор: 3 транзистора в режиме ключа (сигнал управления открывает транзистор и подключает обмотку к U сети постоянного тока)



Принцип действия вентильного двигателя

Положение 1 (пусть $\alpha = 0$)

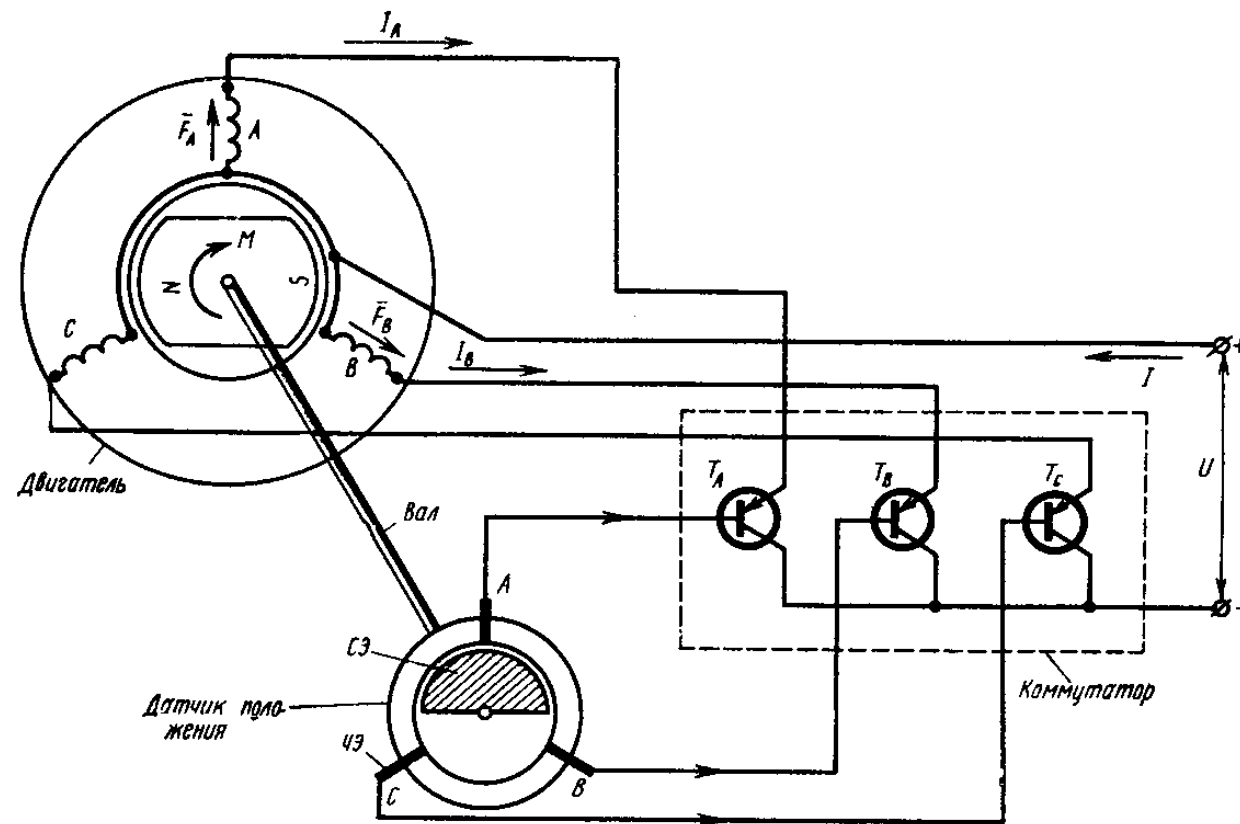
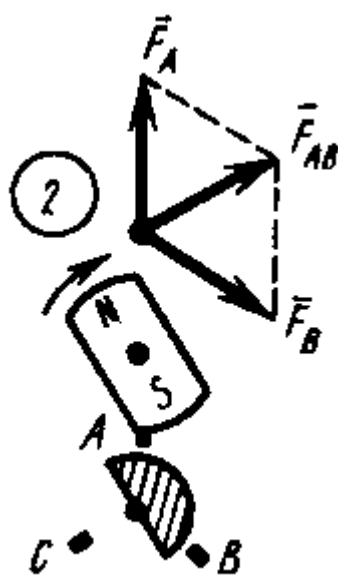
- » сигнальный элемент датчика – возле ЧЭ обмотки A
- » открыт транзистор T_A
- » подается напряжение на обмотку A
- » транзисторы T_B и T_C закрыты
- » протекает ток I_A
- » МДС обмотки якоря $F = F_A$
- » МДС F взаимодействует с $\Phi_{\text{ПМ}}$
- » создается вращающий момент
- » поворачивается ротор



Принцип действия вентильного двигателя

Положение 2 (поворот на $\alpha > 30^\circ$)

