

Шаговые исполнительные двигатели

Исполнительные двигатели
дискретного действия

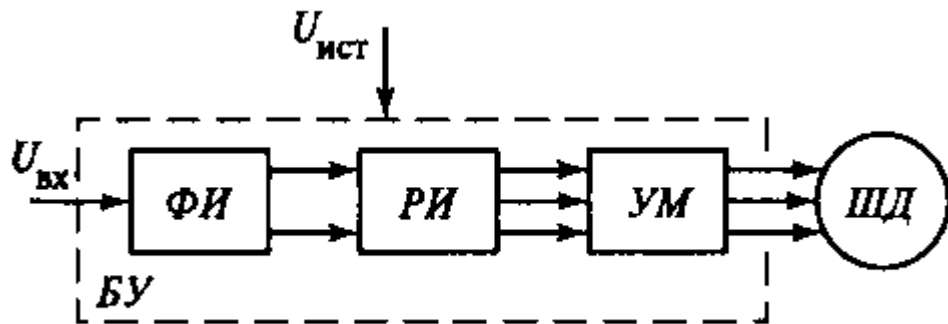


Шаговые исполнительные двигатели

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

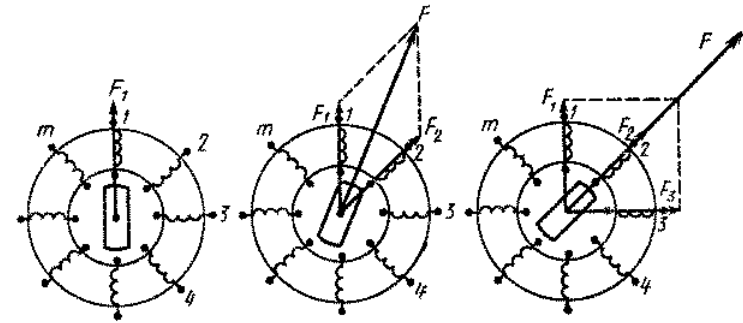


Блок управления – преобразует импульсный входной сигнал в многофазную систему напряжений для питания обмоток

- » 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)
 - изменение U_{ϕ} от 0 до $+U$
- » Двухполярное (биполярное) управление
 - изменение U_{ϕ} 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

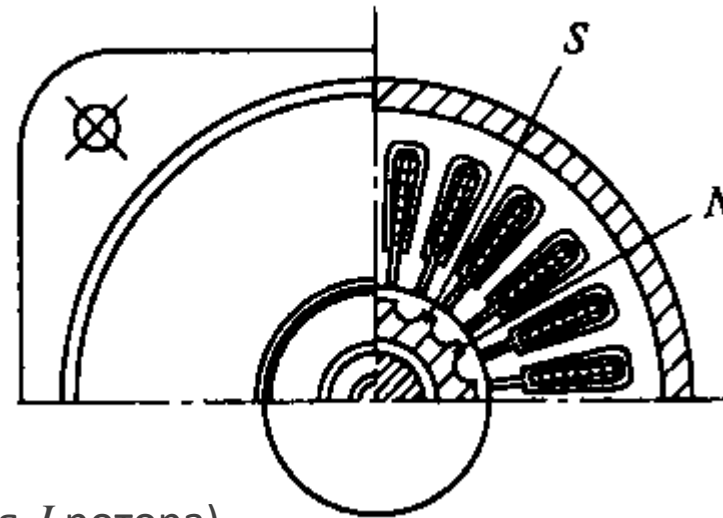
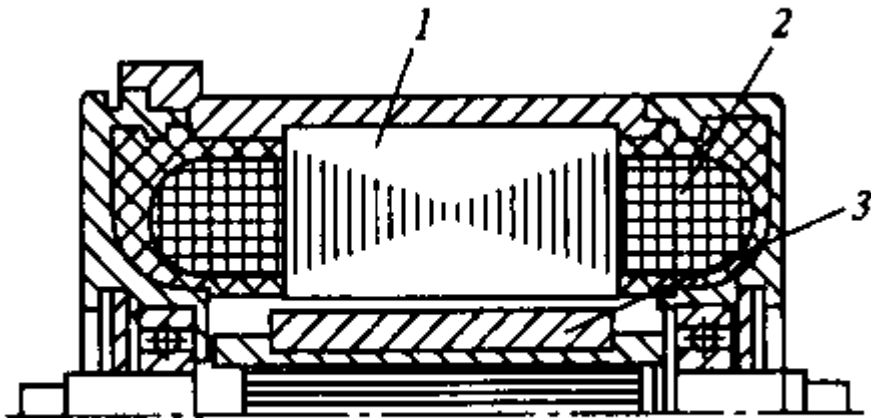
Электрический шаг	$\alpha_{\text{э}} = \frac{2\pi}{c_y}$	c_y – число устойчивых электрических состояний на периоде поля
Механический шаг	$\alpha_{\text{м}} = \frac{\alpha_{\text{э}}}{p} = \frac{2\pi}{pc_y}$	p – число пар полюсов (периодов) pc_y – число шагов многополюсного двигателя

- » однополярная коммутация, симметричное управление → $c_y = m_1$
- » двухполярная коммутация, симметричное управление → $c_y = 2m_1$
- » однополярная коммутация, несимметричное управление → $c_y = 4m_1$
- » двухполярная коммутация, несимметричное управление → $c_y = 4m_1$

