Вентильные двигатели

Разновидности, устройство, принцип действия

Вентильные двигатели / Бесконтактные двигатели

Вентильный двигатель получает питание от сети постоянного тока,
но вместо коллектора использует «вентильный» коммутатор (характеристики аналогичны ДПТ)

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)

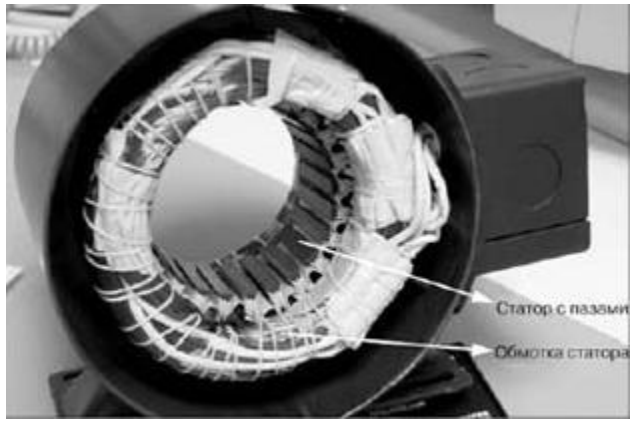
В вентильном двигателе полупроводниковый коммутатор / преобразователь частоты

» 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

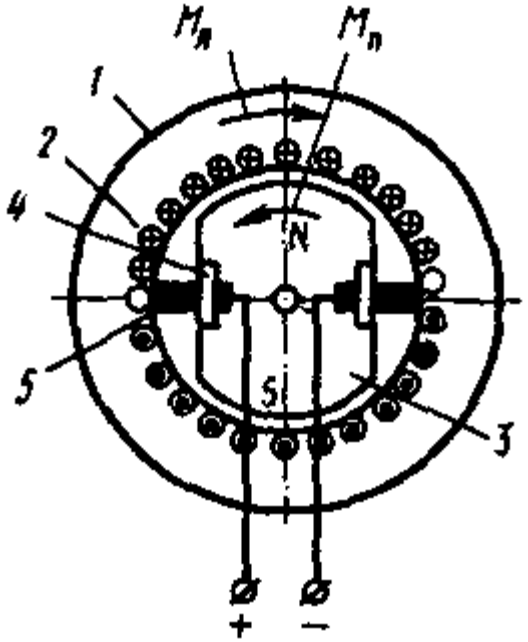


Принцип действия вентильного двигателя

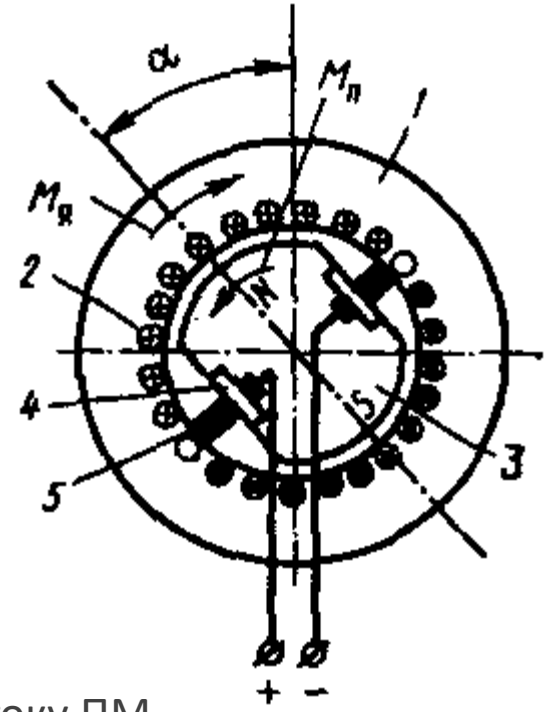
(бесконтактного ДПТ)

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



- 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 МДС ОЯ перпендикулярен потоку ПМ
- МДС ОЯ взаимодействует с потоком ПМ, создавая вращающий момент
  - Поворот щеток вместе с ротором изменяет распределение токов ОЯ



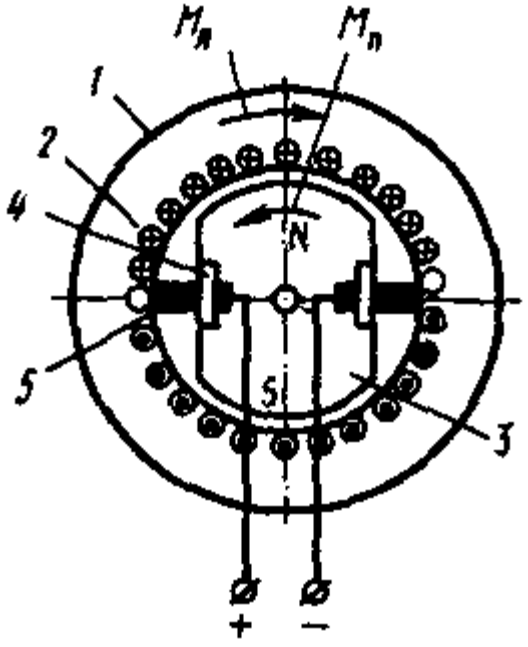
При этом вектор МДС ОЯ остается перпендикулярен потоку ПМ
→ сохраняется вращающий момент
→ обеспечивается непрерывное вращение двигателя