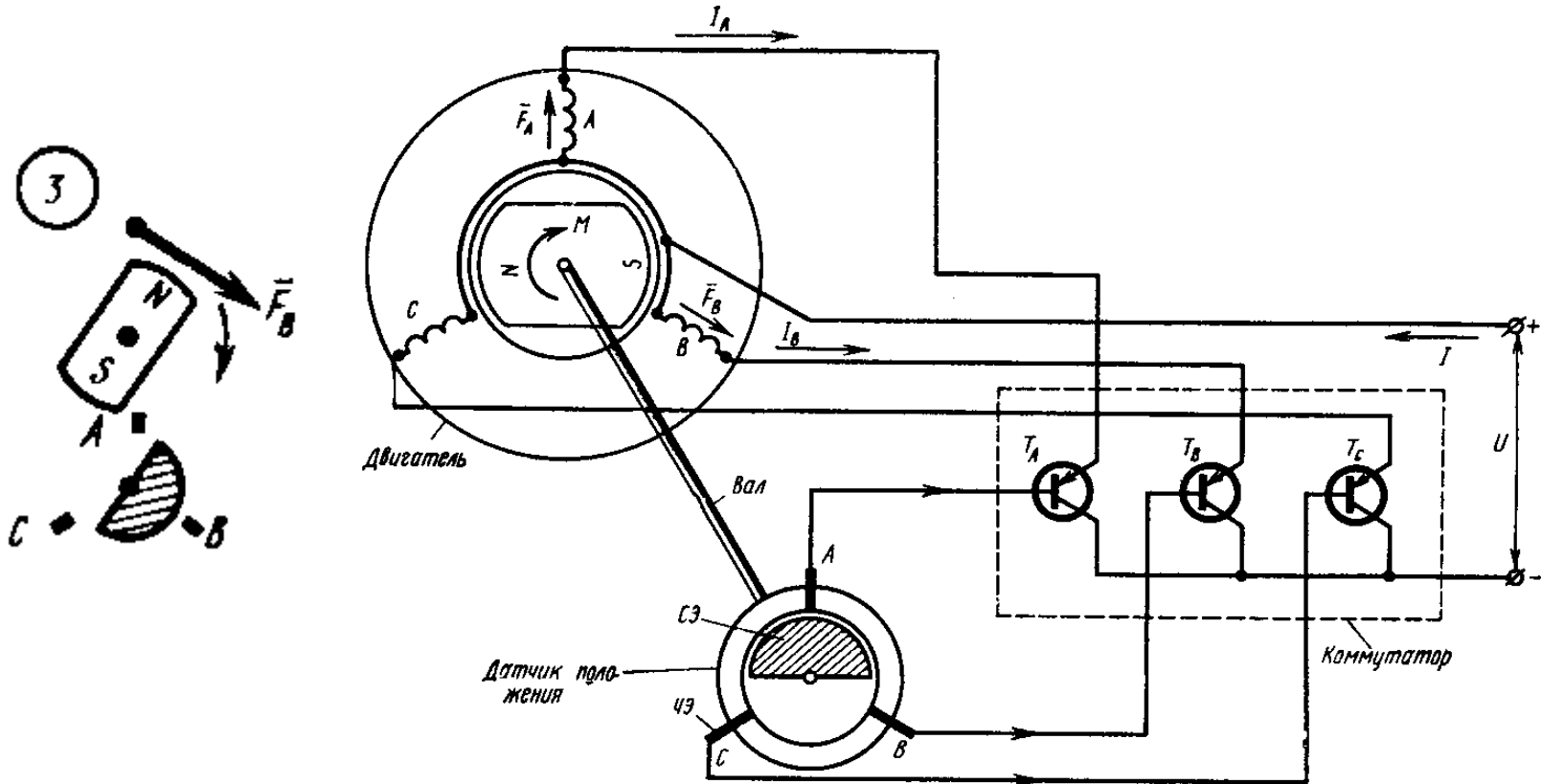
- » сигнальный элемент датчика – возле ЧЭ обмоток A и B
- » открыты транзисторы T_A и T_B
- » подается напряжение на A и B
- » транзистор T_C закрыт
- » протекают токи I_A и I_B
- » МДС обмотки якоря $F = F_{AB}$ (повернулась на 60°)
- » взаимодействие МДС F и $\Phi_{ПМ}$ создает вращающий момент
- » продолжается поворот ротора



Принцип действия вентильного двигателя

Положение 3 (поворот на $\alpha > 90^\circ$)

- » сигнальный элемент датчика – возле ЧЭ обмотки B
- » открыт транзистор T_B
- » подается напряжение на обмотку B
- » транзисторы T_A и T_C закрыты
- » протекает ток I_B
- » МДС обмотки якоря $F = F_B$ (повернулась на 60°)
- » взаимодействие МДС F и $\Phi_{\text{ПМ}}$ создает вращающий момент
- » продолжается поворот ротора



Затем включены транзисторы T_B и T_C

Затем T_C

Затем T_C и T_A

... и т.д.

→ устойчивое вращение ротора

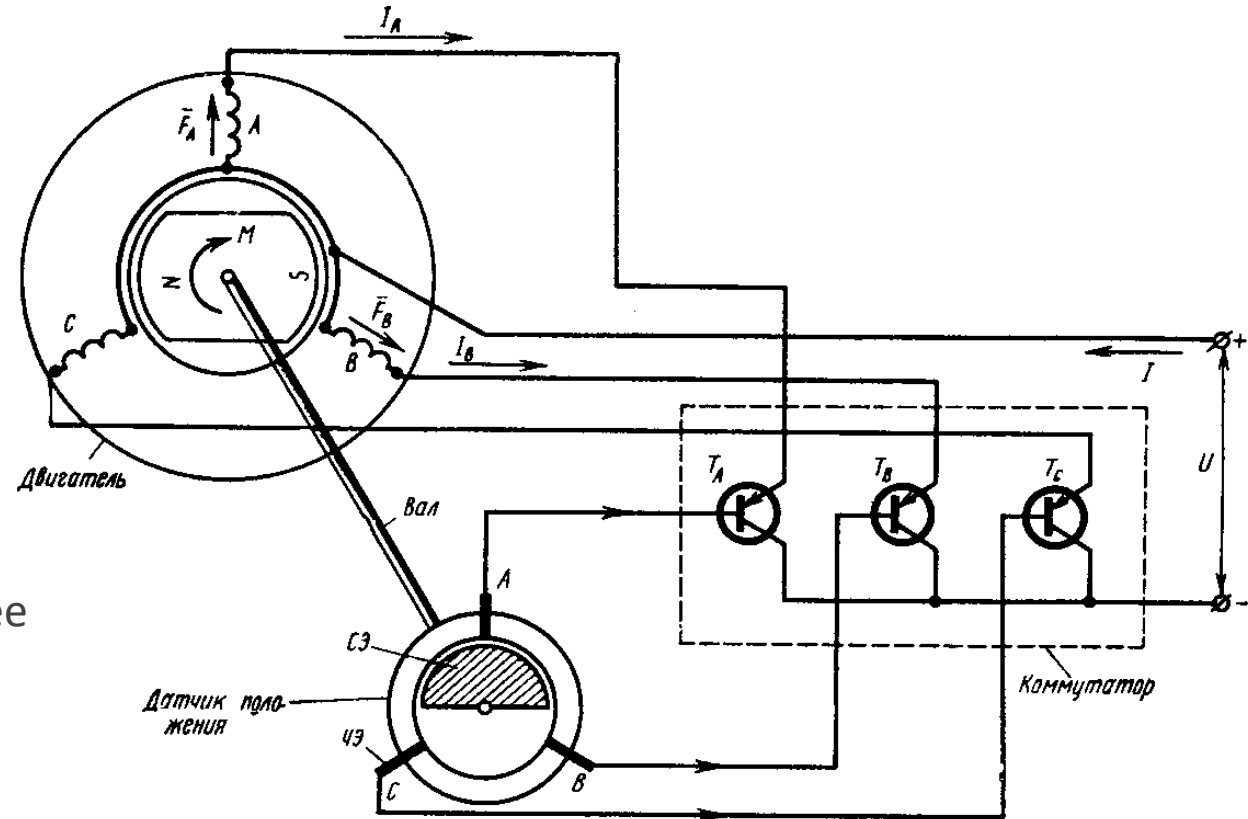
Принцип действия вентильного двигателя

Если число обмоток довести до числа секций обмотки якоря обычного ДПТ (а также число ЧЭ датчика и число транзисторов), то работа бесконтактного двигателя будет аналогична обычному ДПТ (как и его свойства и характеристики)

