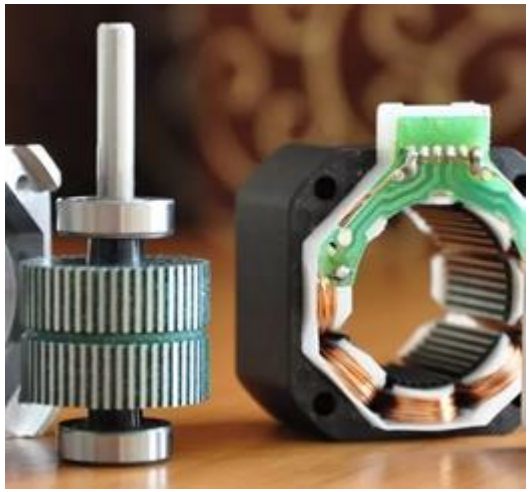
Шаговые исполнительные двигатели

Исполнительные двигатели дискретного действия

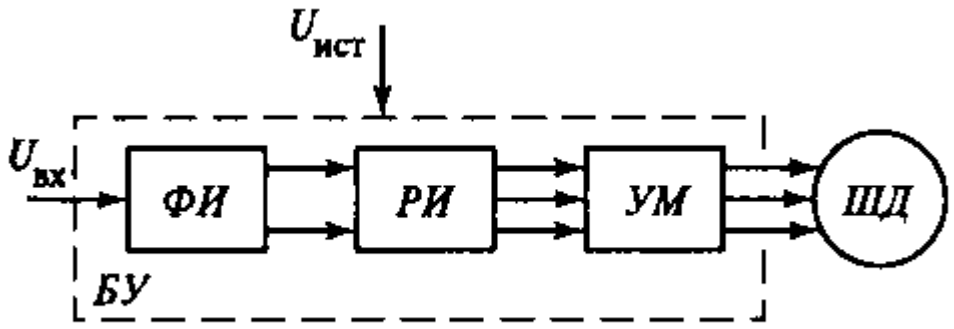


Шаговые исполнительные двигатели

Синхронные шаговые двигатели – исполнительные двигатели дискретного действия

» преобразуют импульсные электрические сигналы
в пропорциональное числу сигналов
дискретное механическое перемещение ротора
с последующей фиксацией его положения

Функциональная схема



Блок управления – преобразует импульсный входной сигнал в многофазную систему напряжений для питания обмоток

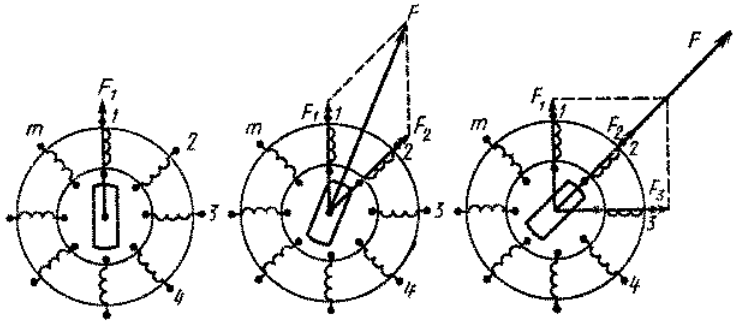
» формирователь импульсов
→ правильная форма и длительность импульса

» распределитель импульсов
→ правильное чередование фаз

» усилитель мощности
→ необходимая мощность для работы двигателя

Способы управления ШД

- Однополярное (униполярное) управление (коммутация)
  $\rightarrow$ изменение $U_ф$ от 0 до $+U$
- Двухполярное (биполярное) управление
  $\rightarrow$ изменение $U_ф$ от $-U$ до $+U$
  - Можно включать фазы поочередно (волновое управление)
  - Можно включать одновременно несколько фаз – для увеличения МДС, потока и момента
    - Симметричное управление
      - на каждом такте включается одинаковое число фаз
    - Несимметричное управление
      - число включенных фаз изменяется



- Импульсное управление
  - напряжение на фазу подается только при наличии сигнала
  - при обесточивании ротор надо фиксировать
- Потенциальное управление
  - фазы всегда под напряжением, изменение положения происходит при поступлении импульсов
  - ротор фиксируется полем включенной фазы

Принцип действия ШД

→ импульсное питание фаз статора
→ дискретное (скачкообразное) изменение магнитного поля
→ перемещение ротора на один шаг вслед за полем

Электрический шаг $\alpha_э = \dfrac{2\pi}{c_у}$

$c_у$ – число устойчивых электрических состояний на периоде поля

Механический шаг $\alpha_м = \dfrac{\alpha_э}{p} = \dfrac{2\pi}{pc_у}$

p – число пар полюсов (периодов)
$pc_у$ – число шагов многополюсного двигателя

» однополярная коммутация, симметричное управление → $c_у = m_1$

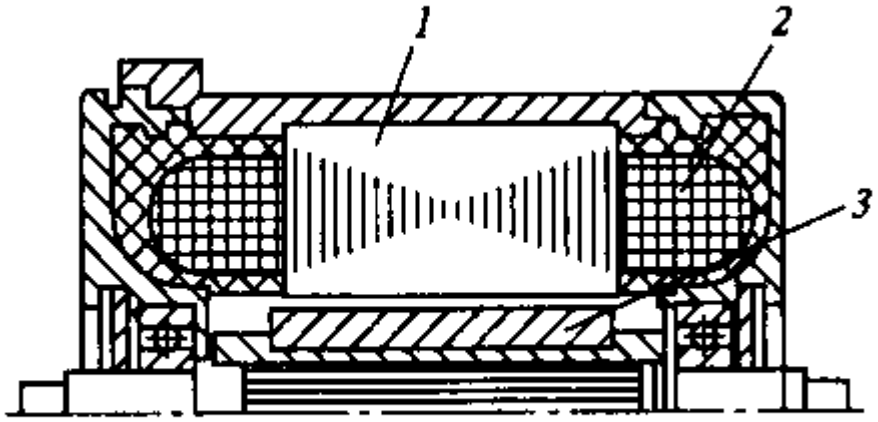
» двухполярная коммутация, симметричное управление
» однополярная коммутация, несимметричное управление → $c_у = 2m_1$

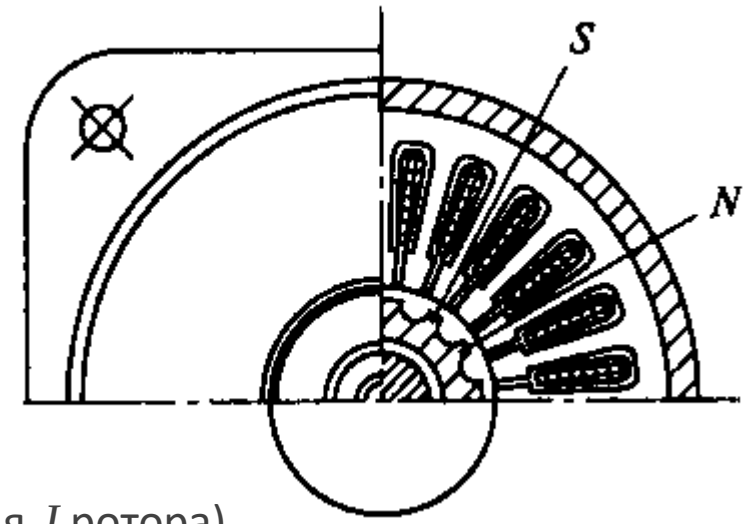
» двухполярная коммутация, несимметричное управление → $c_у = 4m_1$

Конструкции шаговых двигателей

Конструкции шаговых двигателей

ШД с активным ротором





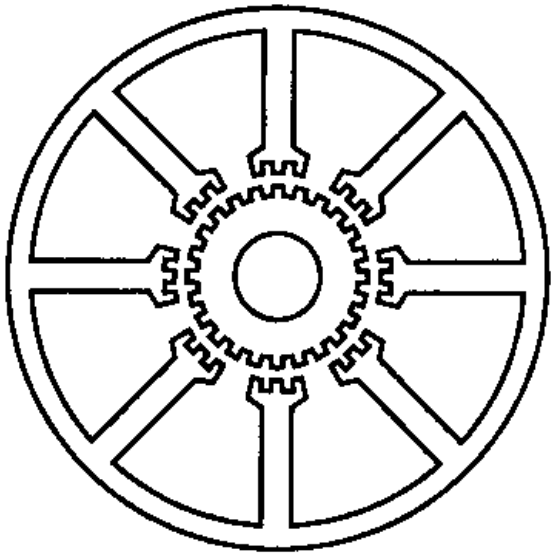
1 – сердечник статора
2 – многополюсная многофазная обмотка
3 – постоянные магниты

- диаметр ротора – минимальный (для снижения J ротора)
- число полюсов – максимальное (для уменьшения шага)
- при потенциальном управлении – на статоре скос пазов на t_{z1}
  - улучшение кривой синхронизирующего момента
  - снижение влияния зубцовых гармоник
- при импульсном управлении нет скоса, но пазы открытые
  - фиксация ротора при «залипании» за счет реактивного момента

Механический шаг
$\alpha_м = 15…90°$

Конструкции шаговых двигателей

Индукторный ШД



- статор и ротор шихтованные
- обмотка статора – в больших пазах
- на зубце статора – гребенчатая зубцовая зона