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

Рассмотрим работу ДПТ обращенной конструкции

Под действием вращающего момента разгоняется ротор, возрастает n

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



ЭДС противодействует напряжению и снижает ток $I = \dfrac{U - E}{r}$

Ток якоря снижается и снижается момент до равновесия $M = M_c$

В установившемся режиме напряжение питания двигателя

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

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

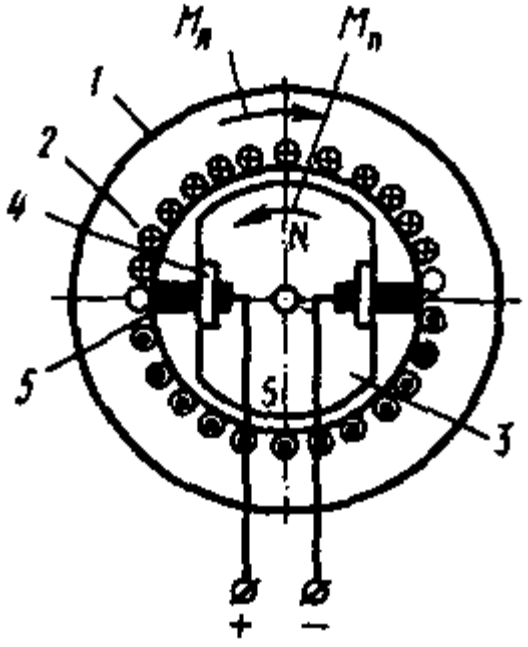
Вращающий момент $M = c_M I \Phi$

Тогда 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

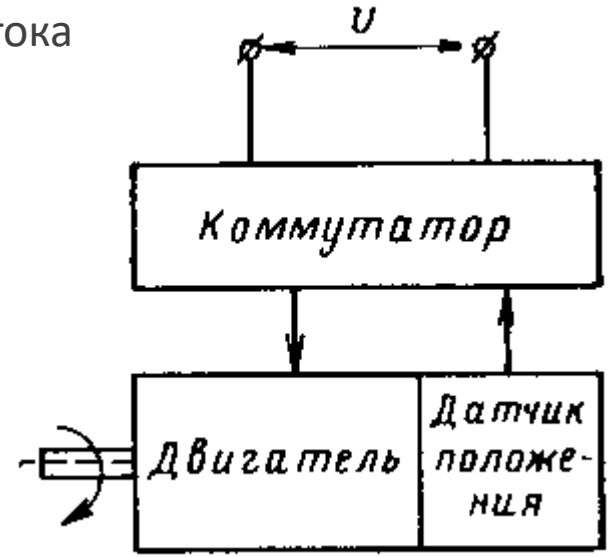
В ДПТ щетки с коллектором переключают секции обмотки якоря синфазно с вращением ротора



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

Получится бесконтактный двигатель постоянного тока

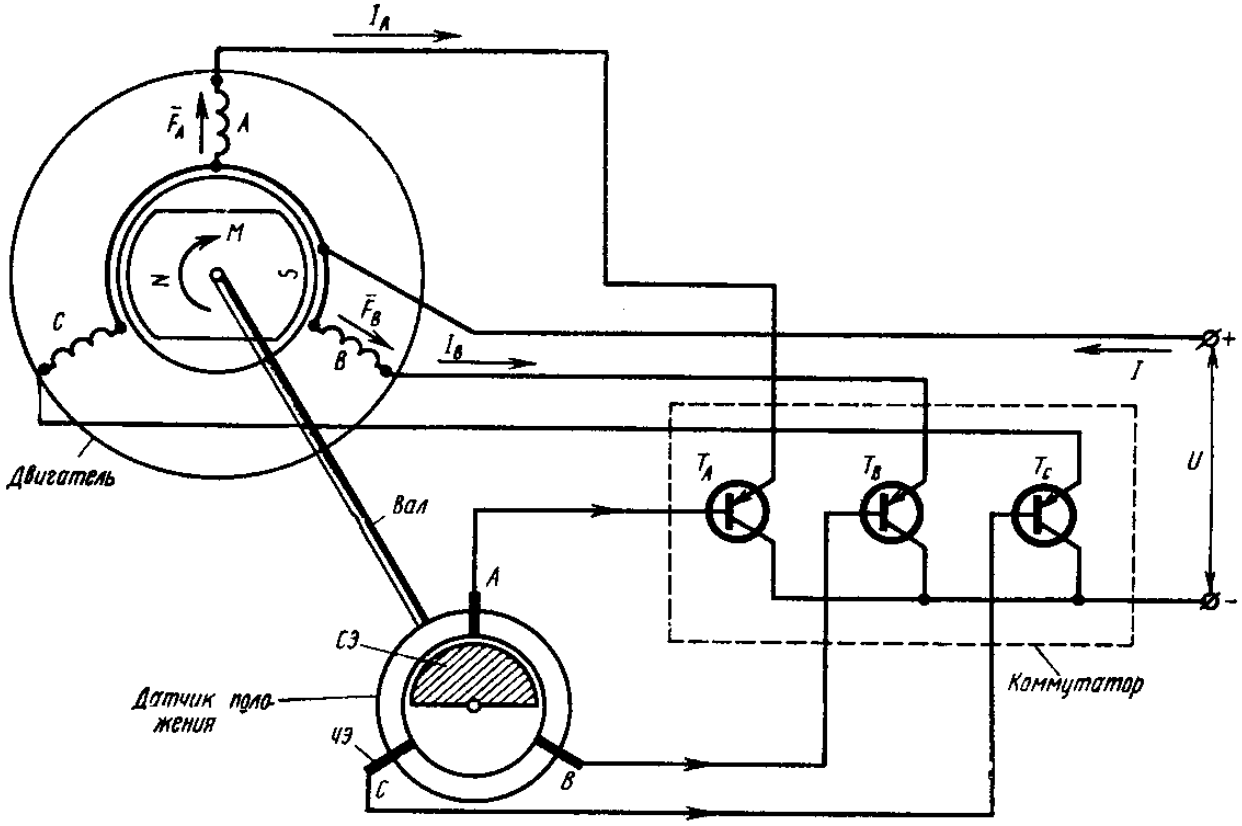
- Двигатель с m-фазной обмоткой на статоре и ПМ на роторе (бесконтактное возбуждение)
- Датчик положения ротора формирует сигнал синфазно с поворотом ротора
- Коммутатор (бесконтактный / статический) переключает токи в обмотках обмотки якоря по сигналам датчика положения ротора



Принцип действия вентильного двигателя

Упрощенная схема бесконтактного двигателя

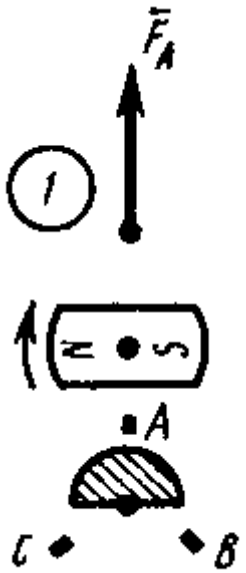
- Двигатель: 3 обмотки на статоре (соединены в Y) и ПМ на роторе
- Датчик: сигнальный элемент (сегмент $180°$)
- + чувствительные элементы (число ЧЭ = числу обмоток, положение ЧЭ = положению осей фаз)
- Коммутатор: 3 транзистора в режиме ключа (сигнал управления открывает транзистор и подключает обмотку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