Конструкции шаговых двигателей

Конструкции шаговых двигателей

ШД с активным ротором



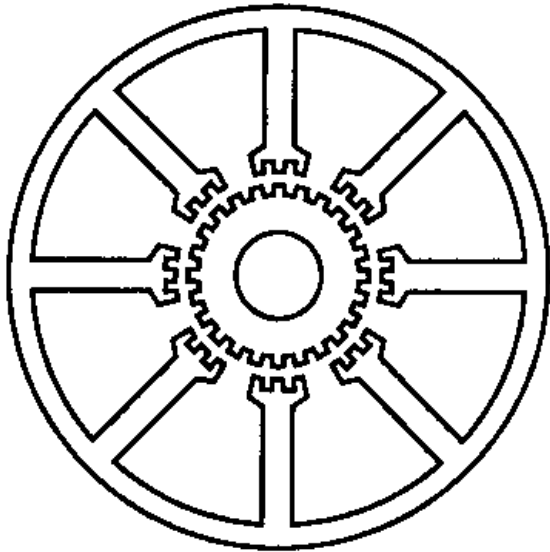
- 1 – сердечник статора
- 2 – многополюсная многофазная обмотка
- 3 – постоянные магниты

- » 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
 $\alpha_M = 15 \dots 90^\circ$

Конструкции шаговых двигателей

Индукторный ШД



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

Угловой размер $\frac{2\pi}{m_1 Z_R}$

- » число фаз статора $m_1 = 2 \dots 4$
- » число зубцов ротора $Z_R = Q(km_1 + a)$
 - 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:

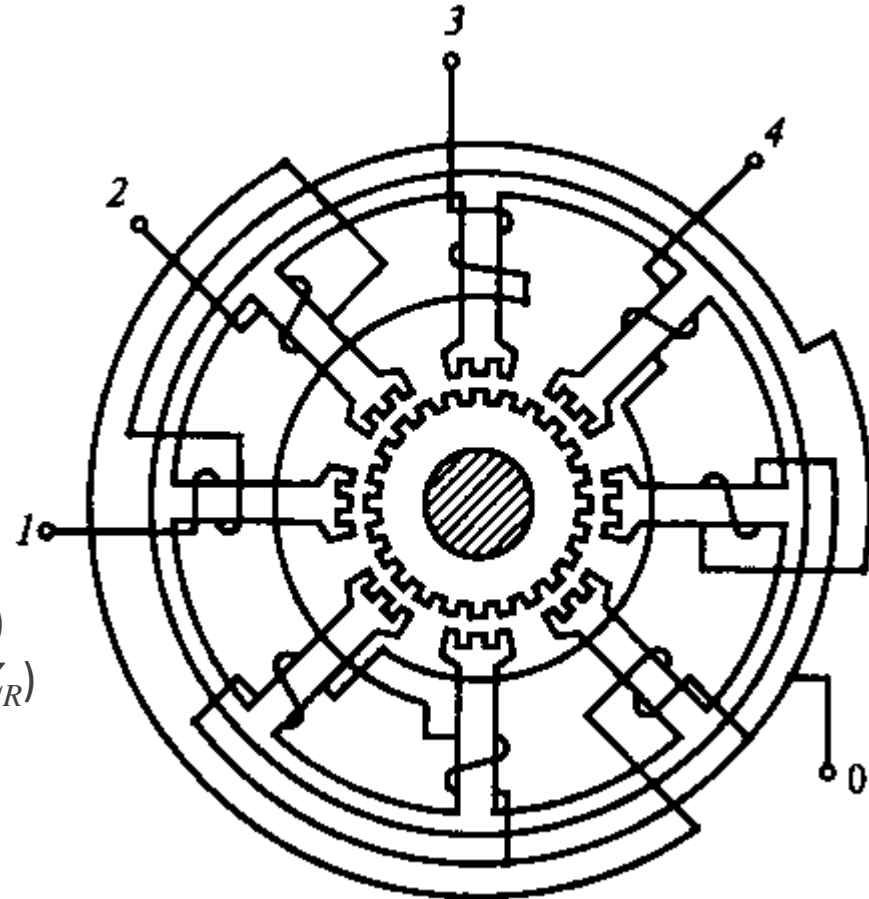
- » постоянная составляющая
 - от постоянной составляющей тока ОУ
 - от ОВ
 - от ПМ
- » переменная составляющая
 - от импульсов тока ОУ (вращается вслед за током)