Угловой размер $\dfrac{2\pi}{m_1 Z_R}$

- число фаз статора $m_1 = 2\ldots4$
- число зубцов ротора $Z_R = Q(\mathrm{k}m_1 + a)$
  - Q – число больших зубцов статора с катушками одной фазы
  - k – целое число
  - a – определяет порядок фаз (если смежные фазы занимают соседние зубцы, то $a = 1$; если через один, то $a = 2$)

Магнитный поток индукторного ШД:

- постоянная составляющая
  - от постоянной составляющей тока ОУ
  - от ОВ
  - от ПМ
- переменная составляющая
  - от импульсов тока ОУ (вращается вслед за током)

Конструкции шаговых двигателей

Индукторный ШД с самовозбуждением

- $m_1 = 4$
- $Q = 2$
- $a = 1$

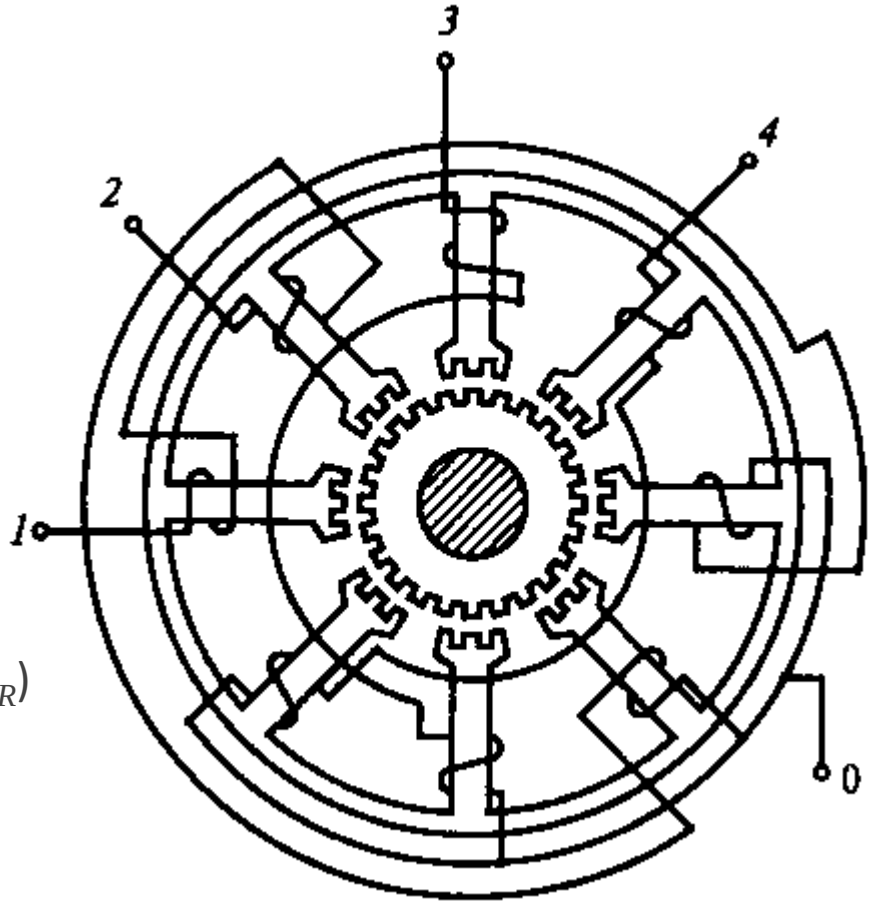
» фазы соединены в звезду
и шунтированы встречными диодами
при однополярном питании статора
→ пульсирующие фазные токи
→ постоянная и переменная составляющие тока

» постоянная составляющая тока → поле возбуждения ($p = m_1$)

» переменная составляющая тока → вращающееся поле ($p = Z_R$)

» механический шаг

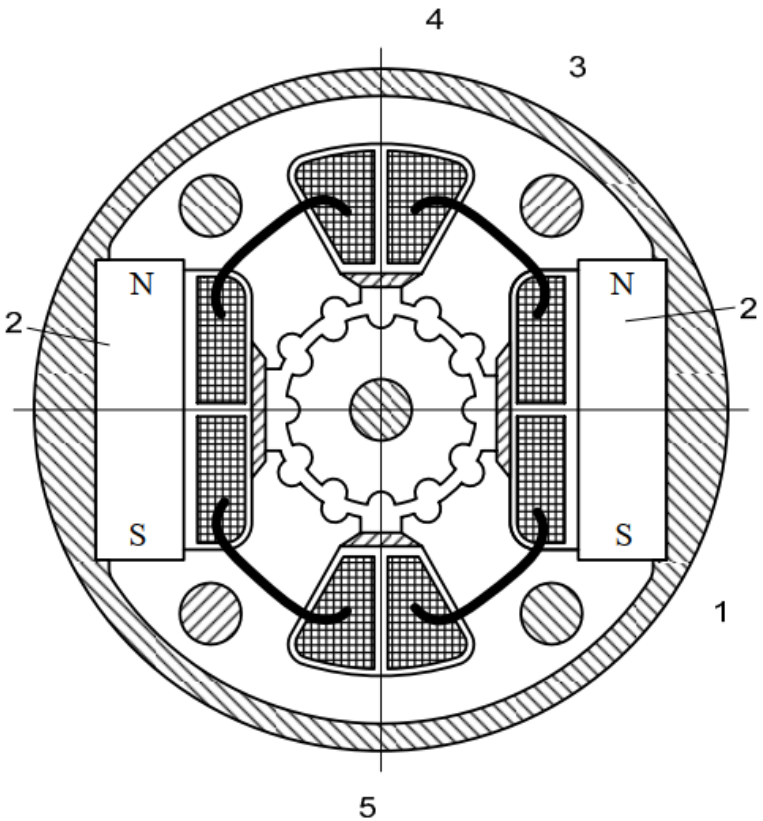
$$\alpha_m = \frac{2\pi}{Z_R c_y} = 3...1,5°$$



Конструкции шаговых двигателей

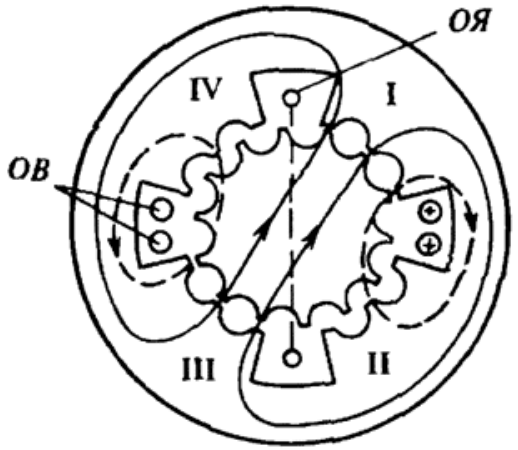
Индукторный ШД с возбуждением от ПМ

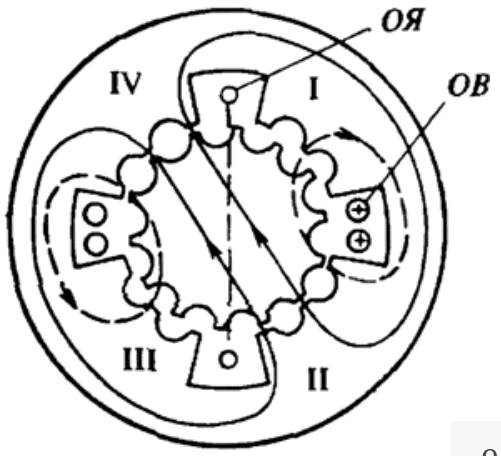
- Недостаток индукторного ШД с самовозбуждением – отсутствие фиксации ротора при отключении питания
- Фиксация обеспечивается в гибридных ШД с возбуждением от ОВ или ПМ



- 2 полупакета статора с двумя полюсными выступами и общим ярмом
- катушки двух фаз
- зубчатый ротор
- постоянные магниты

- Соседние полюсные выступы сдвинуты на π
- Катушки одной фазы включены согласно
- Магниты направлены встречно
- Возможно расщепление обмоток (m=4)