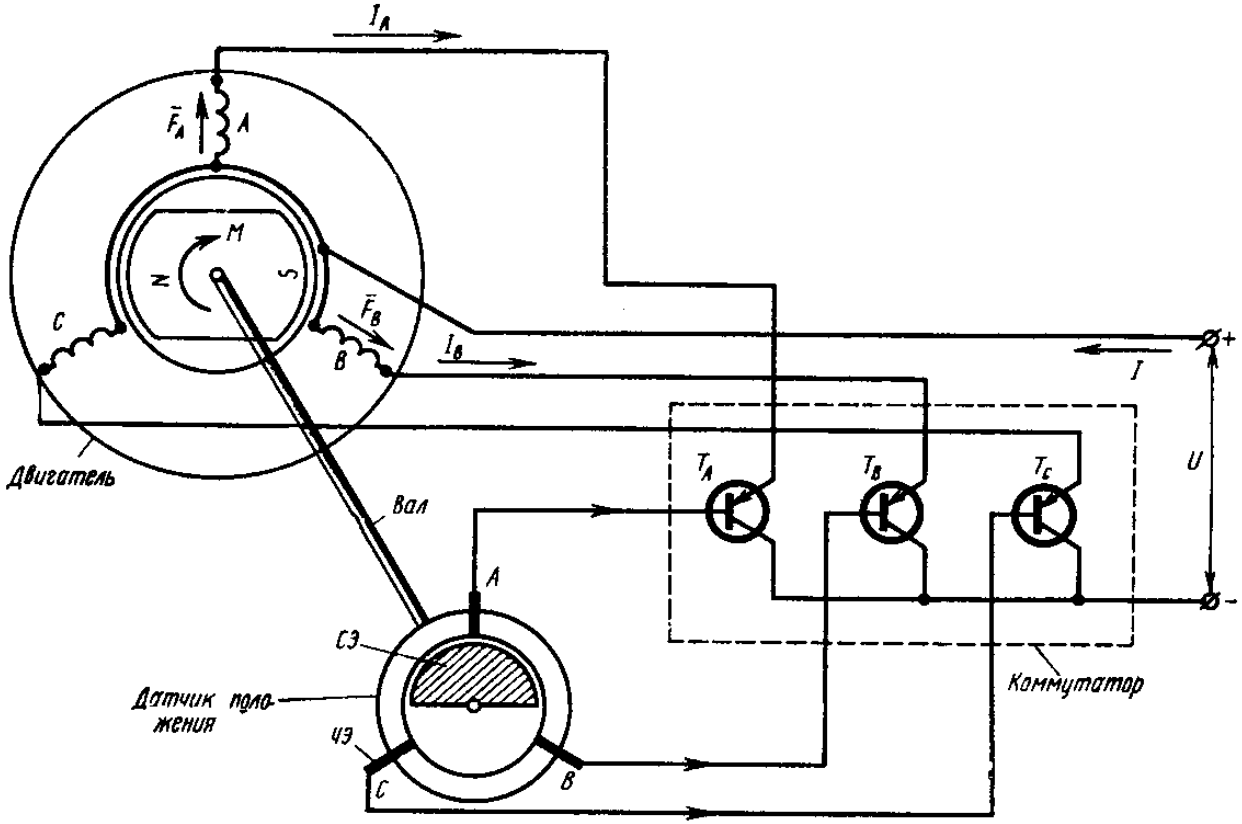


Принцип действия вентильного двигателя

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 $\Phi_{ПМ}$
- создается вращающий момент
- поворачивается ротор

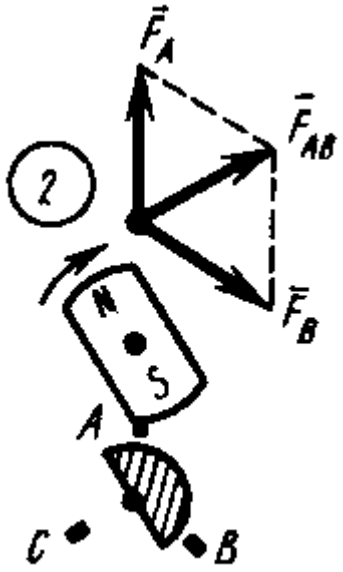


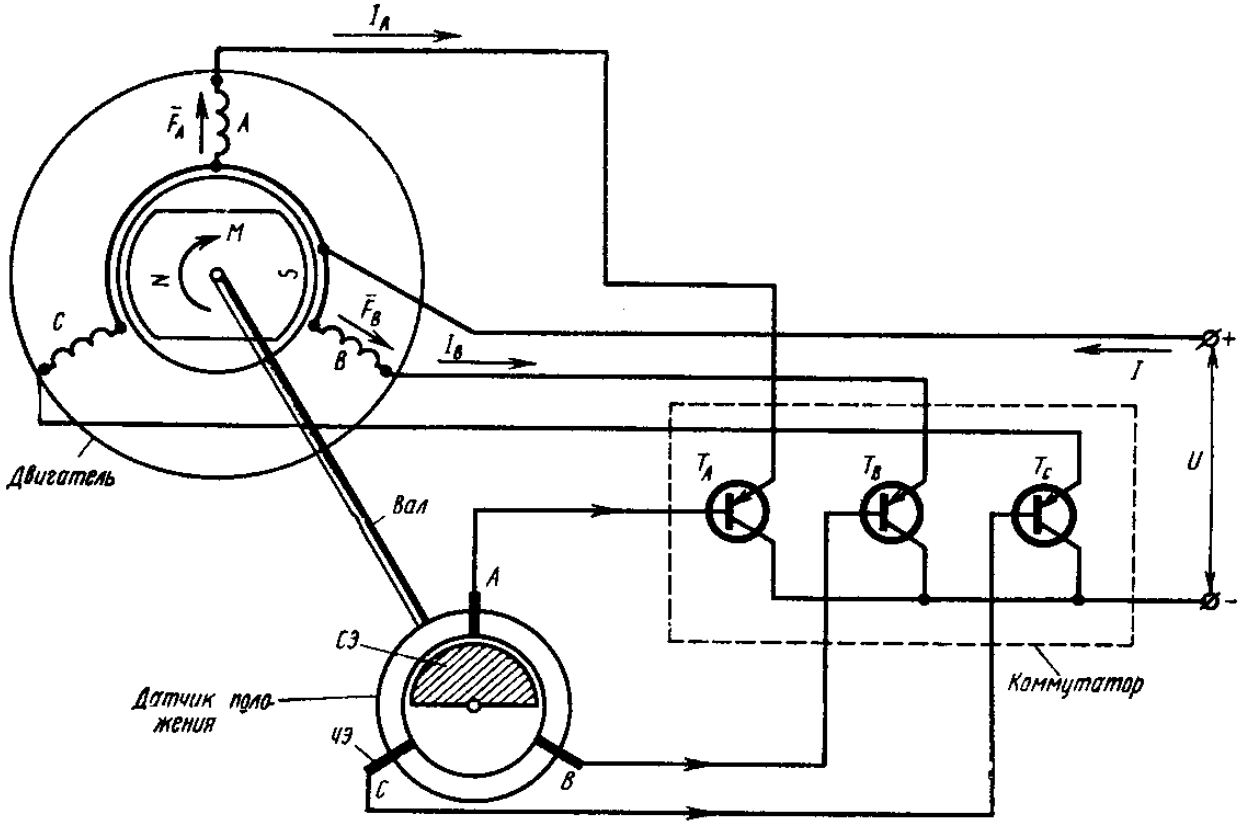


Принцип действия вентильного двигателя

Положение 2 (поворот на $\alpha > 30°$)