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

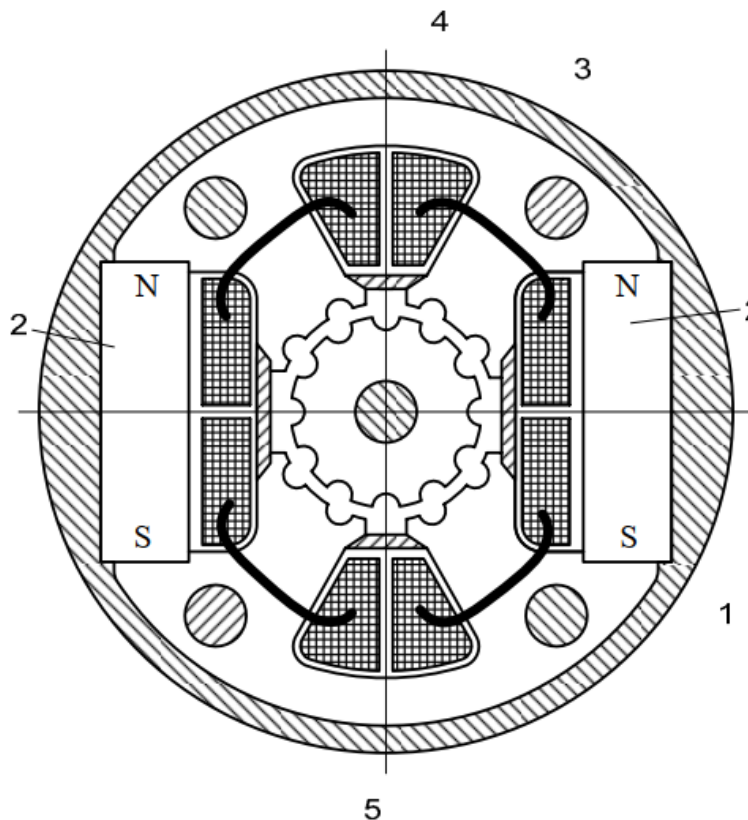
$$\alpha_m = \frac{2\pi}{Z_R c_y} = 3...1,5^\circ$$



Конструкции шаговых двигателей

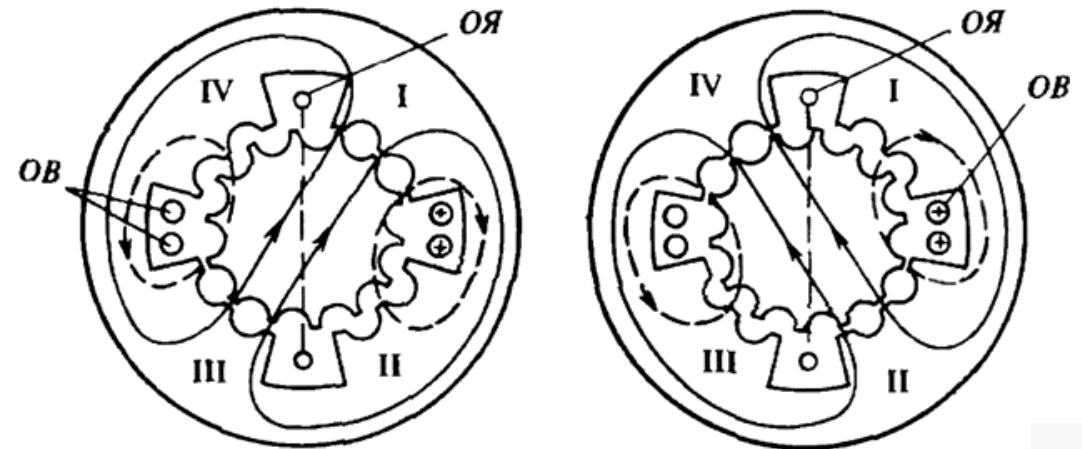
Индукторный ШД с возбуждением от ПМ

- » 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

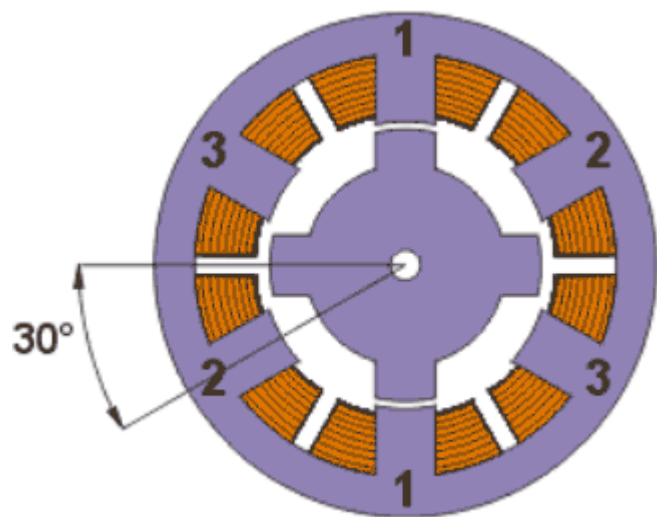
- » Соседние полюсные выступы сдвинуты на π
- » Катушки одной фазы включены согласно
- » Магниты направлены встречно
- » Возможно расщепление обмоток ($m=4$)



Конструкции шаговых двигателей

Реактивный ШД

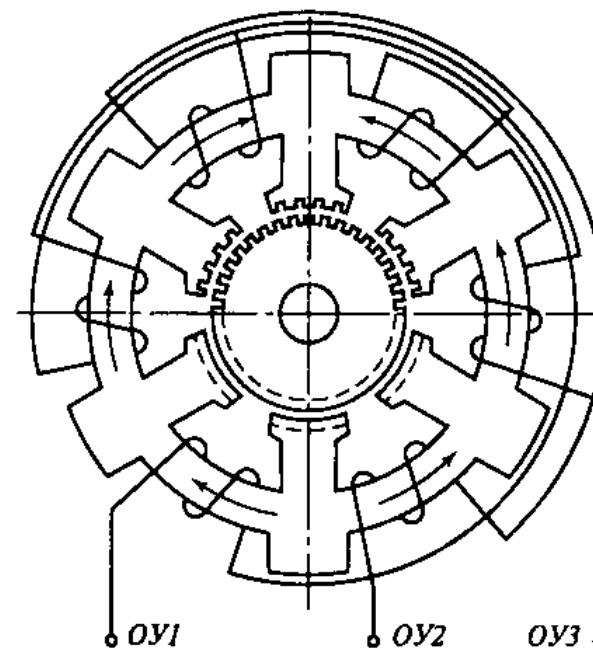
Реактивным может быть любой синхронный двигатель с симметричными обмотками и явнополюсным ротором