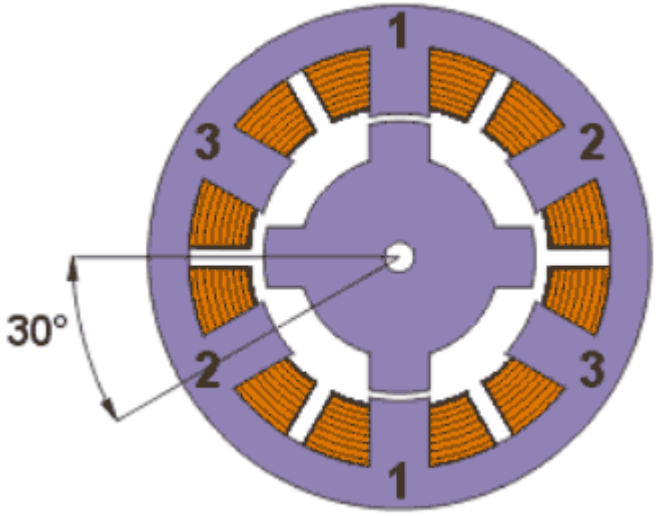




Конструкции шаговых двигателей

Реактивный ШД

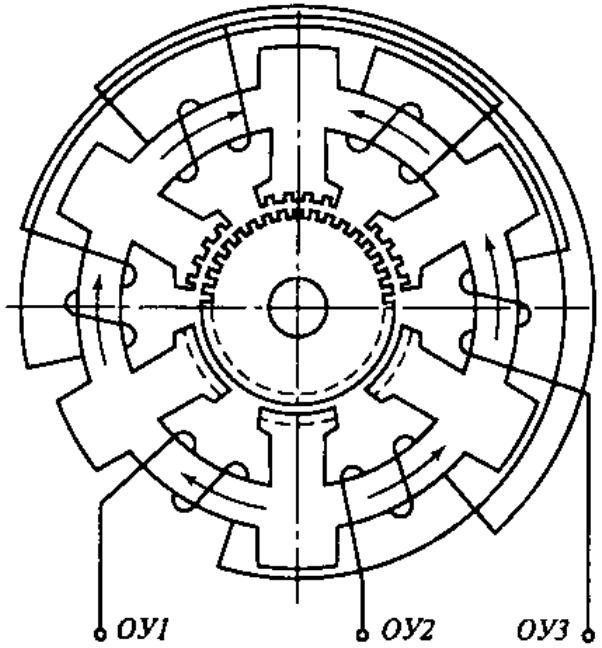
Реактивным может быть любой синхронный двигатель
с симметричными обмотками и явнополюсным ротором



Аналог вентильно-индукторного двигателя

- » последовательное включение фаз
- » поворот полюсов ротора к ближайшей возбужденной фазе

Для уменьшения шага – гребенчатая зубцовая зона на полюсах



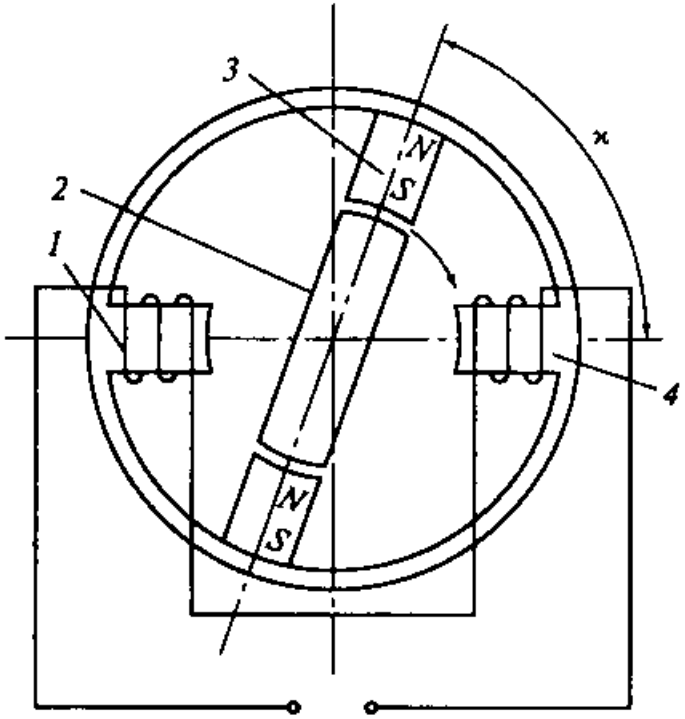
Конструкции шаговых двигателей

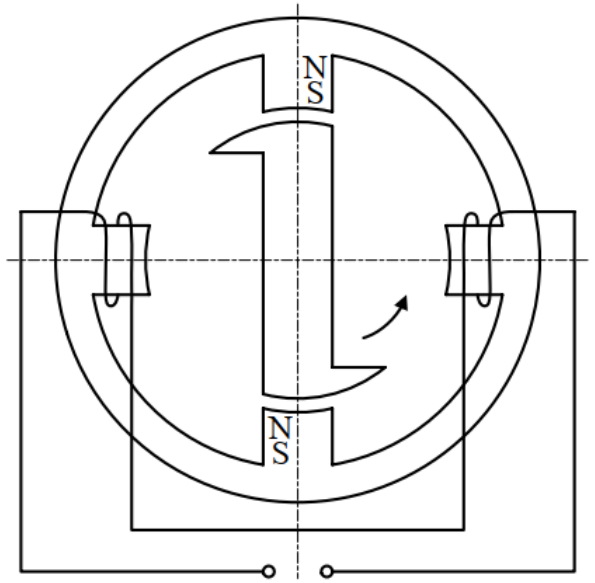
Реактивный ШД

Однофазные реактивные ШД применяются в маломощных системах автоматики
Отличаются однонаправленным вращением

Двухполюсный однофазный ШД
с инерционным выбегом ротора
1 – обмотка управления
2 – ротор
3 – ПМ
4 – пусковые полюса

Механический шаг $\alpha_м = 180°$





Вариант обеспечения направления поворота за счет магнитной несимметрии ротора

Для избирательности в направлении вращения выбирают угол $\chi < \pi/2$

- нет питания – ротор направлен на ПМ 3
- при включении питания – поворот в сторону полюса 4
- при достижении полюса отключают питание
- и ротор по инерции стремится к ПМ 3 (там фиксация)

Примеры реализации

Реальные двигатели для цифрового электропривода

«Цифровой» электропривод – обеспечивает точное позиционирование по импульсным (логическим) сигналам без ДПР

- станки с ЧПУ
- 3D принтеры
- роботы
- «умный» привод с регулируемой n (коптеры)

Конструкции

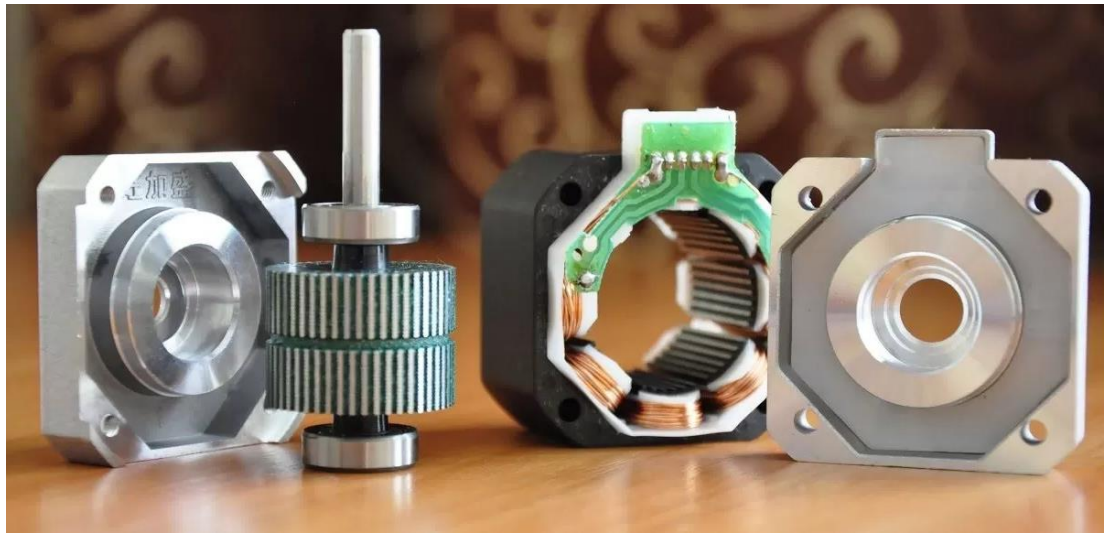
- реактивные ШД, ШД с ПМ, гибридные
- как правило, 2 фазные обмотки

Питание

- биполярное
- униполярное

Управление

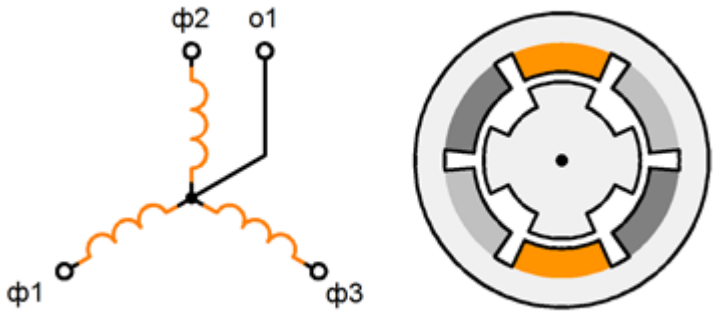
- волновое
- полношаговое
- полушаговое



Реактивный шаговый двигатель

Простая и дешевая конструкция
Фиксация ротора возможна только при потенциальном управлении