Реальная схема бесконтактного двигателя много сложнее (датчики, усилители сигнала, управление ключами, два транзистора на фазу, обратные диоды для защиты каждого транзистора)

→ на практике число обмоток не больше 4

→ [негативные] особенности работы бесконтактных ДПТ

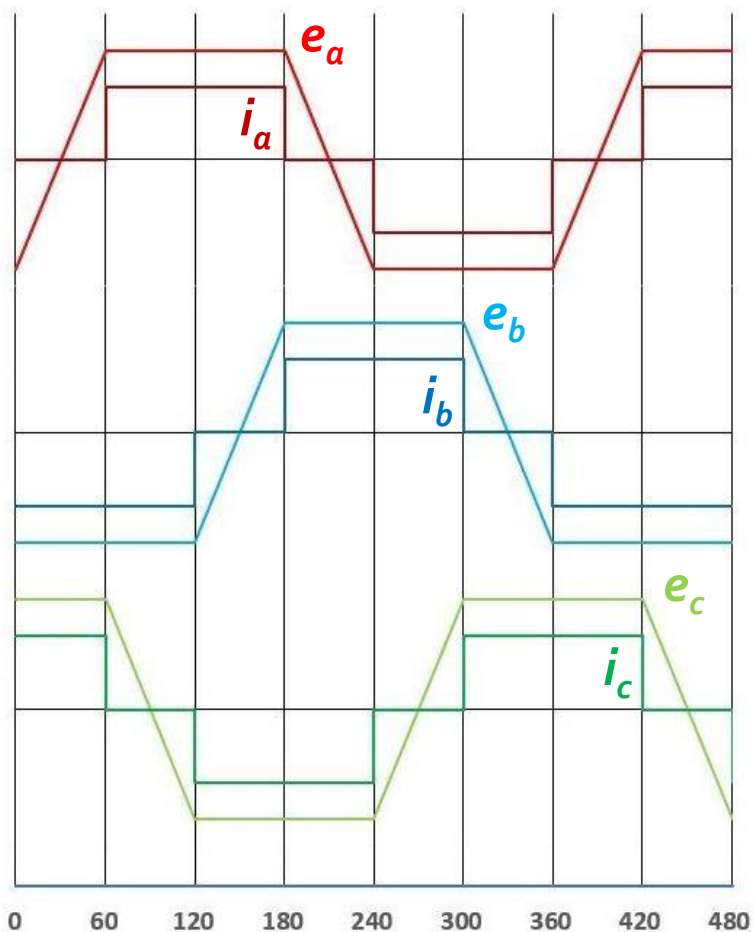


Законы управления

Коммутация фаз

Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем



Электродвигатель

- » ПМ на роторе (поверхностные ПМ или «звездочка») – несинусоидальная форма поля
- » сосредоточенная трехфазная обмотка (зубцовая)
- » трехфазная система ЭДС трапецеидальной формы
- » ЭДС фаз сдвинуты на 120°

Электромагнитная мощность – произведение тока и ЭДС

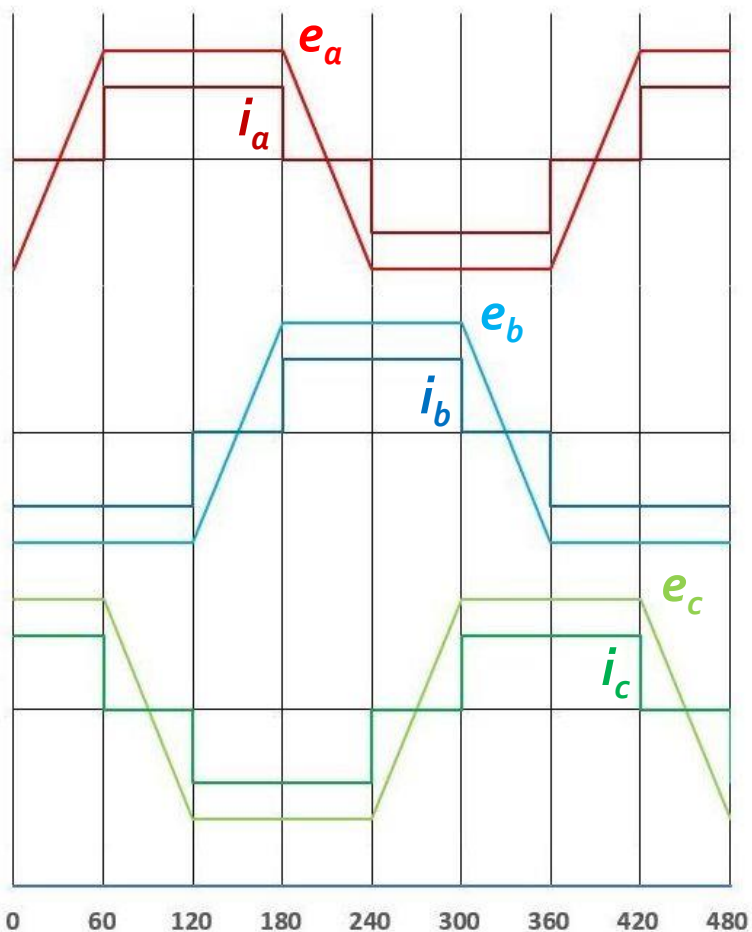
Вращающий момент
$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\Omega}$$

Для получения максимального момента надо обеспечить максимальный ток во время максимальной ЭДС (совпадающие по фазе – с учетом знака)