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

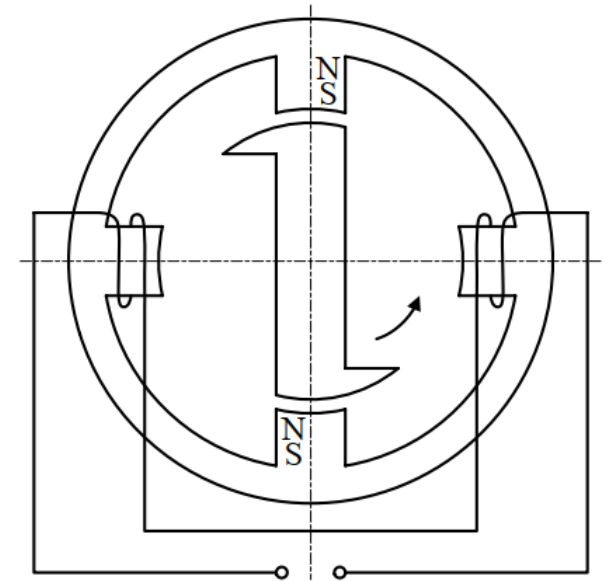
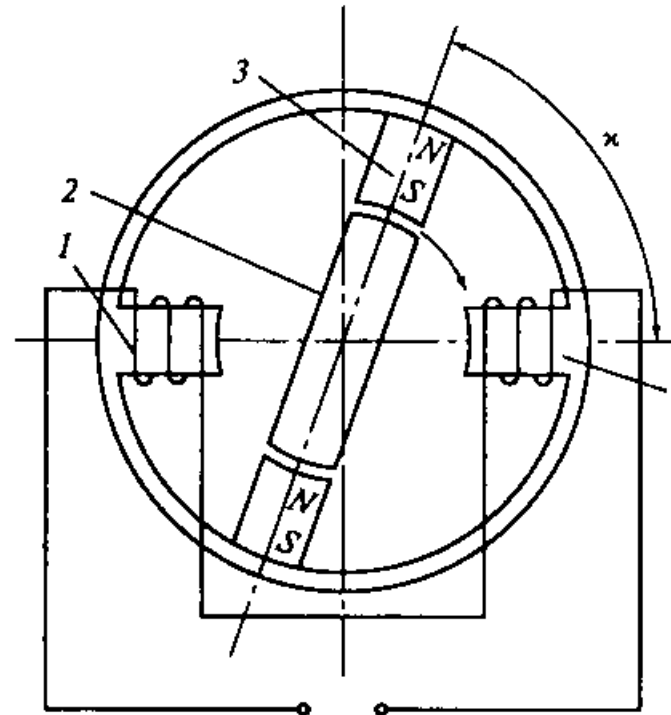
Двухполюсный однофазный ШД
с инерционным выбегом ротора

- 1 – обмотка управления
- 2 – ротор
- 3 – ПМ
- 4 – пусковые полюса

Механический шаг $\alpha_M = 180^\circ$

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)



Вариант обеспечения
направления поворота
за счет магнитной
несимметрии ротора

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

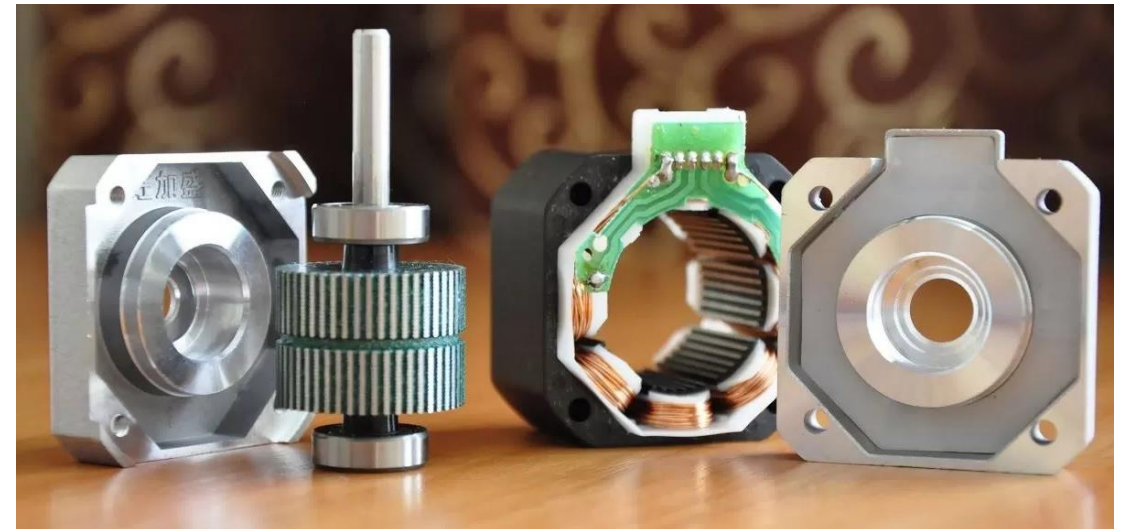
- » реактивные ШД, ШД с ПМ, гибридные
- » как правило, 2 фазные обмотки