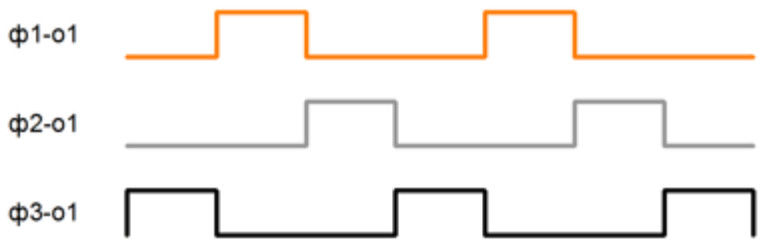
3-фазный двигатель 6/4



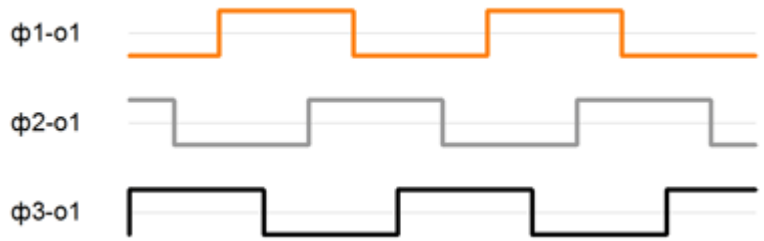
- Вращение ротора против поворота поля
- Для реверса – изменить чередование фаз
- Угол поворота при симметричном питании

$$\theta = \frac{360°}{N_R} - \frac{360°}{N_S}$$

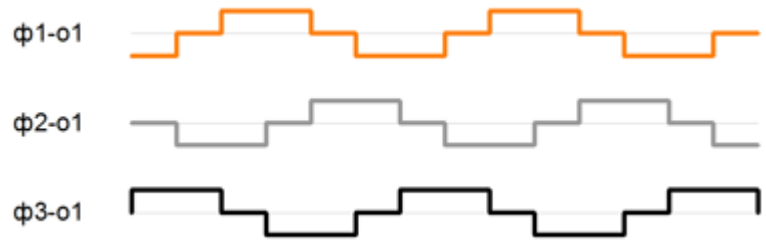
- для двигателя 6/4 шаг $\theta = 30°$



Униполярное волновое управление



Биполярное полношаговое управление

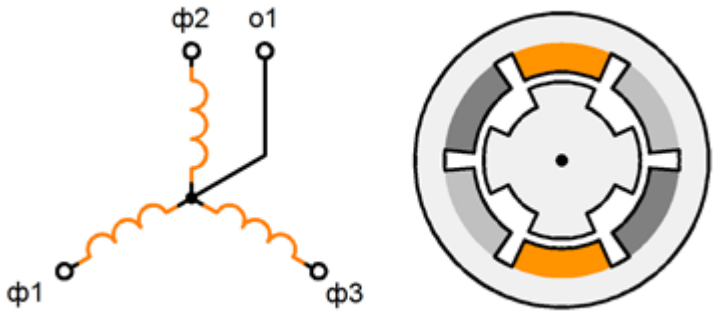


Биполярное полушаговое управление

Реактивный шаговый двигатель

Простая и дешевая конструкция
Фиксация ротора возможна только при потенциальном управлении

3-фазный двигатель 6/4

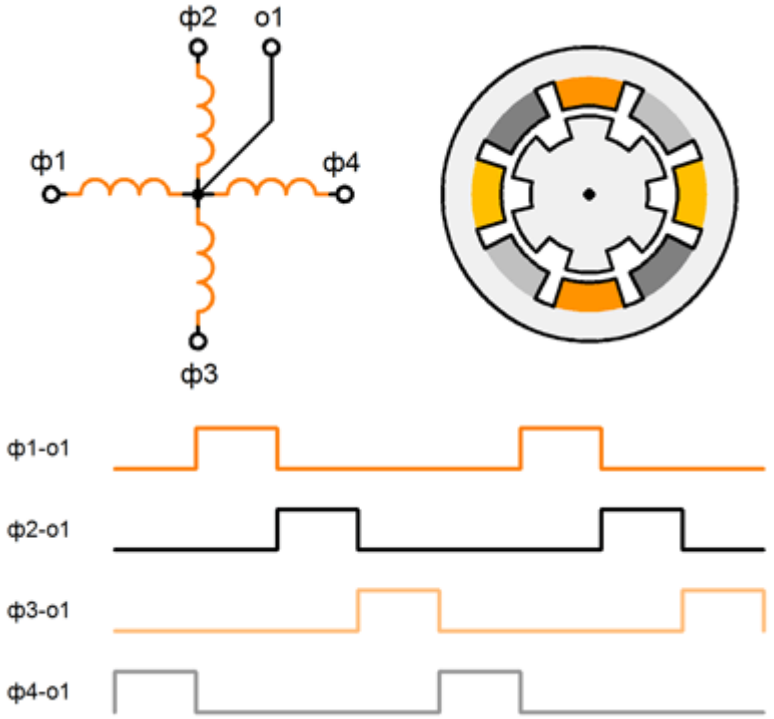


- Вращение ротора против поворота поля
- Для реверса – изменить чередование фаз
- Угол поворота при симметричном питании

$$\theta = \frac{360°}{N_R} - \frac{360°}{N_S}$$

- для двигателя 6/4 шаг $\theta = 30°$

4-фазный двигатель 8/6



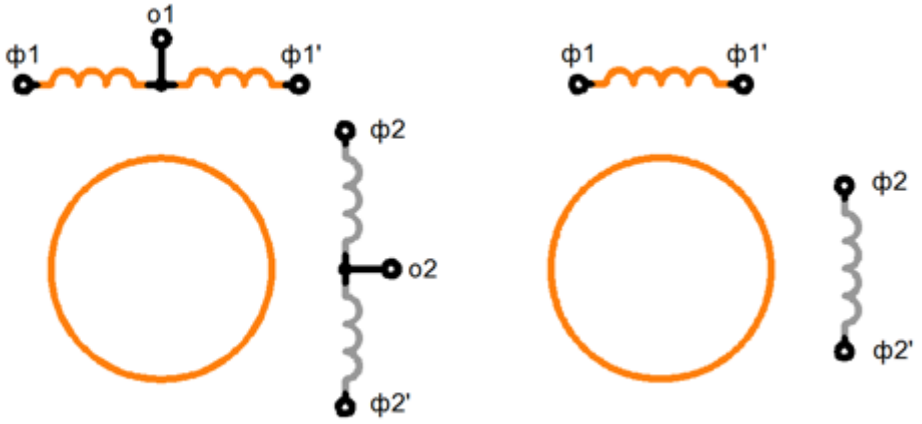
- для двигателя 8/6 шаг $\theta = 15°$

Шаговый двигатель с постоянными магнитами

Двигатель с магнитом типа «звездочка» на роторе с шагом $7{,}5°\ldots90°$
Обычно – 2-фазный двигатель с униполярным или биполярным управлением

Униполярное управление

» проще цепь питания



Биполярное управление

» больше момент

Для изменения полярности полюса

» $+U$ на одну или другую секцию фазы (вторая секция не используется)

» $+U$ или $-U$ на фазную обмотку (лучше использование меди)

Вращение ПМ с ротором $\rightarrow$ ЭДС в фазах $\rightarrow$ ток в цепи питания (надо защищать цепь) $\rightarrow$ тормозной момент