Ток – прямоугольной формы (включение/отключение напряжения источника постоянного тока)

Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем



Коммутатор

» 3 плеча по 2 транзистора

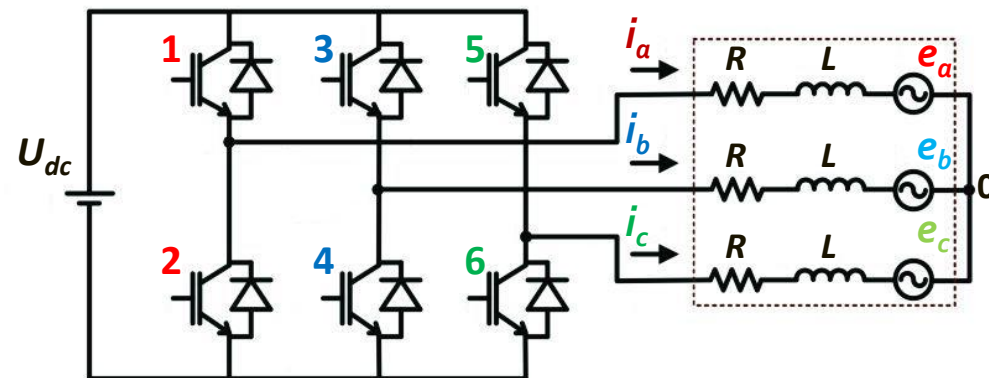
- $T_1 - T_2$ для фазы a
- $T_3 - T_4$ для фазы b
- $T_5 - T_6$ для фазы c

» верхний $T \rightarrow +U_{dc}$ на фазу

» нижний $T \rightarrow -U_{dc}$ на фазу

» коммутация 6 тактов по 60°

» обеспечивает протекание фазных токов по схеме



такты	1	2	3	4	5	6
фаза a	0	A	A	0	$-A$	$-A$
фаза b	$-B$	$-B$	0	B	B	0
фаза c	C	0	$-C$	$-C$	0	C

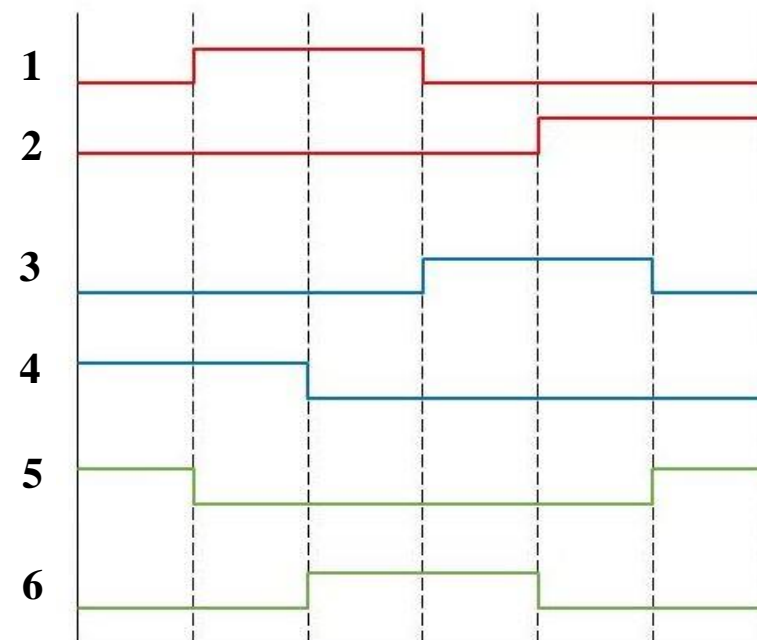
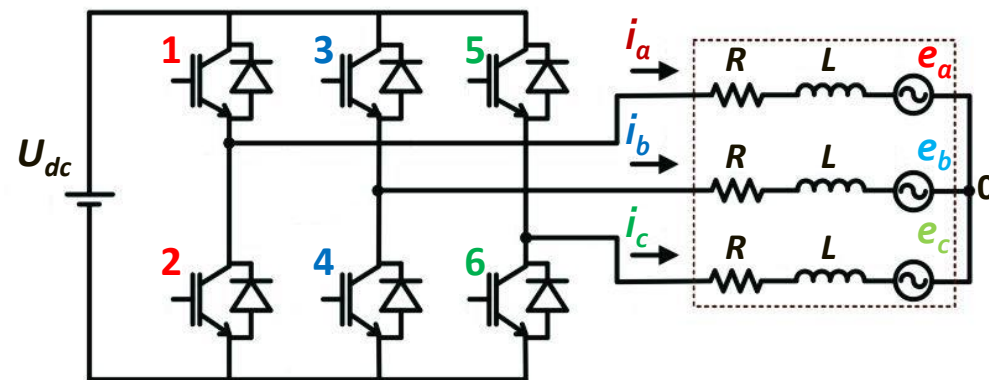
Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем

Тогда необходимая схема коммутации ключей

такты	1	2	3	4	5	6
фаза a	0	A	A	0	$-A$	$-A$
фаза b	$-B$	$-B$	0	B	B	0
фаза c	C	0	$-C$	$-C$	0	C

$T_1 (+A)$	0	1	1	0	0	0
$T_2 (-A)$	0	0	0	0	1	1
$T_3 (+B)$	0	0	0	1	1	0
$T_4 (-B)$	1	1	0	0	0	0
$T_5 (+C)$	1	0	0	0	0	1
$T_6 (-C)$	0	0	1	1	0	0



- » Это обеспечит протекание 3-фазного тока
- » Но надо еще синхронизировать токи и ЭДС

Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем

Датчик положения ротора – датчик Холла

- » контролирует ЭДС в месте установки
- » фиксирует переход кривой через 0
- » формирует импульс шириной 180°