Питание

- » биполярное
- » униполярное

Управление

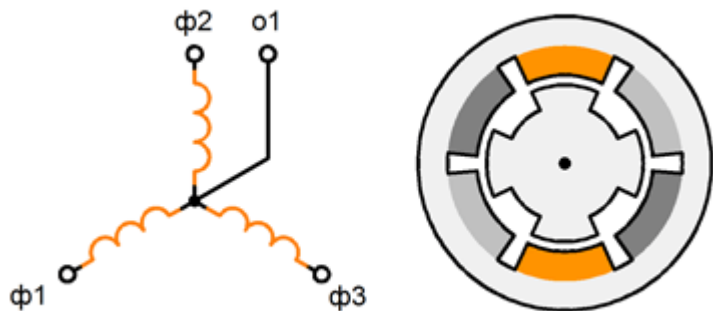
- » волновое
- » полношаговое
- » полушаговое



Реактивный шаговый двигатель

Простая и дешевая конструкция
Фиксация ротора возможна только
при потенциальном управлении

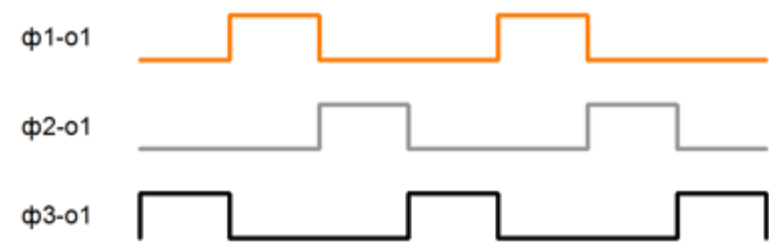
3-фазный двигатель 6/4



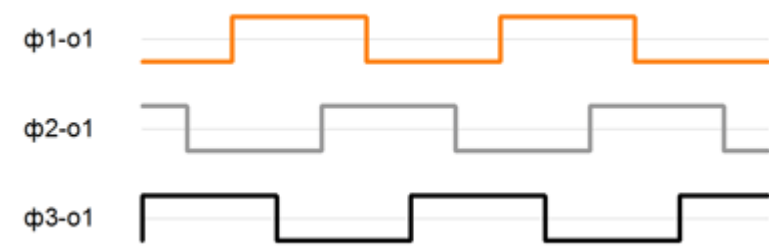
- » Вращение ротора против поворота поля
- » Для реверса – изменить чередование фаз
- » Угол поворота при симметричном питании

$$\theta = \frac{360^\circ}{N_R} - \frac{360^\circ}{N_S}$$

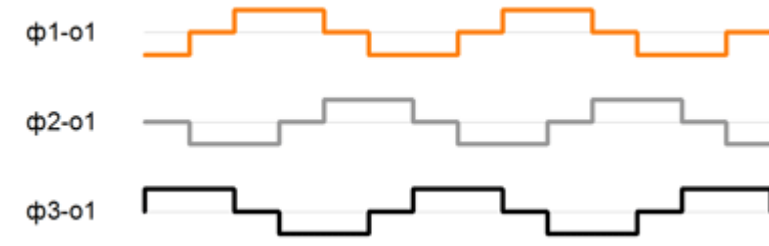
- » для двигателя 6/4 шаг $\theta = 30^\circ$



Униполярное волновое управление



Биполярное полношаговое управление

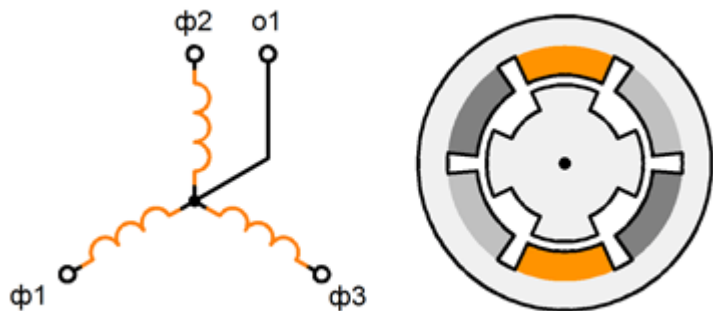


Биполярное полушаговое управление

Реактивный шаговый двигатель

Простая и дешевая конструкция
Фиксация ротора возможна только
при потенциальном управлении

3-фазный двигатель 6/4

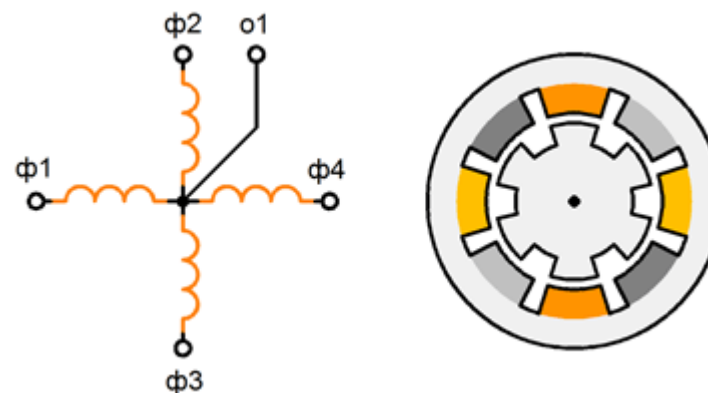


- » Вращение ротора против поворота поля
- » Для реверса – изменить чередование фаз
- » Угол поворота при симметричном питании