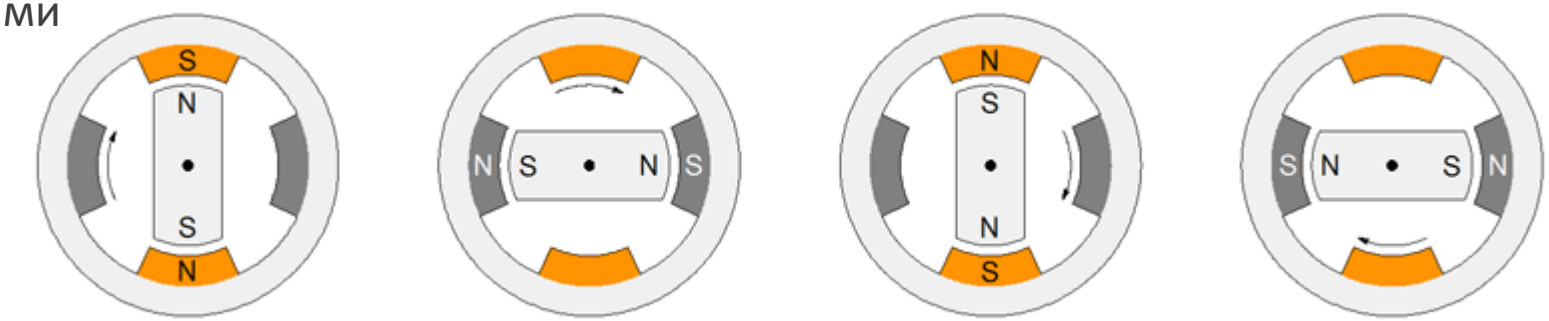
» не используются при больших n

Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

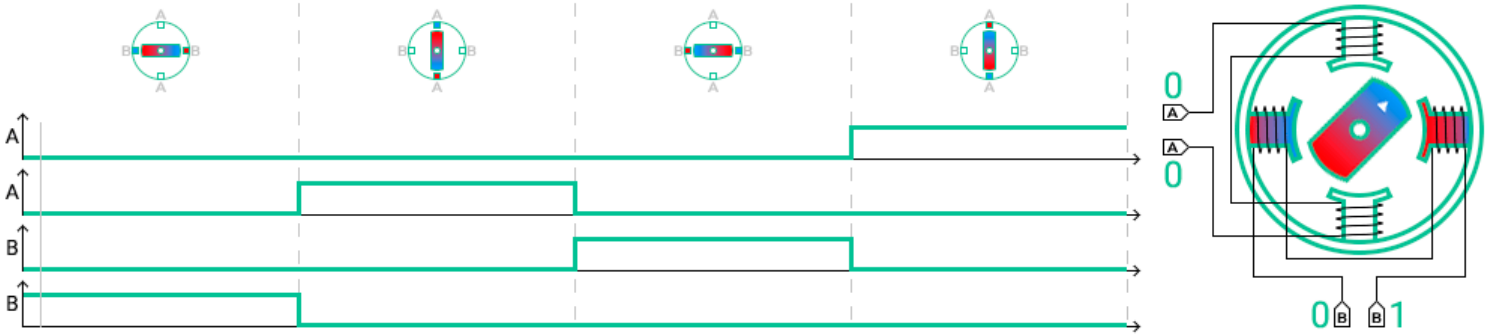
Волновое управление

» включена только одна обмотка



Волновое управление биполярным ШД

Не лучшее использование меди – момент меньше максимального на 40%



Способы управления ШД

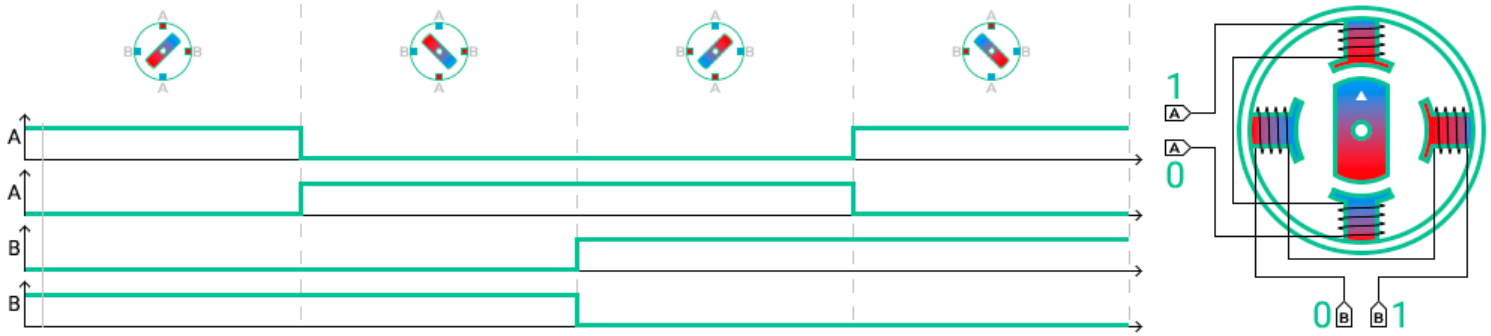
На примере ШД с постоянными магнитами

Полношаговое управление

» симметричное питание

Полношаговое управление биполярным ШД

Максимальный момент (обе обмотки включены одновременно)

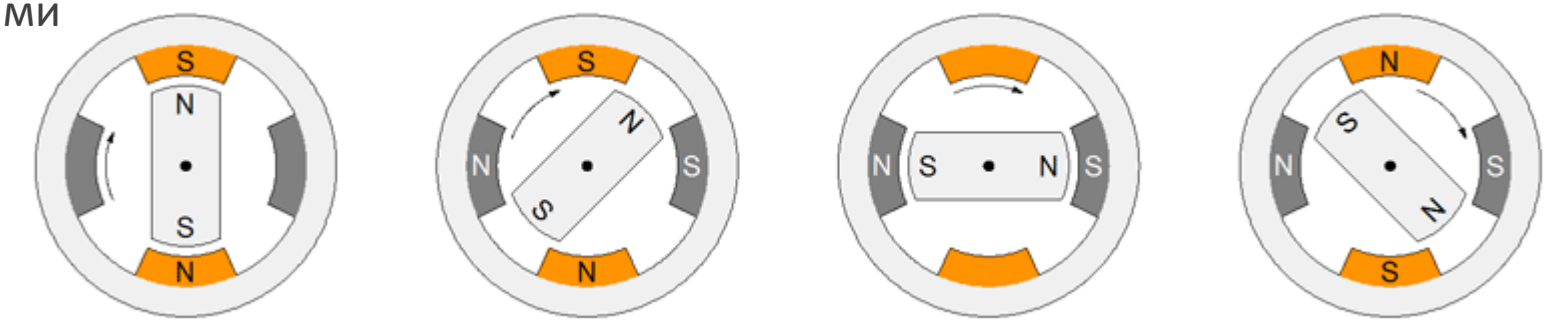


Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

Полушаговое управление

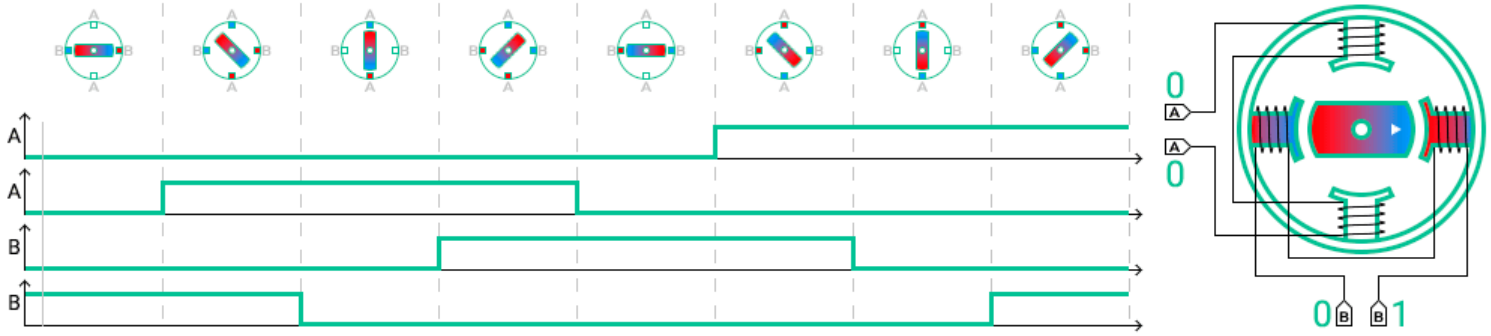
» несимметричное питание



Полушаговое управление биполярным ШД

Комбинация волнового и полношагового управления

Момент меньше, но выше точность позиционирования (меньше шаг)



Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

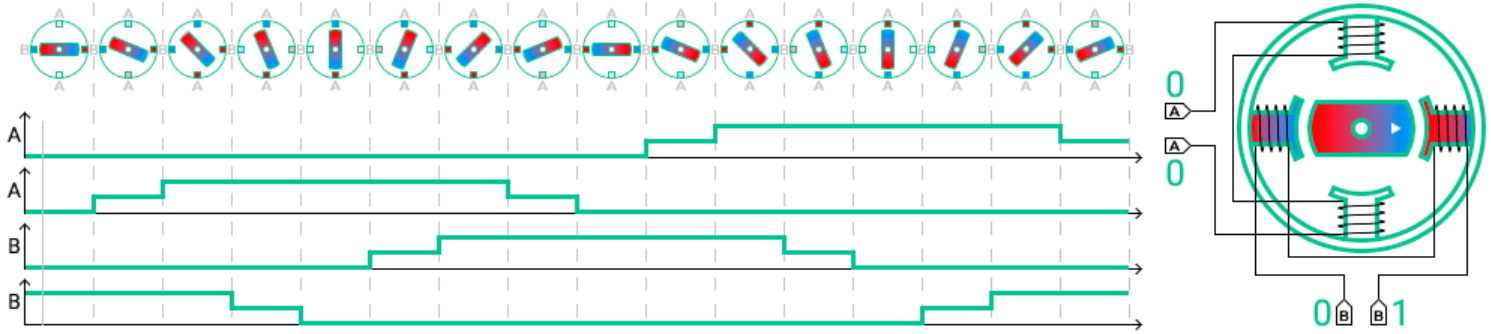
Полушаговое управление

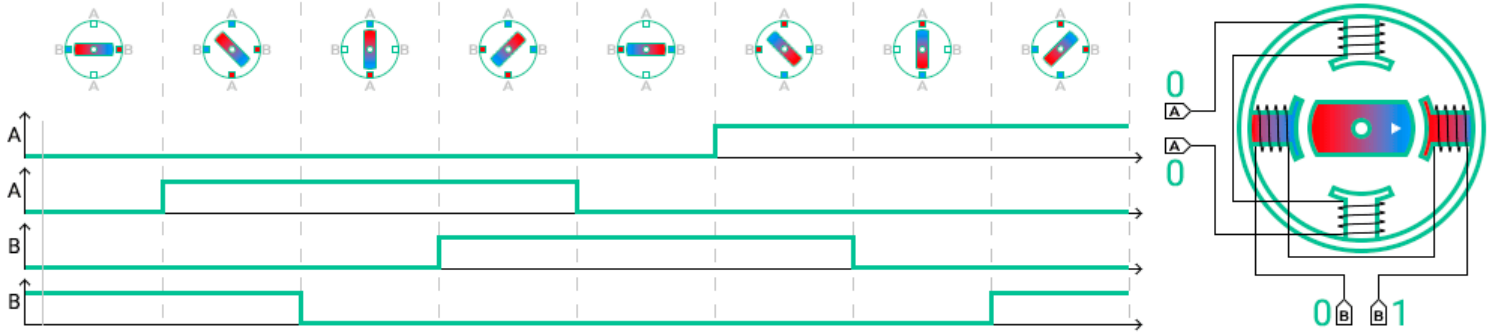
» несимметричное питание

Некоторые блоки управления допускают микрошаговое управление

» величина шага еще меньше

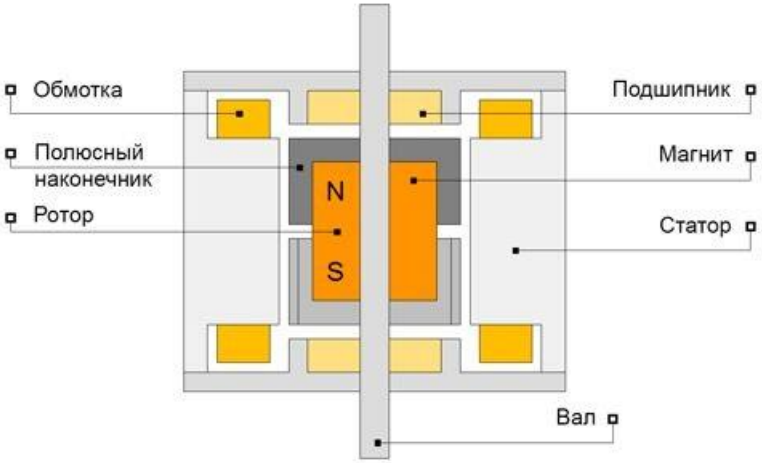
» требуется изменение величины U или I

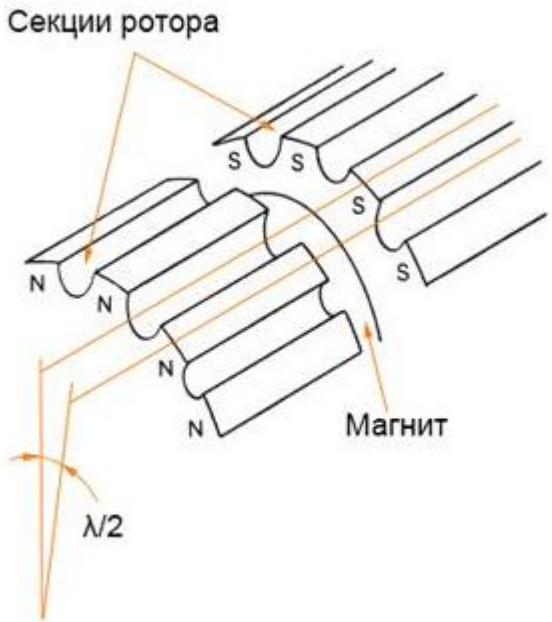


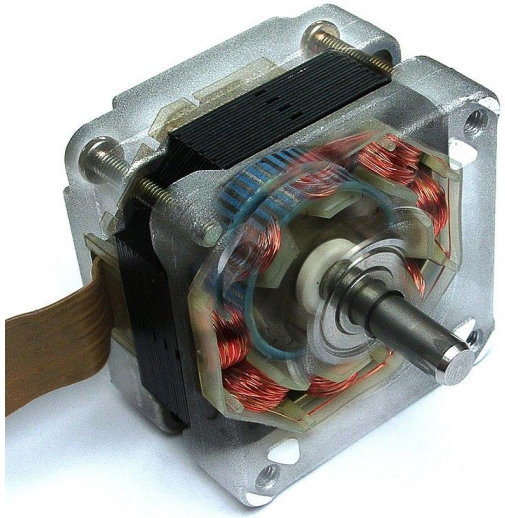


Гибридный шаговый двигатель

Реактивный (индукторный) ШД с аксиальным магнитом







- на статоре – 2 или 4 фазы на полюсах
- на полюсах – зубцы с шагом λ
- на роторе – 2 секции с зубцами с шагом λ (сдвинутые тангенциально на $\lambda/2$)
- между секциями – аксиальный магнит
- полюсы статора смещены на $\lambda/4$

Зубцы ротора притягиваются либо к одному полюсу статора, либо к другому в зависимости от возбуждения фаз с шагом $360/(4Z_R)$

Синхронизирующий момент

шагового двигателя

Синхронизирующий момент

Под синхронизирующим моментом понимают статический момент, стремящийся привести ротор в соответствие с полем статора
При этом теория СМ здесь не применима, т.к. на каждом шаге коммутации ШД питается от источника постоянного напряжения

Ток обмотки $I = \dfrac{U}{r} = \text{const}$

Магнитный поток $\Phi = \dfrac{Iw}{R_\mu} = \text{var}$

Взаимодействие I и Φ создает момент $M = f(\theta)$

В общем случае статический синхронизирующий момент шагового двигателя с зубчатыми активными статором и ротором

$$M(\theta) = M_S + M_R + M_{SR} = \frac{1}{2} p I_S \frac{dL_S}{d\theta} + \frac{1}{2} p I_R \frac{dL_R}{d\theta} + p I_S I_R \frac{dL_{SR}}{d\theta}$$

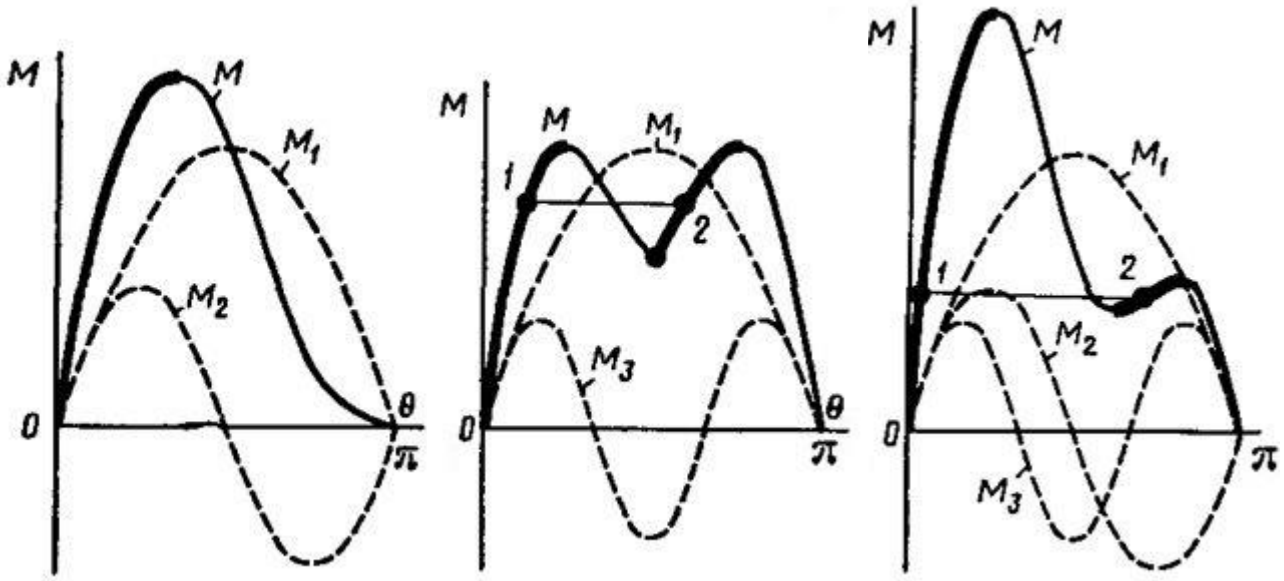
где составляющие момента
M_S – за счет изменения проводимости зазора на пути потока, созданного током I_S
M_R – за счет изменения проводимости зазора на пути потока, созданного током I_R
M_{SR} – за счет изменения взаимоиндукции между обмотками с токами I_S и I_R

Если ротор не возбужден ($I_R = 0$), остается только составляющая M_S

Синхронизирующий момент

Вид кривой синхронизирующего момента $M_S(\theta)$ определяется конфигурацией зубцовых и полюсных зон статора и ротора
$\rightarrow$ кривая момента всегда несинусоидальна
$\rightarrow$ может содержать различные гармоники

- Чем круче начальный участок кривой, тем больше удельный синхронизирующий момент
  $\rightarrow$ тем лучше синхронизирующая способность ШД
- Устойчивая работа ШД возможна только на участках с положительной производной момента
- Наличие провалов нежелательно
  $\rightarrow$ возможно появление двух устойчивых положений 1 и 2
  $\rightarrow$ неопределенность / неоднозначность положения ротора

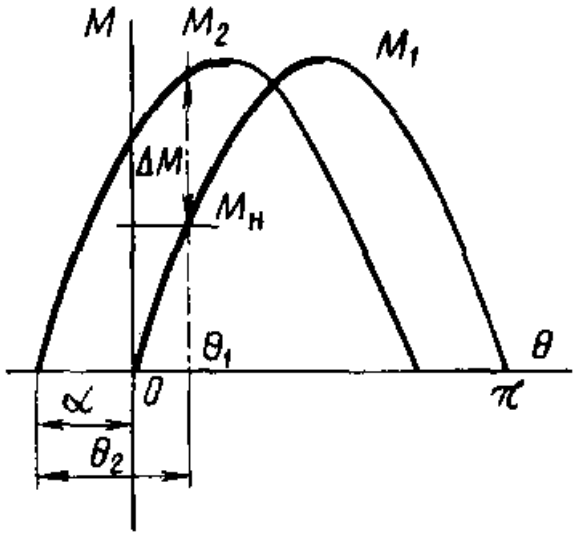


Синхронизирующий момент

Особенность шагового двигателя – скачкообразный поворот МДС в пространстве

Рассмотрим переход ШД в новое положение

- для простоты пусть кривая $M(\theta)$ синусоидальная



» в исходном положении кривая момента – M_1

» при нагрузке $M_н$ угол рассогласования (угол нагрузки) равен θ_1 (положение ротора относительно согласованного положения)