Расположение датчика – сдвиг на 30° относительно фазы

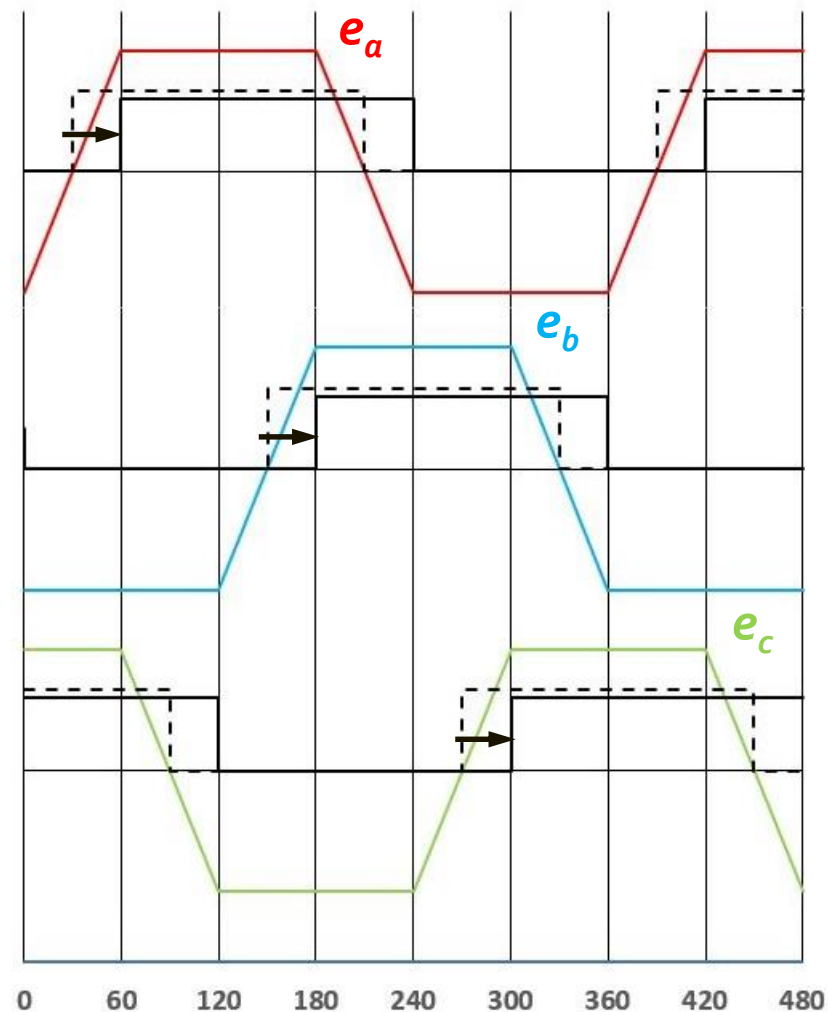
- » передний фронт – включает $+i$
- » задний фронт – включает $-i$
- » отключать ток надо через 120° – по сигналу следующей фазы

Датчик Холла: обратная связь по положению ротора

→ всегда своевременная коммутация и максимальный момент

Способы управления моментом

- » изменение напряжения питания U_{dc}
- » ШИМ сигнал – изменение U_ϕ



Особенности вентильных двигателей

(бесконтактных ДПТ с
трапецеидальной ЭДС)

Пульсации момента

В бесконтактных двигателях с малым числом обмоток коммутация фаз изменяет поле якоря скачкообразно, что приводит к пульсациям момента

Рассмотрим коммутацию 3-фазного двигателя

и изменение угла θ между вектором результирующей МДС якоря F и осью поля возбуждения $\Phi_{\text{ПМ}}$ при изменении углового положения ротора (и датчика) α

Положение 1. $\alpha = 0$

» МДС якоря $F = F_A$, угол $\theta = 90^\circ$

Положение 2. $\alpha \approx 30^\circ$

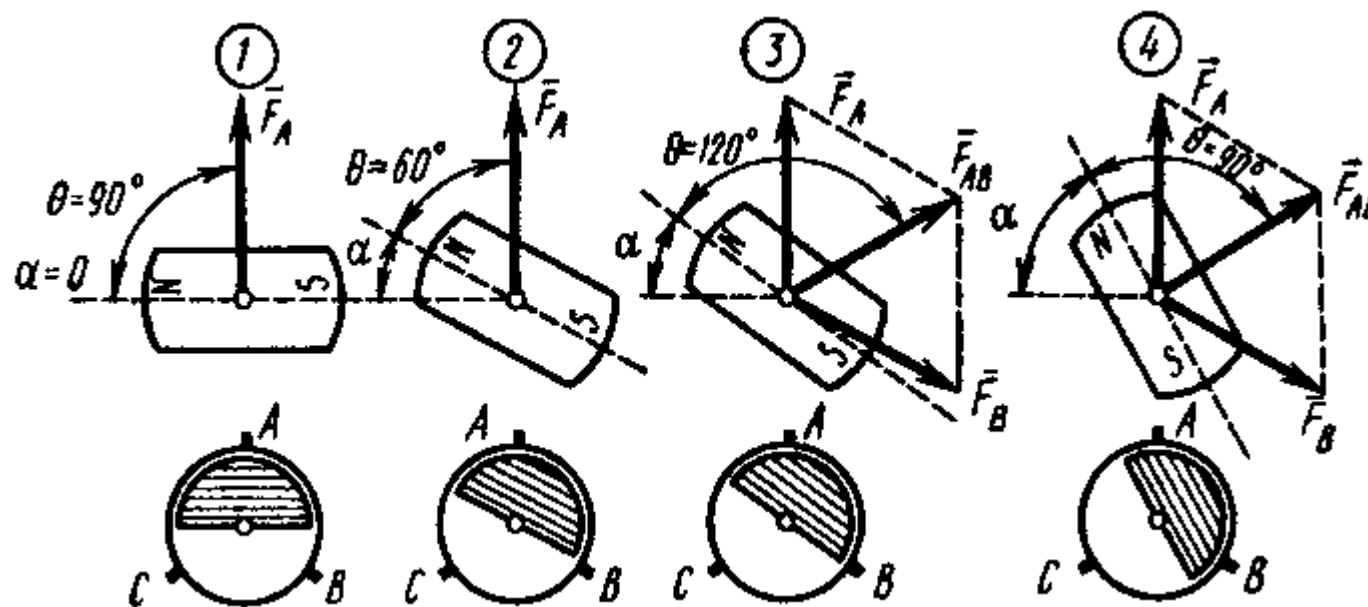
» МДС якоря $F = F_A$, угол $\theta \approx 60^\circ$