- 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

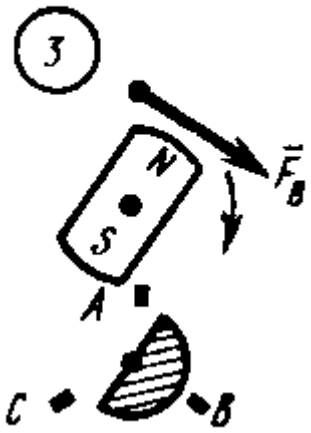


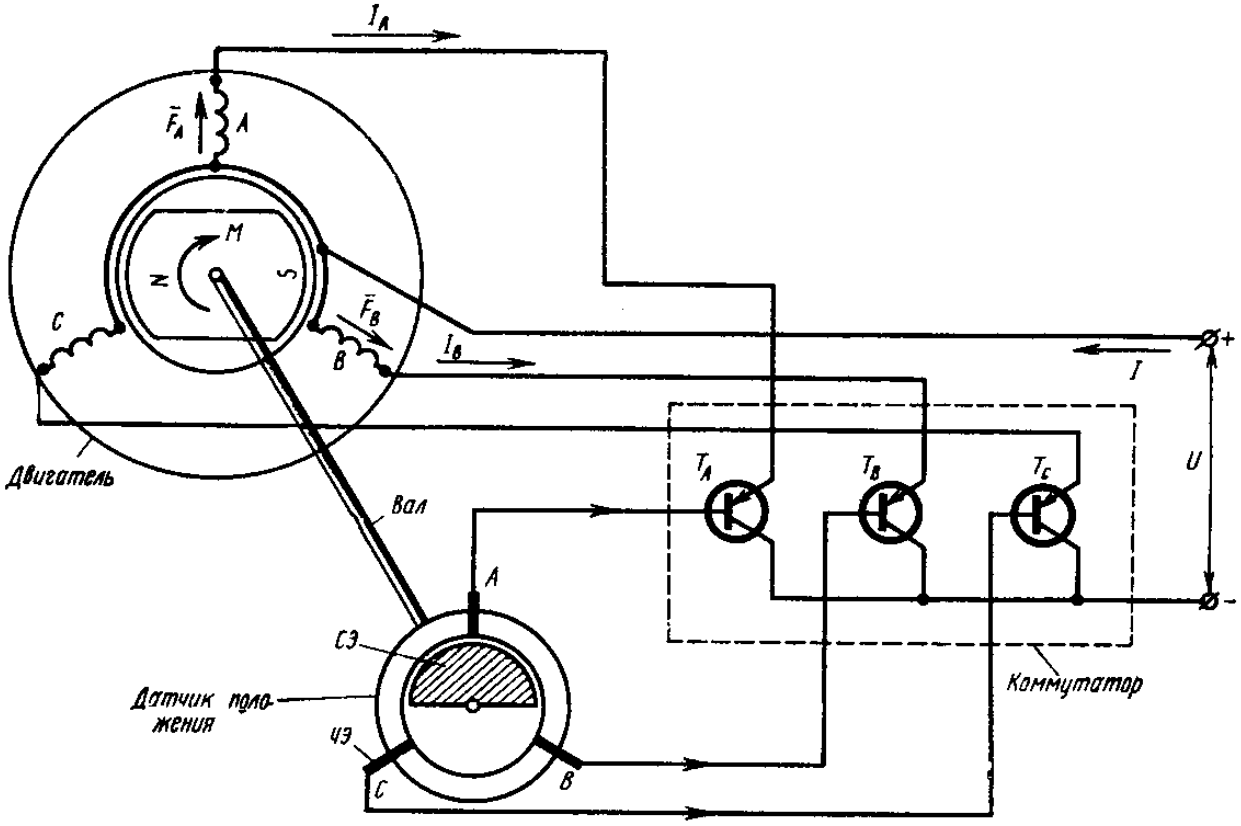


Принцип действия вентильного двигателя

Положение 3 (поворот на $\alpha > 90°$)

- 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 $\Phi_{ПМ}$ создает вращающий момент
- продолжается поворот ротора





Затем включены транзисторы T_B и T_C

Затем T_C

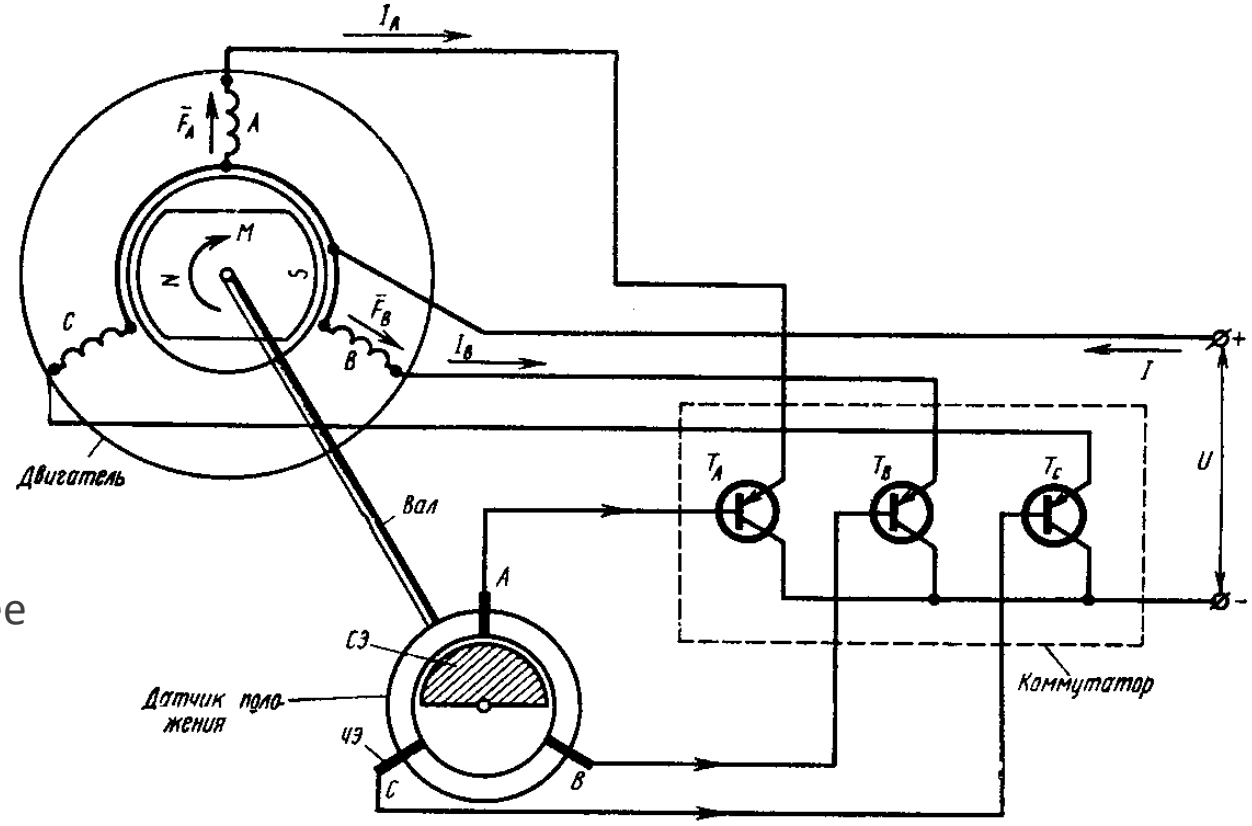
Затем T_C и T_A

… 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)