» на новом шаге МДС смещается на величину шага α

» в новом положении кривая момента – M_2

» при той же нагрузке $M_н$ угол рассогласования оказывается равен θ_2

» тогда синхронизирующий момент ΔM поворачивает ротор в новое устойчивое положение

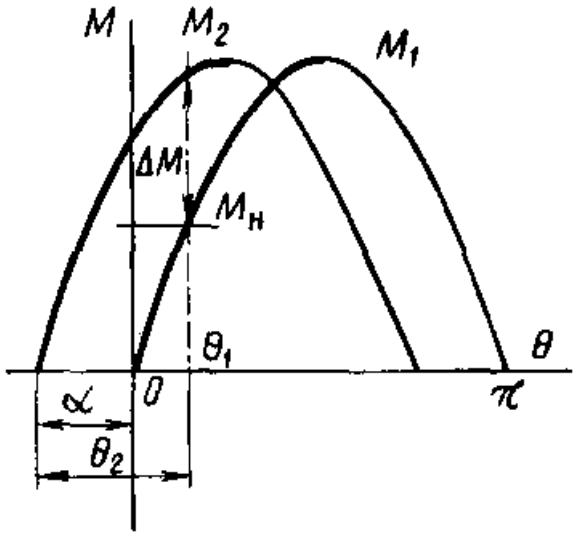
» (относительно нового согласованного положения ротор вновь в положении θ_1)

Синхронизирующий момент

Особенность шагового двигателя – скачкообразный поворот МДС в пространстве

Рассмотрим переход ШД в новое положение

- для простоты пусть кривая $M(\theta)$ синусоидальная



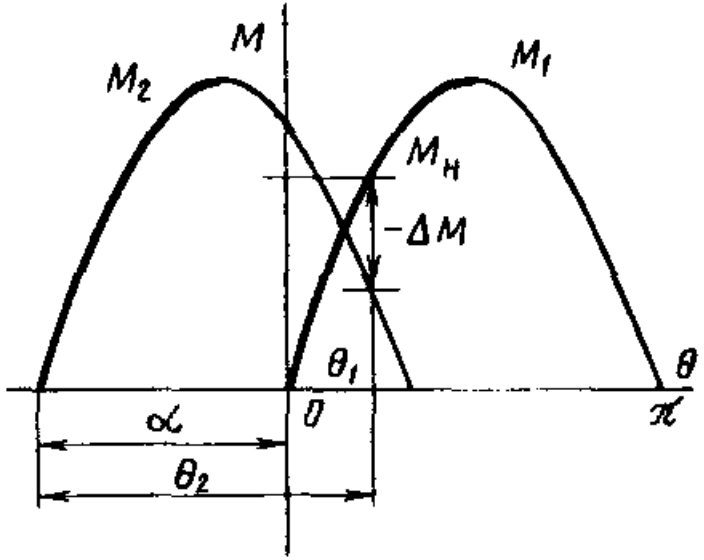
Если шаг α будет слишком большим, ротор попадет в зону неустойчивой работы

» синхронизирующий момент $\Delta M < 0$

» ротор не следует за полем $\rightarrow$ потеря шага

- ротор не поворачивается
- теряется информация в системе автоматики

Чтобы этого не случилось надо соблюдать условие $M_н < M_m \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$



Поскольку шаг $\alpha = 2\pi/c_у$

» чем больше число устойчивых состояний $c_у$, тем больше может быть нагрузка ($M_н$)

» при $c_у = \infty$ работа ШД аналогична синхронному двигателю

Режимы работы

шаговых двигателей

Режимы работы

Поскольку питание обмоток импульсное, в ШД постоянно идут переходные процессы (электромагнитные и электромеханические)
Переходный процесс характеризуется периодом (частотой) собственных колебаний ротора без нагрузки на валу

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

Угловая частота собственных колебаний $\omega_0 = \sqrt{\frac{pM_c}{J_R}}$ определяется моментом инерции J и синхронизирующим моментом M_c

Электромагнитные переходные процессы не оказывают влияния на работу ШД, если

- постоянные времени обмоток невелики $T_э = \frac{L_S}{r_S} \le \frac{1}{4\pi f_0} = \frac{T_0}{4\pi}$
- частота поступающих импульсов мала $f_{имп} \le \pi f_0$

Режим работы ШД зависит от частоты поступающих импульсов $f_{имп}$

Режимы работы

Статический режим

При частоте поступающих импульсов $f_{\text{имп}} = 0$
$\rightarrow$ в обмотках протекает постоянный ток
$\rightarrow$ в ШД – постоянное магнитное поле
$\rightarrow$ ротор неподвижен в устойчивом положении

- При отсутствии нагрузки ($M_{\text{вн}} = 0$) ротор находится в согласованном положении
- Под действием нагрузочного момента $M_{\text{вн}}$ ротор отклоняется на угол рассогласования θ
- Нагрузочный момент $M_{\text{вн}}$ не должен превышать максимального синхронизирующего момента M_{cm}

Номинальный момент ШД обычно $M_{\text{н}} = (0{,}4\ldots0{,}5)M_{cm}$

Режимы работы

Квазистатический режим

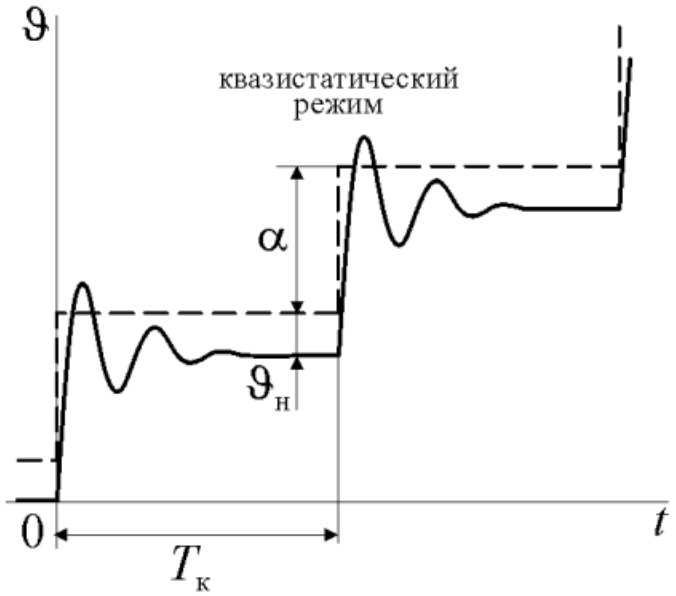
При низкой частоте поступающих импульсов $f_{имп} << f_0$
ШД отрабатывает единичные шаги

- переходные процессы затухают к началу следующего шага
- угловая скорость ротора к началу следующего шага равна нулю

» Во время паузы ротор фиксируется магнитным полем (потенциальное управление) в положении угла нагрузки $\theta_н$

» При подаче импульса происходит отработка шага

- МДС поворачивается на угол шага α
- угол нагрузки становится равен $\theta_2 = \alpha + \theta_н$
- увеличившийся синхронизирующий момент $M_с$ поворачивает ротор в новое положение, если конечно $M_{вн} < M_{ст}\cos(\alpha/2)$



Период коммутации $T_к >> T_0$

Предельная частота подачи импульсов определяется затуханием свободных колебаний ротора
Для уменьшения качаний ротора используют

» демпфирующие устройства

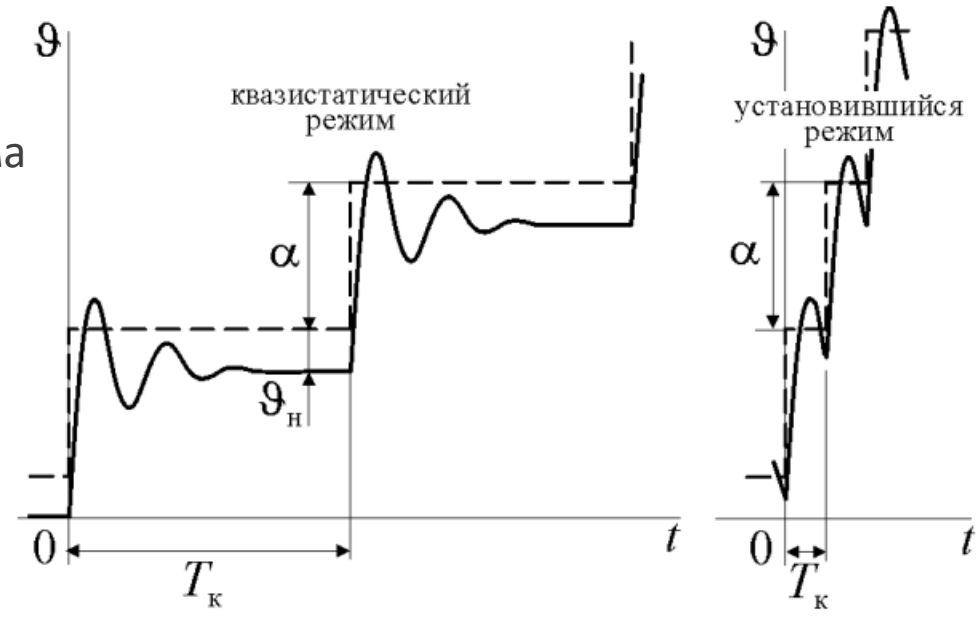
» увеличение числа фаз / числа тактов коммутации (уменьшается α и кинетическая энергия ротора)