Положение 3. $\alpha \approx 30^\circ$

» МДС якоря $F = F_A + F_B$, угол $\theta \approx 120^\circ$

Положение 4. $\alpha \approx 60^\circ$

» МДС якоря $F = F_A + F_B$, угол $\theta \approx 90^\circ$



За время поворота ротора на $\alpha = 60^\circ$ угол θ изменялся $90^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 120^\circ \rightarrow 90^\circ$

Будет больше фаз, будут меньше изменения θ

Пульсации момента

В бесконтактных двигателях с малым числом обмоток коммутация фаз изменяет поле якоря скачкообразно, что приводит к пульсациям момента

Рассмотрим коммутацию 3-фазного двигателя

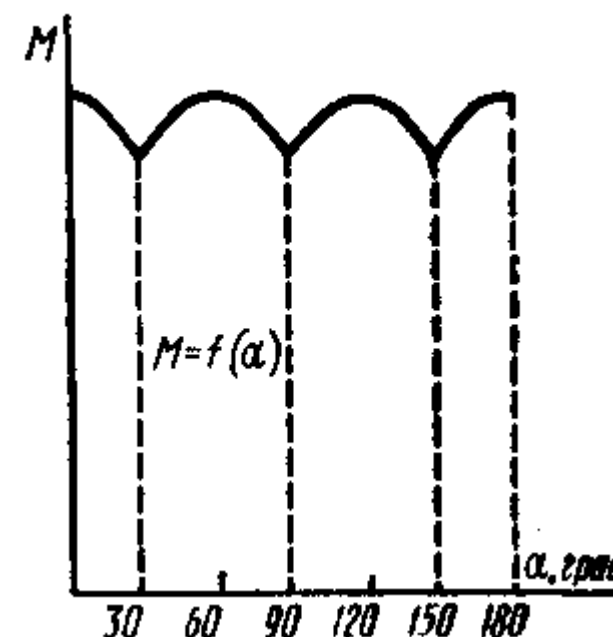
и изменение угла θ между вектором результирующей МДС якоря F и осью поля возбуждения $\Phi_{\text{ПМ}}$ при изменении углового положения ротора (и датчика) α

Считая бесконтактный двигатель синхронной машиной с ПМ на роторе
Запишем электромагнитный момент как

$$M = c_M \Phi F \sin \theta$$

Изменения угла θ при вращении ротора (приращении α)
приводят к пульсациям момента

Обычно момент инерции обеспечивает равномерное вращение ротора с $\Omega = \text{const}$,
но пульсации момента вредят нагрузке и создают шум и вибрацию



Продольная реакция якоря

В ДПТ со щетками на геометрической нейтрали реакция якоря всегда поперечная (угол $\theta = 90^\circ$)

В бесконтактном двигателе угол θ изменяется (относительно 90°)

→ появляется продольная реакция якоря:

- » намагничивающая при $\theta < 90^\circ$
- » размагничивающая при $\theta > 90^\circ$