$$\theta = \frac{360^\circ}{N_R} - \frac{360^\circ}{N_S}$$

- » для двигателя 6/4 шаг $\theta = 30^\circ$

4-фазный двигатель 8/6

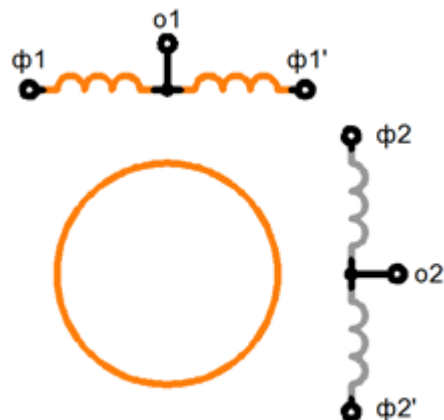


- » для двигателя 8/6 шаг $\theta = 15^\circ$

Шаговый двигатель с постоянными магнитами

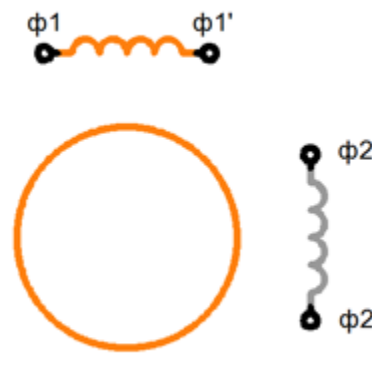
Двигатель с магнитом типа «звездочка» на роторе с шагом $7,5^\circ \dots 90^\circ$
Обычно – 2-фазный двигатель с униполярным или биполярным управлением

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 → ЭДС в фазах → ток в цепи питания (надо защищать цепь)
→ тормозной момент