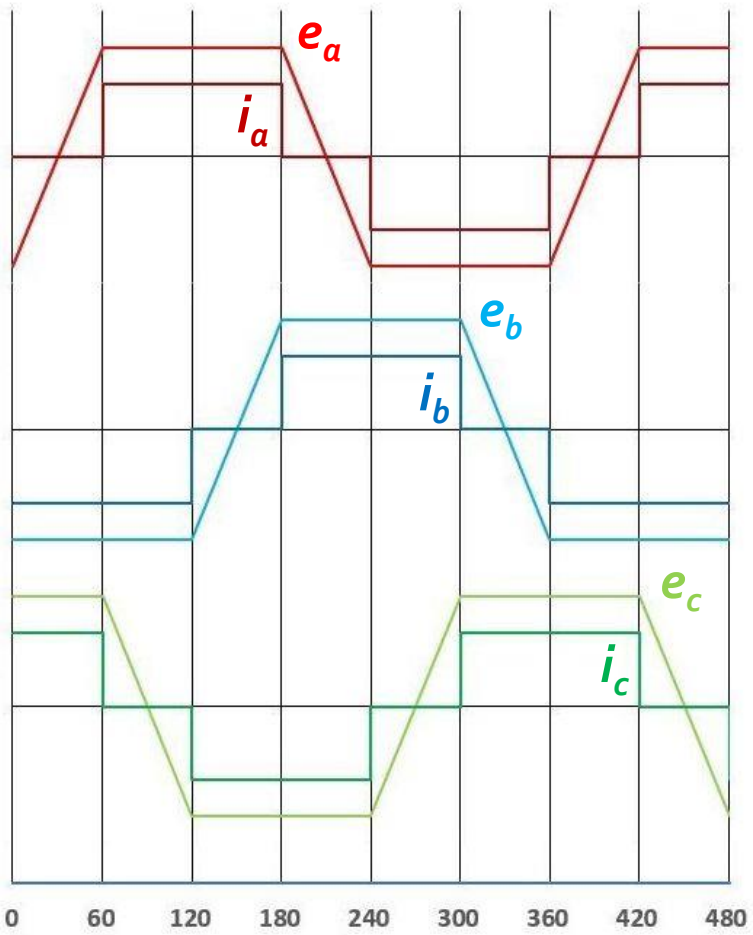
Реальная схема бесконтактного двигателя много сложнее
(датчики, усилители сигнала, управление ключами,
два транзистора на фазу, обратные диоды для защиты каждого транзистора)
→ на практике число обмоток не больше 4
→ [негативные] особенности работы бесконтактных ДПТ

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°

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

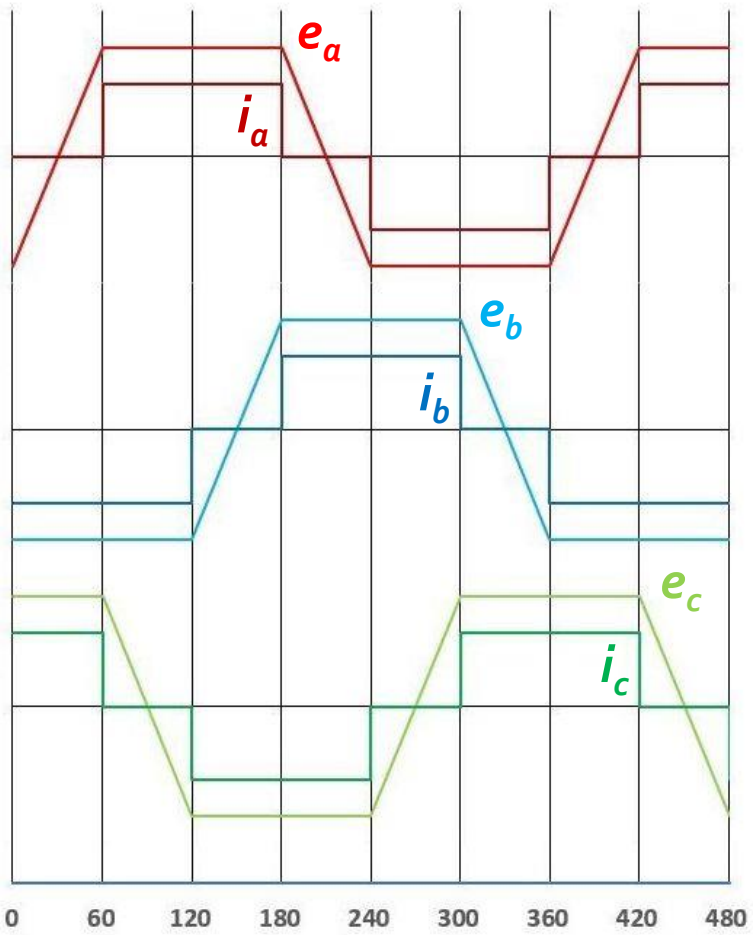
Электромагнитная мощность – произведение тока и ЭДС

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

Для получения максимального момента надо обеспечить максимальный ток во время максимальной ЭДС (с учетом знака)
В идеале – кривые ЭДС и тока одинаковой формы

Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем

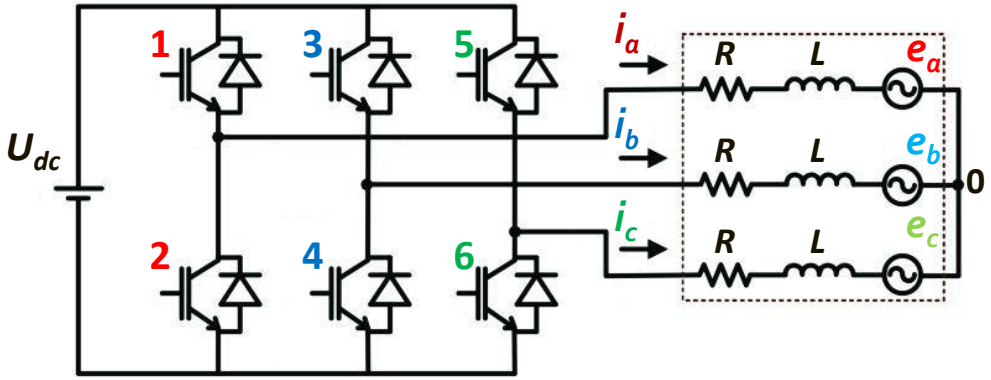


Коммутатор

» 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

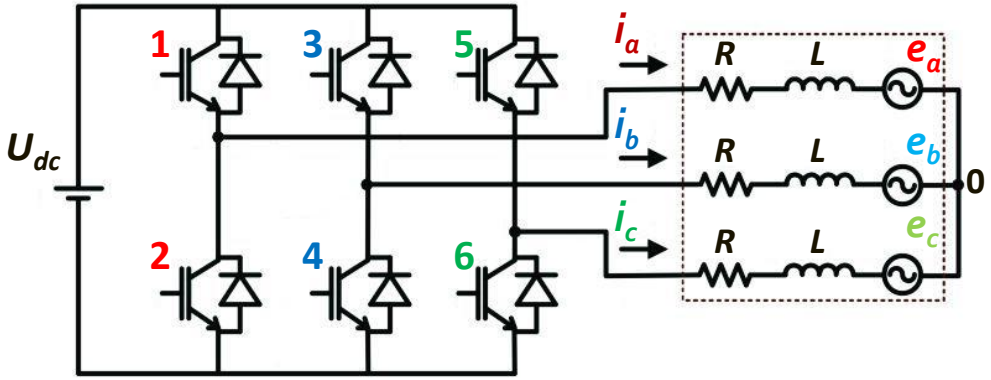
Законы управления

Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем

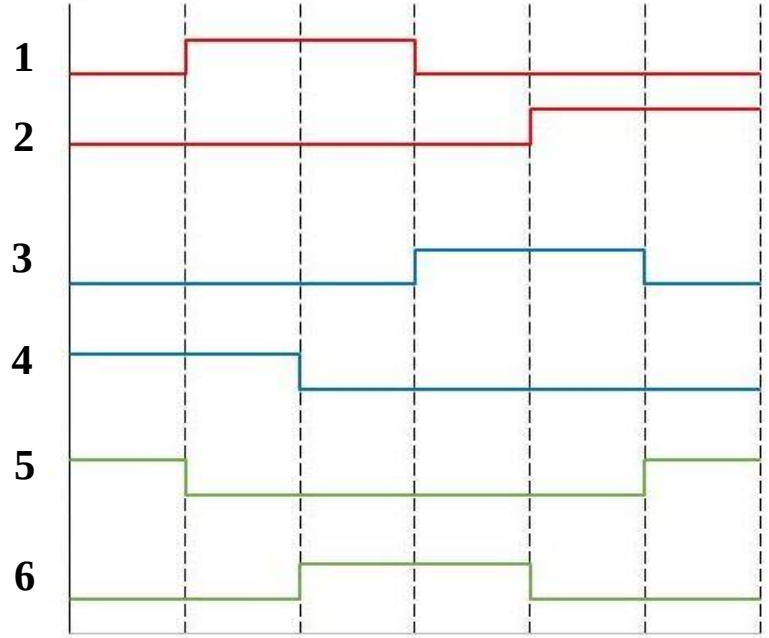
Тогда необходимая схема коммутации ключей

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

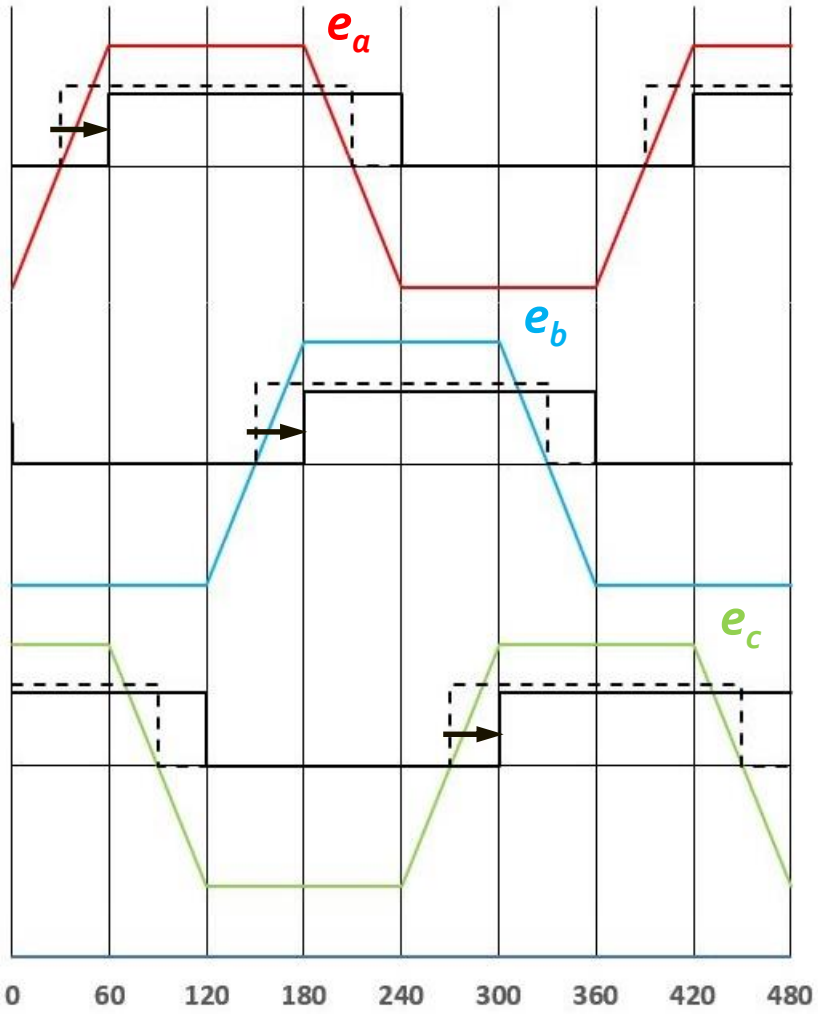
Рассмотрим двухполупериодный коммутатор с трехфазным двигателем

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 $\rightarrow$ всегда своевременная коммутация и максимальный момент

Способы управления моментом
- » изменение напряжения питания U_{dc}
- » ШИМ сигнал – изменение $U_{ф}$



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 $\Phi_{ПМ}$
при изменении углового положения ротора (и датчика) α

<u>Положение 1. $\alpha = 0$</u>

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

<u>Положение 2. $\alpha \approx 30°$</u>

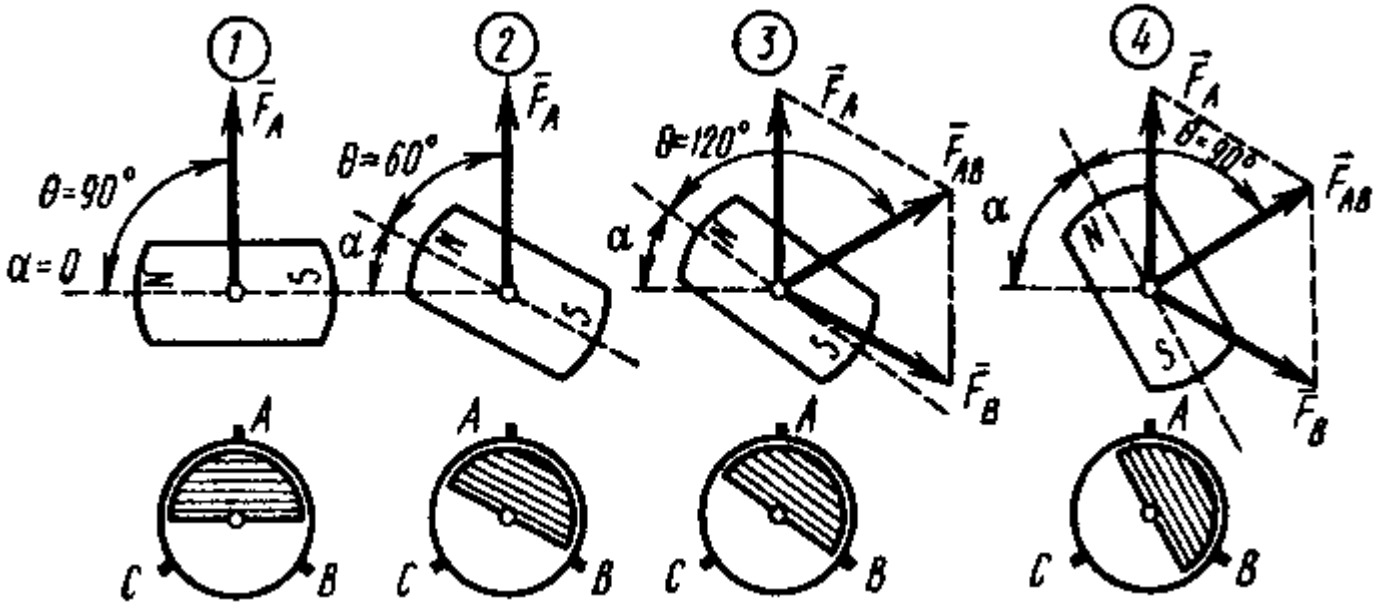
» МДС якоря $F = F_A$, угол $\theta \approx 60°$