При $\alpha < 30^\circ$ МДС якоря $F = F_A$

→ составляющие F_{Ad} и F_{Aq}

- » F_{Ad} – намагничивающая

При $\alpha > 30^\circ$ МДС якоря $F = F_A + F_B$

→ составляющие F_{ABd} и F_{ABq}

- » F_{ABd} – размагничивающая

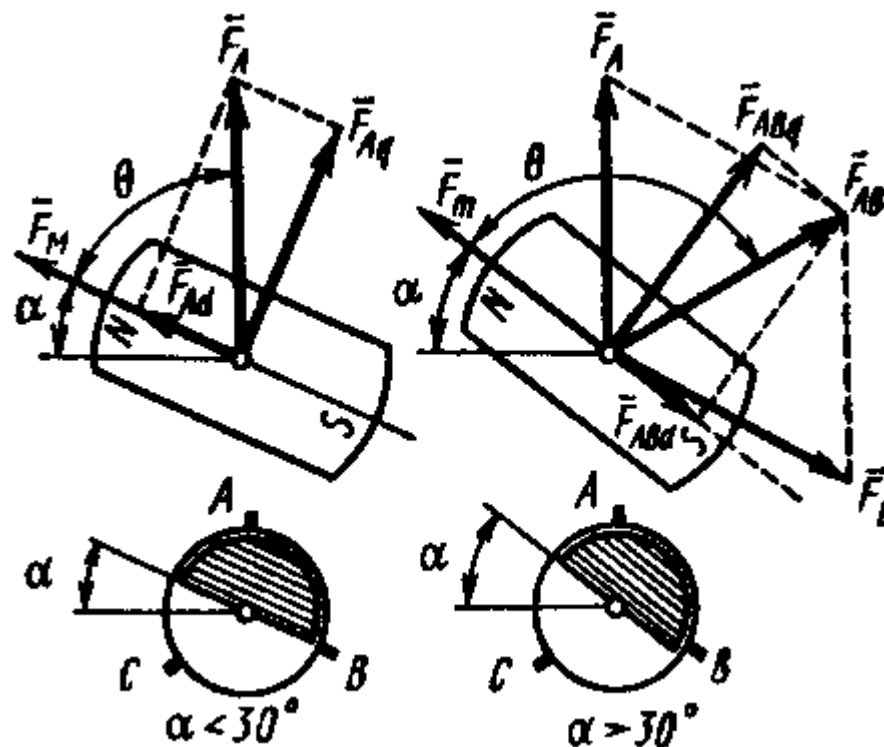
Размагничивающая реакция якоря

– опасность размагничивания ПМ

Наибольшая реакция якоря – при пуске

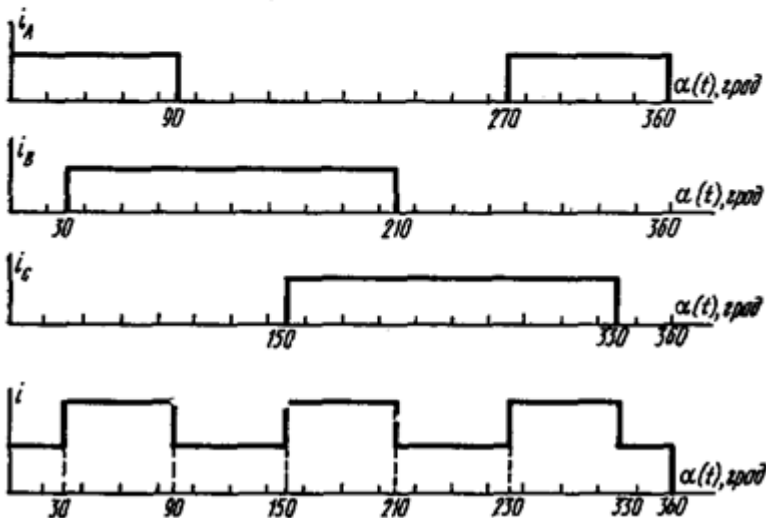
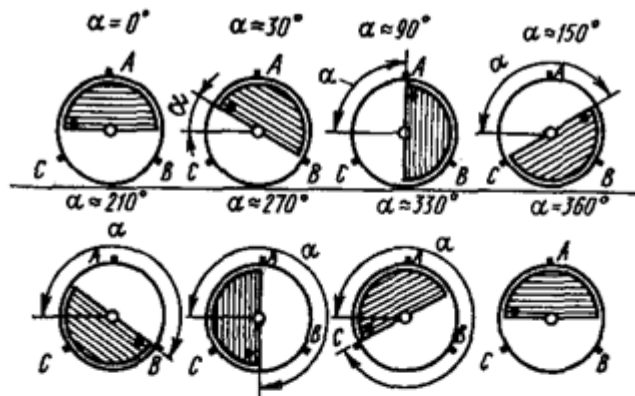
(при $n = 0$ ЭДС якоря $E = 0$ и ток якоря $I = (U - 0)/r_a$ очень большой)

Необходимо стабилизировать ПМ при МДС короткого замыкания



Пульсации тока

В бесконтактном двигателе обмотки включаются дискретно на источник напряжения постоянного тока

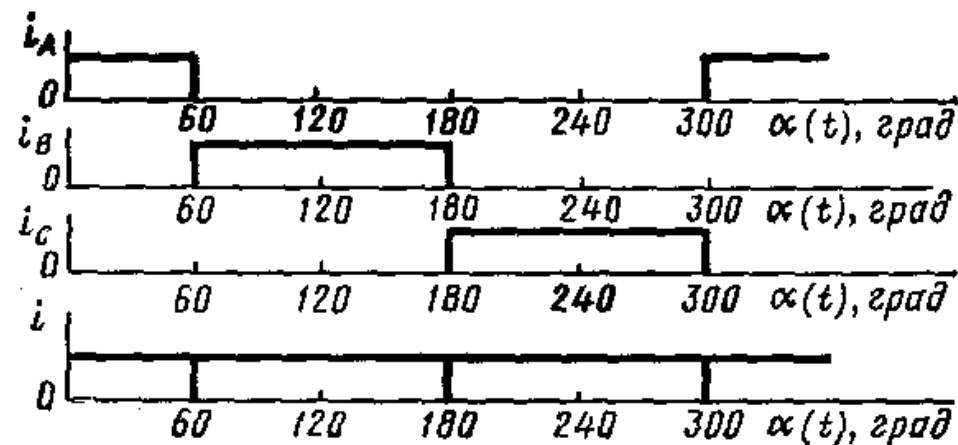
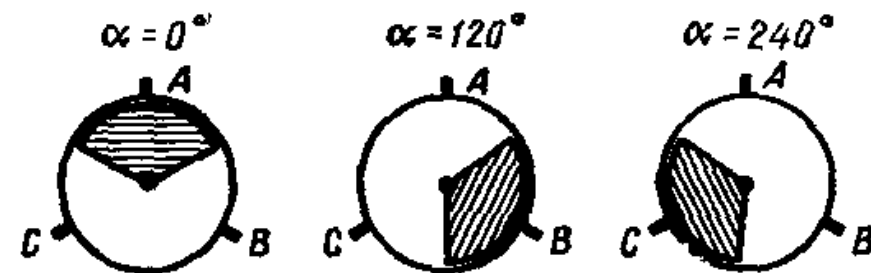


Обмотка A включена с 270° до 90°
Обмотка B включена с 30° до 210°
Обмотка C включена с 150° до 330°
→ пульсации токов обмоток

Из-за перекрытия рабочих зон
→ пульсации потребляемого тока

Пульсации потребляемого тока можно устранить, применяя датчик с сигнальным элементом с дугой 120°

Но тогда возрастут изменения угла θ и пульсации момента



Влияние индуктивности обмоток якоря

В ДПТ индуктивность секции ОЯ невелика

(общее число витков ОЯ разбивается на большое число секций $\rightarrow w_{\text{секции}}$ невелико)

В бесконтактном двигателе 2...4 обмотки $\rightarrow w_{\text{обмотки}} > w_{\text{секции}}$

индуктивность пропорциональна $w^2 \rightarrow$ индуктивность обмотки велика и ее влияние надо учитывать

Предположим

- » ЭДС от поля возбуждения постоянна
- » коммутация ключей происходит мгновенно
- » взаимоиндуктивность между обмотками пренебрежимо мала

Тогда напряжение на обмотке $U = E + L \frac{di}{dt} + ir$

Решение дифференциального уравнения $i = \frac{U - E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ где $T = \frac{L}{r}$ – постоянная времени

Ток нарастает экспоненциально до установившегося значения $I_{\infty} = \frac{U - E}{r}$ (равно току при отсутствии L)

При больших n длительность включенного состояния обмотки мала

\rightarrow ток может не успевать нарастать до установившегося значения I_{∞}

\rightarrow уменьшается действующее значение тока

\rightarrow уменьшается момент двигателя

Влияние индуктивности обмоток якоря

Вращающий момент пропорционален току обмотки и потоку ПМ

Пренебрегая пульсацией момента из-за неравномерности изменения θ и размагничивающим действием реакции якоря запишем момент как

$$M = c_M \Phi i = c_M \Phi \frac{U - E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = c_M \Phi \frac{U - E}{r} - c_M \Phi \frac{U - E}{r} e^{-\frac{t}{T}} = M_{I_\infty} + M_L$$

- » первая составляющая момента – постоянная (при установившемся токе I_∞ или при $L = 0$)
- » вторая составляющая момента – переменная (обусловлена наличием и величиной L)

В двигательном режиме всегда $U > E \rightarrow$ составляющая M_L всегда отрицательная
 \rightarrow с ростом L момент двигателя уменьшается