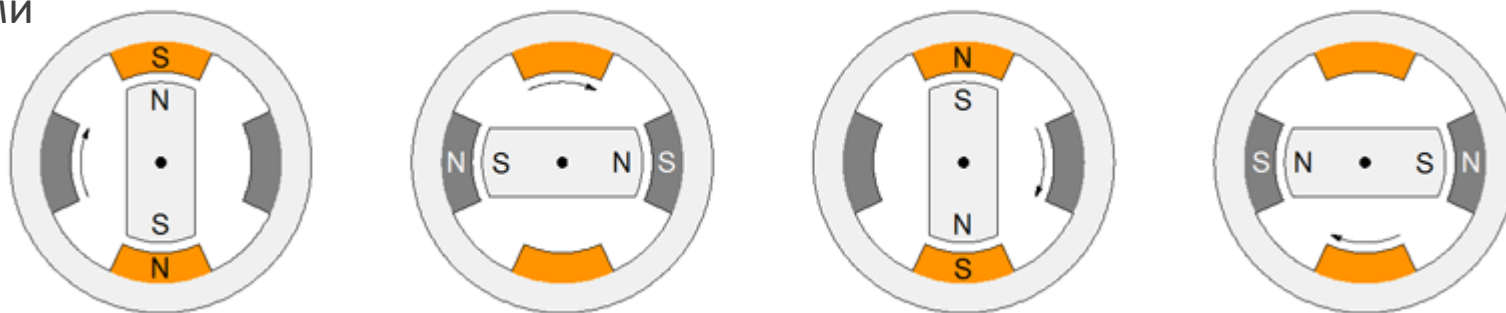
» не используются при больших n

Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

Волновое управление

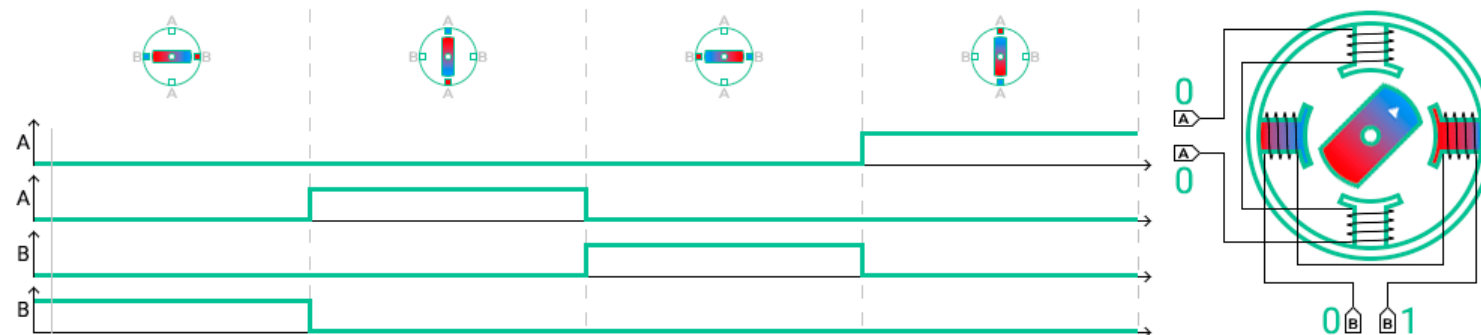
» включена только одна обмотка



Волновое управление биполярным ШД



Не лучшее использование меди – момент меньше максимального на 40%



Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

Полношаговое управление

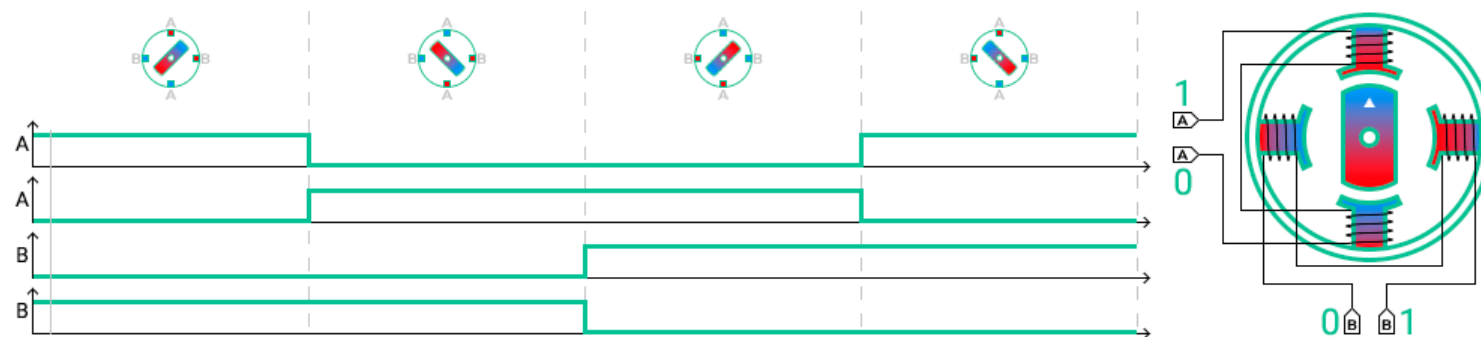
» симметричное питание



Полношаговое управление биполярным ШД



Максимальный момент (обе обмотки включены одновременно)



Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

Полушаговое управление

» несимметричное питание

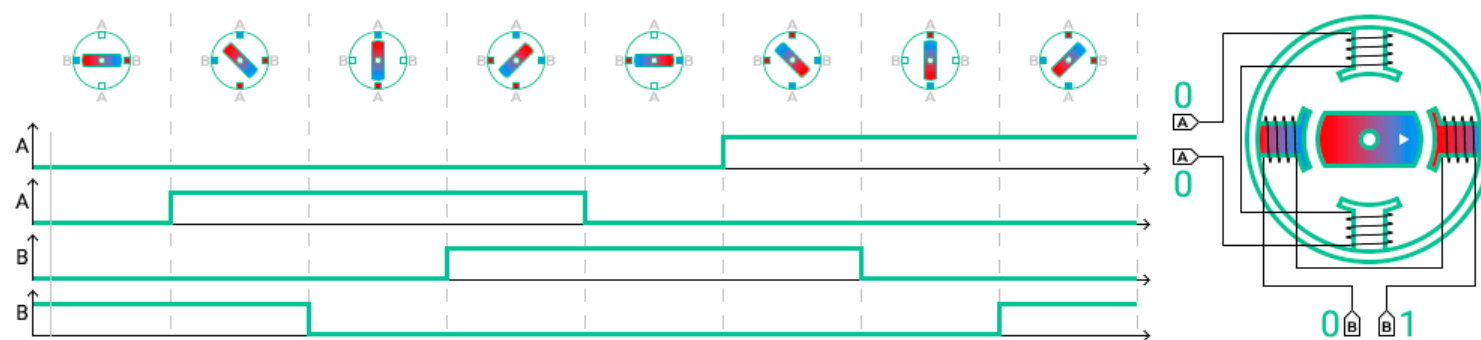


Полушаговое управление биполярным ШД



Комбинация волнового и полношагового управления

Момент меньше, но выше точность позиционирования (меньше шаг)