<u>Положение 3. $\alpha \approx 30°$</u>

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

<u>Положение 4. $\alpha \approx 60°$</u>

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



За время поворота ротора на $\alpha = 60°$ угол θ изменялся $90° \to 60° \to 120° \to 90°$
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

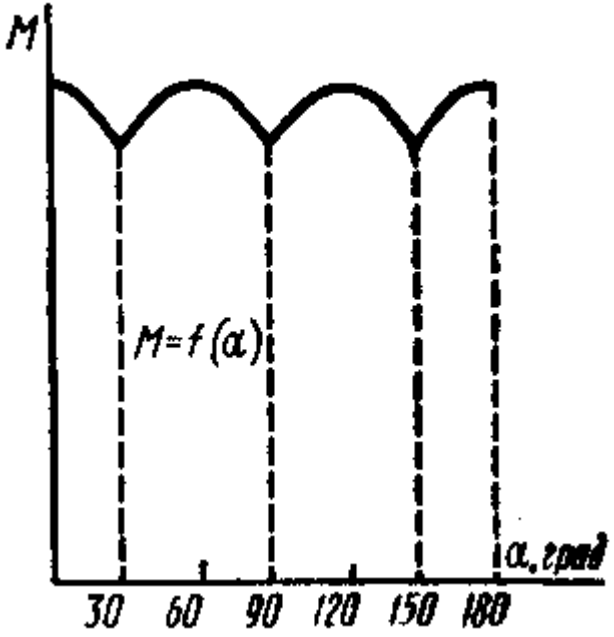
Рассмотрим коммутацию 3-фазного двигателя
и изменение угла θ между вектором результирующей МДС якоря F и осью поля возбуждения $\Phi_{ПМ}$
при изменении углового положения ротора (и датчика) α

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



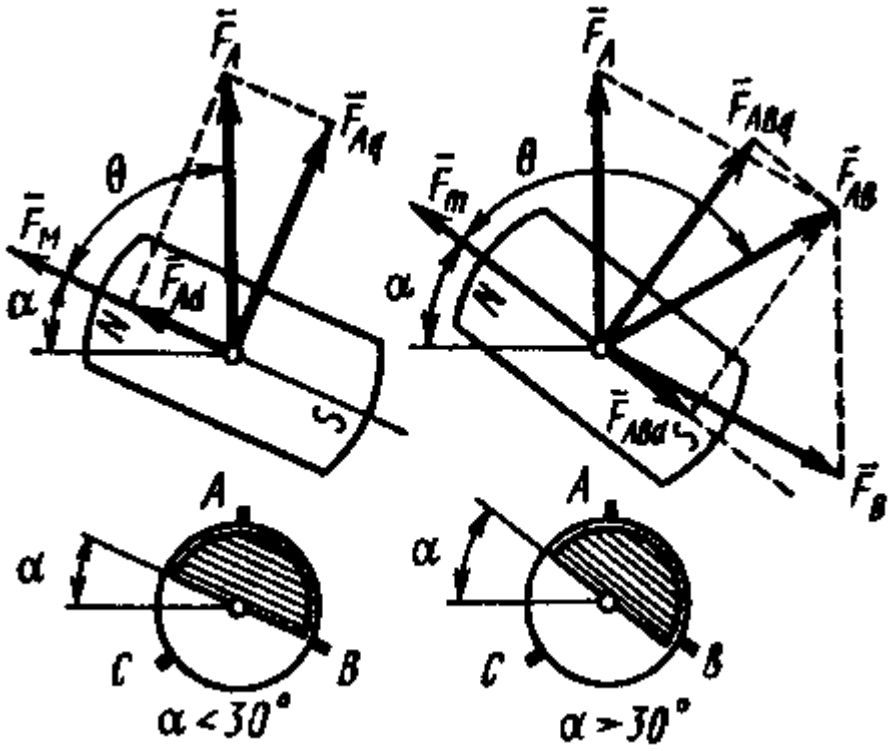
Продольная реакция якоря

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

В бесконтактном двигателе угол θ изменяется (относительно $90°$)
$\rightarrow$ появляется продольная реакция якоря:
» намагничивающая при $\theta < 90°$
» размагничивающая при $\theta > 90°$

При $\alpha < 30°$ МДС якоря $F = F_A$
$\rightarrow$ составляющие F_{Ad} и F_{Aq}
» F_{Ad} – намагничивающая

При $\alpha > 30°$ МДС якоря $F = F_A + F_B$
$\rightarrow$ составляющие F_{ABd} и F_{ABq}
» F_{ABd} – размагничивающая