Влияние индуктивности обмоток якоря

Запишем уравнение механической характеристики

$$M = c_M \Phi \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \frac{c_M c_E \Phi^2}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) n$$

или
$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r}{c_M c_E \Phi^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)} M$$

Воспользуемся системой относительных единиц
Примем в качестве базовых величин

- » номинальное напряжение U_H
- » скорость идеального ХХ при $U = U_H$
- » пусковой момент при $U = U_H$

Выражение механической характеристики в о.е.

$$m = (\alpha - v) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Здесь

- » $m = M / M_K$
- » $v = n / n_0$
- » $\alpha = U / U_H$

Скорость идеального холостого хода

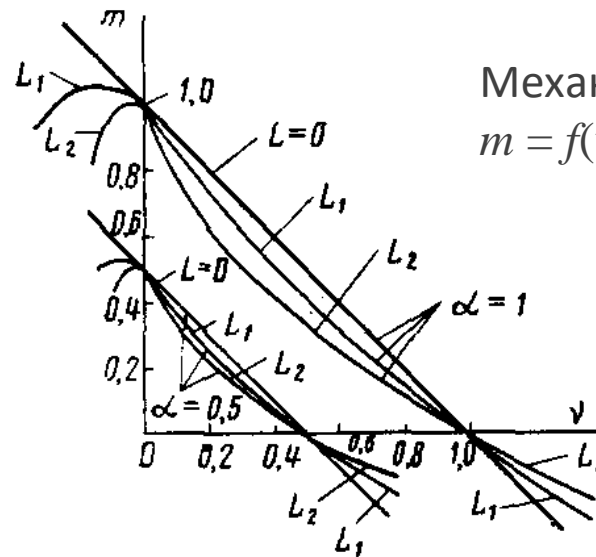
(при $M = 0$ и $i = 0$)

$$n_0 = \frac{U}{c_E \Phi} \rightarrow \text{не зависит от } L$$

Установившееся значение пускового момента

(при $n = 0$ и $t \rightarrow \infty$)

$$M_K = \frac{c_M \Phi U}{r} \rightarrow \text{не зависит от } L$$



Механические характеристики $m = f(v)$ при $\alpha = 1$ и $\alpha = 0,5$

С увеличением L возрастает нелинейность характеристики

Влияние индуктивности обмоток якоря

Коммутация токов обмоток

Транзистор можно считать идеальным ключом

малое время срабатывания → разрыв тока → перенапряжение на индуктивности обмотки

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

Перенапряжение на транзисторе (эмиттер-коллектор)

» может быть опасно из-за пробоя транзистора

Если напряжение недостаточно для пробоя,

то на сопротивлении транзистора рассеивается энергия магнитного поля обмотки

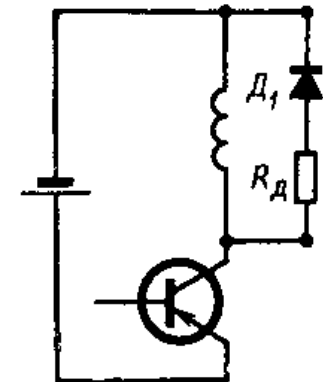
» может быть опасно из-за перегрева транзистора

$$\left(\frac{Li^2}{2} \right)$$

Специальные схемы для защиты от перегрева:

» обратный диод: после отключения транзистора ток обмотки затухает через R_d

» предпочтительнее – перенаправление тока отключаемой обмотки во включаемую (взаимоиндукция, схема включения)



Конструктивные особенности

Варианты
исполнения

Разновидности вентиляльных двигателей

По конструкции ротора

- » с постоянными магнитами (наибольшее распространение)
- » с электромагнитным возбуждением
 - разнообразные характеристики при регулировании потока
 - сложность изготовления в малых габаритах
- » реактивные (плохие энергетические показатели)

По конструкции статора

- » однообмоточные
 - дешево (мало обмоток и транзисторов)
 - шумно (большие пульсации момента)
- » двух-, трех-, четырехобмоточные
 - самые распространенные варианты
- » многообмоточные
 - дорогие (сложный коммутатор, ограниченные габариты)
 - качественные – для ответственных применений

По конструкции коммутатора

- » с однополярной коммутацией
 - дешево (мало транзисторов)
 - большие пульсации момента
 - низкое использование ЭМ по удельному моменту
- » с биполярной коммутацией
 - дороже (вдвое больше элементов)
 - лучше использование ЭМ по удельному моменту

Датчики положения ротора

Датчик формирует электрический сигнал управления коммутатором (определяет момент переключения)

Датчик содержит сигнальный элемент (на роторе) и чувствительный элемент (на статоре)

Датчик с магниточувствительной микросхемой
(датчик Холла)

Малые размеры (можно разместить в зазоре ЭМ)

Выходной сигнал – дискретный или аналоговый

- » высокая чувствительность к уровню магнитной индукции
- » хорошая помехозащищенность
- » высокая мощность выходного сигнала
- » многопроводный канал связи (2 провода питания + 1 сигнальный)

Варианты исполнения

- » на роторе – активный источник излучения энергии
на статоре – преобразователь излучения в сигнал
- » на роторе – пассивная гетерогенная среда
на статоре – активный источник излучения энергии и преобразователь реакции гетерогенной среды в сигнал

Оптоэлектрический датчик (фотодатчик)

На роторе – гетерогенная среда (модулятор излучения)

- диск с прорезями – «на просвет»
- контрастное покрытие – «на отражение»

На статоре – источник излучения (светодиод) и приемник (фототранзистор)

- » двойное преобразование сигнала – низкий КПД
- » низкая чувствительность
- » слабая помехозащищенность

Датчики положения ротора

Бездатчиковый вентильный двигатель

1. Вместо отдельного датчика – модулированный сигнал с обмоток (ЭДС вращения, изменяющаяся с поворотом ротора)

- » ЭДС можно измерить лишь в отключенной фазе → сложная схема
- » отсутствие сигнала при неподвижном роторе
- » слабый сигнал при малой n
- » слабая помехозащищенность
- » сложная логика обработки сигнала

2. При использовании микроконтроллера (для векторного управления) можно использовать его сигнал для вычисления положения ротора (по векторной диаграмме)

Далее

Коллекторные двигатели

👤 Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

✉ ShirinskiiSV@mpei.ru

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