Режимы работы

Резонансный режим

При частоте поступающих импульсов $f_{имп} = f_0$
→ явление электромеханического резонанса
» при слабом демпфировании возможно выпадение из синхронизма

Для уменьшения качаний ротора – «старт-стопное» управление
» в конце отработки шага включается дополнительная встречная коммутация фаз для активного торможения ротора



$T_к < T_0$

Установившийся режим

При частоте поступающих импульсов $f_{имп} > f_0$ → установившийся периодический режим
» ротор не успевает остановиться в устойчивом положении
» возможны вынужденные колебания возле точки устойчивого равновесия
» ротор имеет постоянную среднюю частоту вращения n пропорциональную $f_{имп}$

Если вращается ротор с ПМ → ЭДС в фазах статора → токи → тормозной (генераторный) момент
» (он может демпфировать качания ротора)

Работа шагового исполнительного двигателя

Исполнительный двигатель обеспечивает требуемую скорость v / момент m
в соответствии с поступающим сигналом управления
В ШД сигнал управления – частота поступающих импульсов $f_{имп}$
Требование к ШД в переходных режимах – сохранение синхронизма при изменении $f_{имп}$
(отсутствие потери шага)
Важная характеристика ШД – частота приемистости $f_{пр}$ – предельная частота импульсов,
при которой ротор из состояния покоя втягивается в синхронизм (начинает вращаться без потери шага)
Соответствующая средняя скорость вращения – скорость приемистости $\Omega_{пр}$

Рассмотрим <u>процесс вхождения в синхронизм</u> на основе баланса энергии

За время одного импульса $T_{имп}$ ротор должен разогнаться до скорости $\Omega_{пр}$
за счет синхронизирующего момента $\Delta M_с$ при изменении угла нагрузки от θ_1 до θ_2

Работа (энергия) синхронизирующего момента $A_с$
за вычетом работы внешнего момента $A_{вн}$
должна быть больше необходимого прироста кинетической энергии $\Delta W_к = \dfrac{J\Omega_{пр}^2}{2}$

$$A_с - A_{вн} \geq \Delta W_к$$

Работа шагового исполнительного двигателя

Работа синхронизирующего момента при изменении угла нагрузки от θ_1 до θ_2 (считая M_c синусоидальным)

$$A_c = \frac{1}{p}\int_{\theta_1}^{\theta_2} M_{cm}\sin\theta d\theta = \frac{2}{p}M_{cm}\cos\theta_1$$

Работа внешнего момента на том же участке (считая $M_{вн} = \text{const}$)

$$A_{вн} = \frac{1}{p}\int_{\theta_1}^{\theta_2} M_{вн} d\theta = \frac{1}{p}M_{вн}\left(\pi - 2\theta_1\right)$$

Уравнение баланса энергии $A_c - A_{вн} \geq \Delta W_к$ в пределе даст

$$\frac{2}{p}M_{cm}\cos\theta_1 - \frac{1}{p}M_{вн}\left(\pi - 2\theta_1\right) = \frac{J\Omega_{пр}^2}{2} \quad \text{или} \quad 4\left(M_{cm}\cos\theta_1 - M_{вн}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)\right) = pJ\Omega_{пр}^2$$

Переходя к относительным единицам $4\left(\cos\theta_1 - k_{вн}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)\right) = p\frac{J\Omega_{пр}^2}{M_{cm}}$ где $k_{вн} = \frac{M_{вн}}{M_{cm}}$

С учетом $\omega_0 = \sqrt{\frac{pM_c}{J_R}}$ запишем уравнение баланса энергии как $4\left(\cos\theta_1 - k_{вн}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)\right) = \frac{p^2\Omega_{пр}^2}{\omega_0^2}$

Можно оценить скорость приемистости

Работа шагового исполнительного двигателя

Упростим уравнение баланса энергии $$4\left(\cos\theta_1 - k_{вн}\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)\right) = \frac{p^2\Omega_{пр}^2}{\omega_0^2}$$

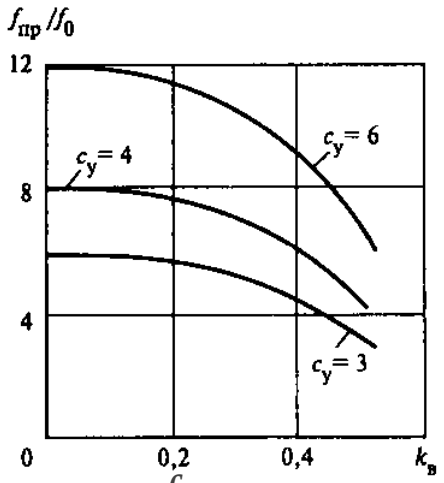
Обычно $k_{вн} < 0{,}5$, поэтому примем

$$\cos\theta_1 = \sqrt{1-k_{вн}^2} \approx 1 - 0{,}5k_{вн}^2 \qquad \theta_1 = \arcsin k_{вн} \approx k_{вн}$$

Тогда можно выразить скорость приемистости $$\Omega_{пр} = \frac{2\omega_0}{p}\sqrt{1-\frac{\pi}{2}k_{вн}+\frac{1}{2}k_{вн}^2}$$ и частоту $$f_{пр} = 2f_0 c_у\sqrt{1-\frac{\pi}{2}k_{вн}+\frac{1}{2}k_{вн}^2}$$

- Скорость приемистости (максимальная начальная скорость) зависит от нагрузки ($k_{вн}$)
- Частота приемистости кроме того зависит от числа устойчивых состояний ШД $c_у$

В современных ШД $f_{пр} = 100\ldots1000$ Гц



Зависимость $f_{пр}$ от нагрузки ($k_{вн}$)

Другие ограничения ШД

- <u>Торможение</u> (скачкообразное уменьшение $f_{имп}$ до 0): предельная частота торможения – больше $f_{пр}$
- <u>Реверс</u> (изменение алгоритма коммутации): предельная частота реверса – $(0{,}2\ldots0{,}5)\ f_{пр}$
- <u>Установившийся режим</u> (постепенное повышение $f_{имп}$): предельная частота f_{max}, при которой ШД еще успевает отрабатывать шаги (проблема в запаздывании токов из-за влияния L)

Влияние индуктивности обмоток

При малом числе фаз их индуктивность относительно велика ($L \sim w^2$)

Влияние индуктивности – аналогично L в вентильных двигателях

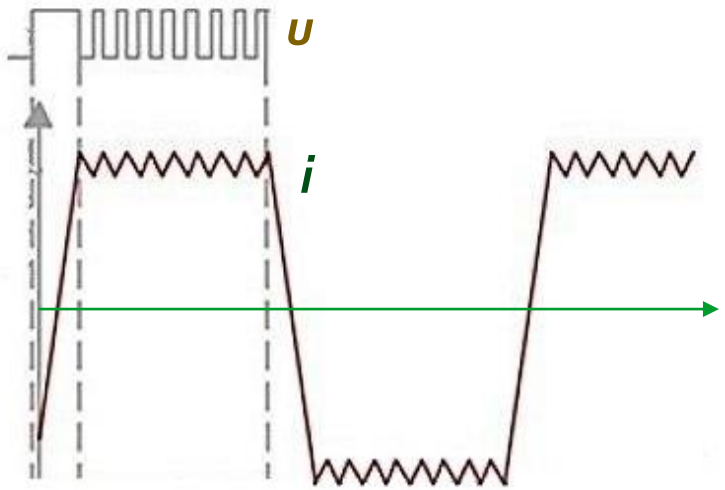
» замедленное нарастание тока $\rightarrow$ снижение момента (при больших n)

Для противодействия используют повышенное напряжение с одновременным ограничением тока

» При питании от источника постоянного напряжения номинальный ток $I_н = U/R$

» При повышенном напряжении ток нарастает быстро (даже при L)

- но приходится ограничивать ток на безопасном уровне (chopper)



Применение шаговых двигателей

- При частотах вращения $n = 2000…3000$ об/мин применяют ШД с возбуждением от ПМ
  - номинальный момент $M_н = 0{,}01…1$ Нм
  - угловой шаг $\alpha_м = 15°…90°$
- При частотах вращения до $n = 1000$ об/мин применяют гибридные индукторные и реактивные ШД
  - номинальный момент $M_н = 0{,}1…2{,}5$ Нм
  - угловой шаг $\alpha_м = 1{,}5°…3°$

Преимущества шагового двигателя
- точное позиционирование без обратной связи
- фиксация ротора в требуемом положении
- отсутствие щеток (бесконтактность → надежность)
- отсутствие датчика положения ротора (надежность)
- простое регулирование n в широком диапазоне
- возможность получения малых частот вращения
- большой момент на низких оборотах

Недостатки шагового двигателя
- резонанс на f_0 (требуется старт-стопное управление)
- при потере шага нет средств восстановления
- при потенциальном управлении – потребляет энергию даже при $n = 0$
- снижение момента при больших частотах вращения
- невысокая удельная мощность
- относительно сложная схема управления

Далее

Сельсины

Ширинский С.В.
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»
ShirinskiiSV@mpei.ru
https://e-200.ru/EMAU/