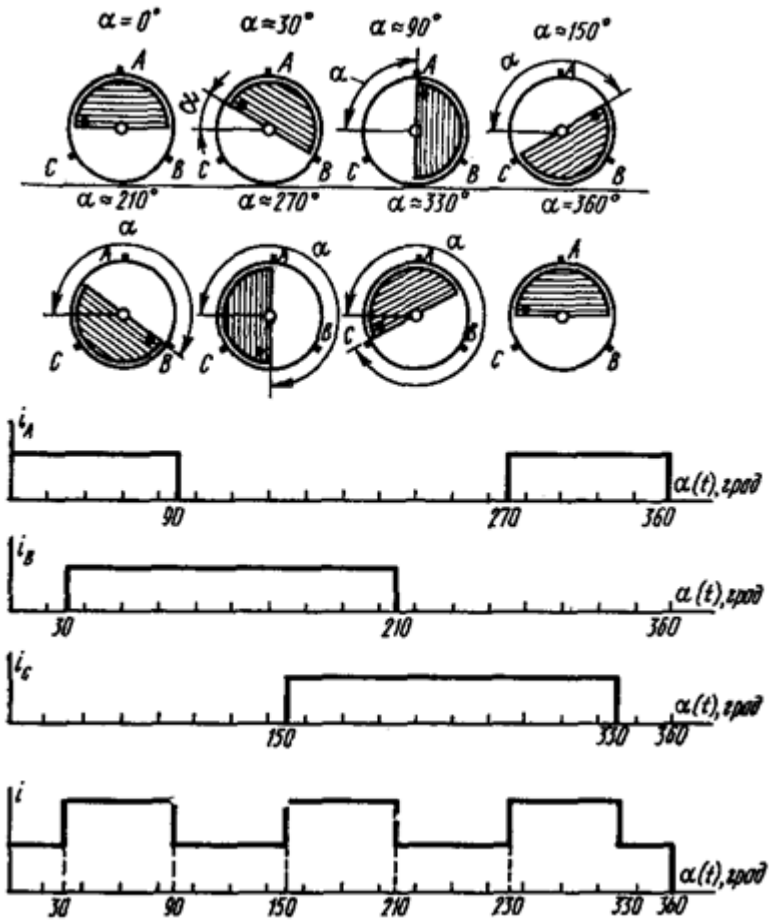


Размагничивающая реакция якоря
– опасность размагничивания ПМ

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 $330°$

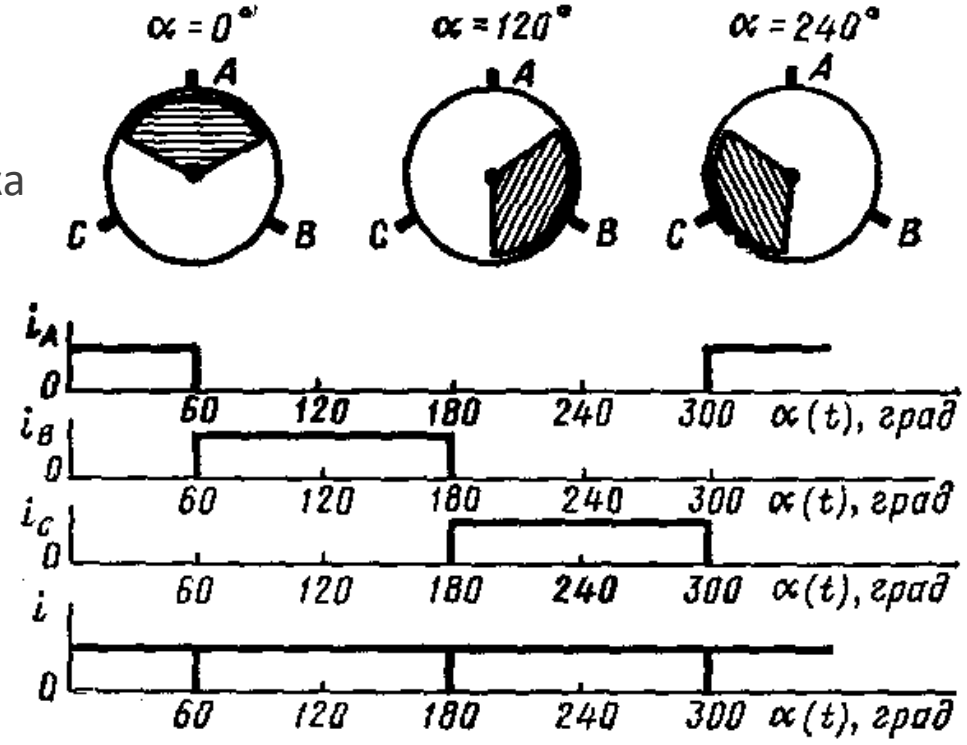
$\rightarrow$ пульсации токов обмоток

Из-за перекрытия рабочих зон

$\rightarrow$ 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 $2\ldots4$ 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 $U = E + L\dfrac{di}{dt} + ir$

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

Ток нарастает экспоненциально до установившегося значения $I_\infty = \dfrac{U-E}{r}$ (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

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

- 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

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

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

Скорость идеального холостого хода (при $M = 0$ и $i = 0$)

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

Установившееся значение пускового момента (при $n = 0$ и $t \rightarrow \infty$)

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

Воспользуемся системой относительных единиц

Примем в качестве базовых величин

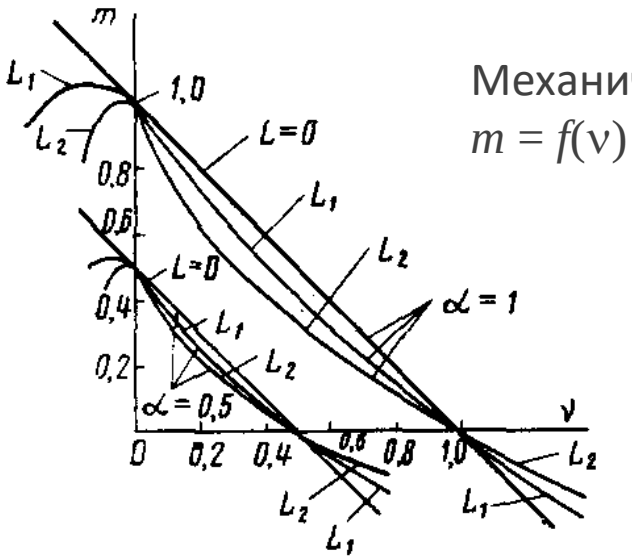
- номинальное напряжение $U_н$
- скорость идеального ХХ при $U = U_н$
- пусковой момент при $U = U_н$

Выражение механической характеристики в о.е.

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

Здесь

- $m = M / M_к$
- $\nu = n / n_0$
- $\alpha = U / U_н$



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

С увеличением L возрастает нелинейность характеристики

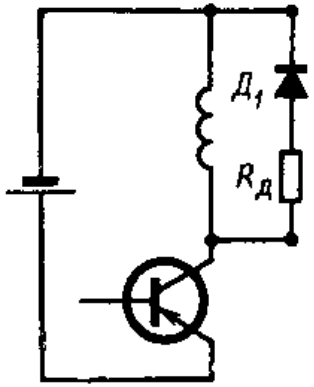
Влияние индуктивности обмоток якоря

Коммутация токов обмоток

Транзистор можно считать идеальным ключом
малое время срабатывания → разрыв тока → перенапряжение на индуктивности обмотки $e_L = -L\dfrac{di}{dt}$

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 $\left(\dfrac{Li^2}{2}\right)$
» может быть опасно из-за перегрева транзистора

Специальные схемы для защиты от перегрева:
» обратный диод: после отключения транзистора ток обмотки затухает через $R_д$
» предпочтительнее – перенаправление тока отключаемой обмотки во включаемую (взаимоиндукция, схема включения)



Конструктивные особенности

Варианты исполнения

Разновидности вентильных 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)

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

<u>Датчик с магниточувствительной микросхемой</u> (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)

<u>Оптоэлектрический датчик</u> (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 $\rightarrow$ 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
https://e-200.ru/EMAU/