Способы управления ШД

На примере ШД с постоянными магнитами

Полушаговое управление

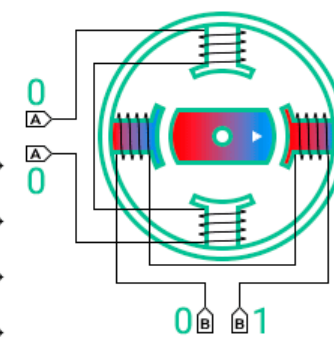
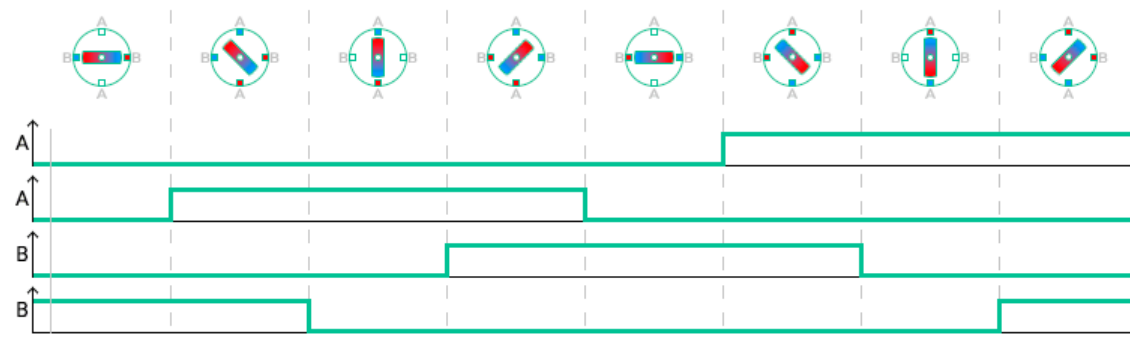
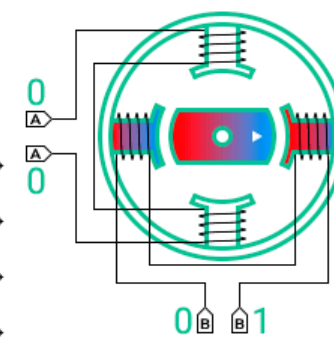
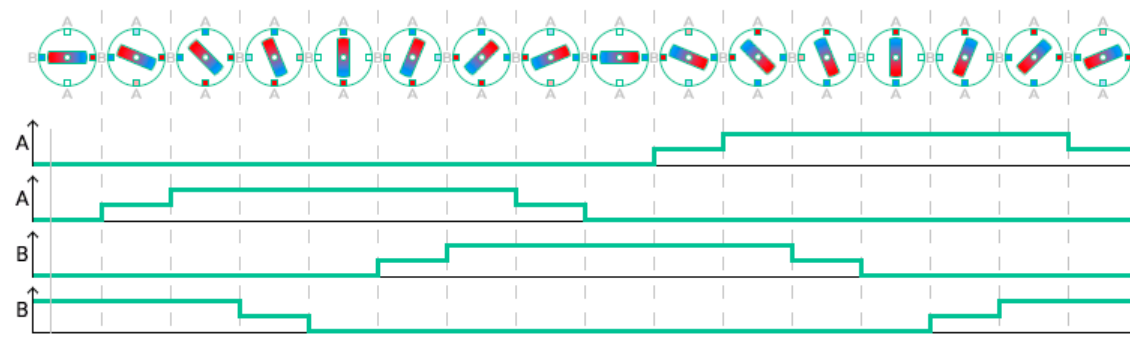
» несимметричное питание



Некоторые блоки управления допускают микрошаговое управление

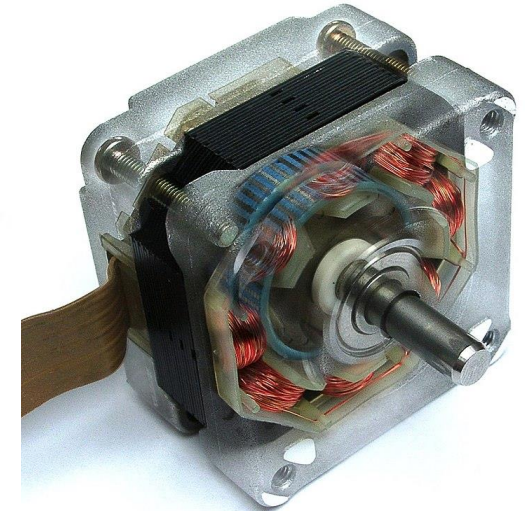
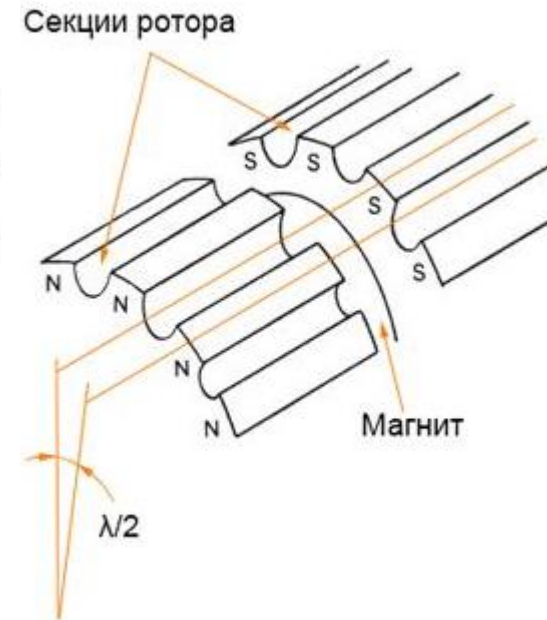
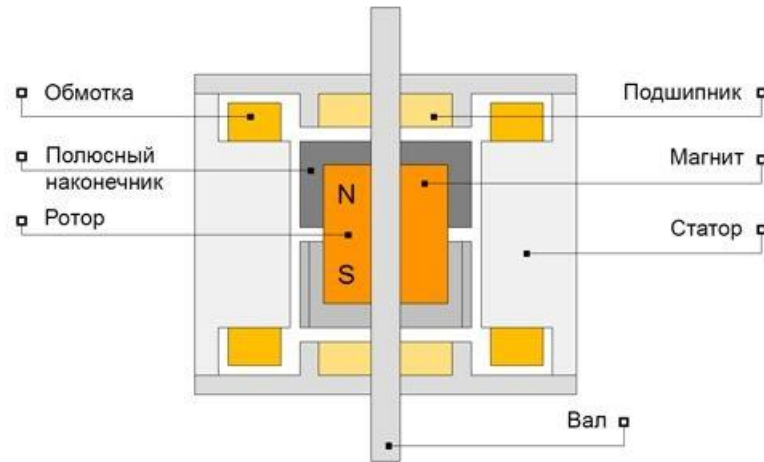
» величина шага еще меньше

» 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 $I = \frac{U}{r} = \text{const}$ Магнитный поток $\Phi = \frac{Iw}{R_{\mu}} = \text{var}$ 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

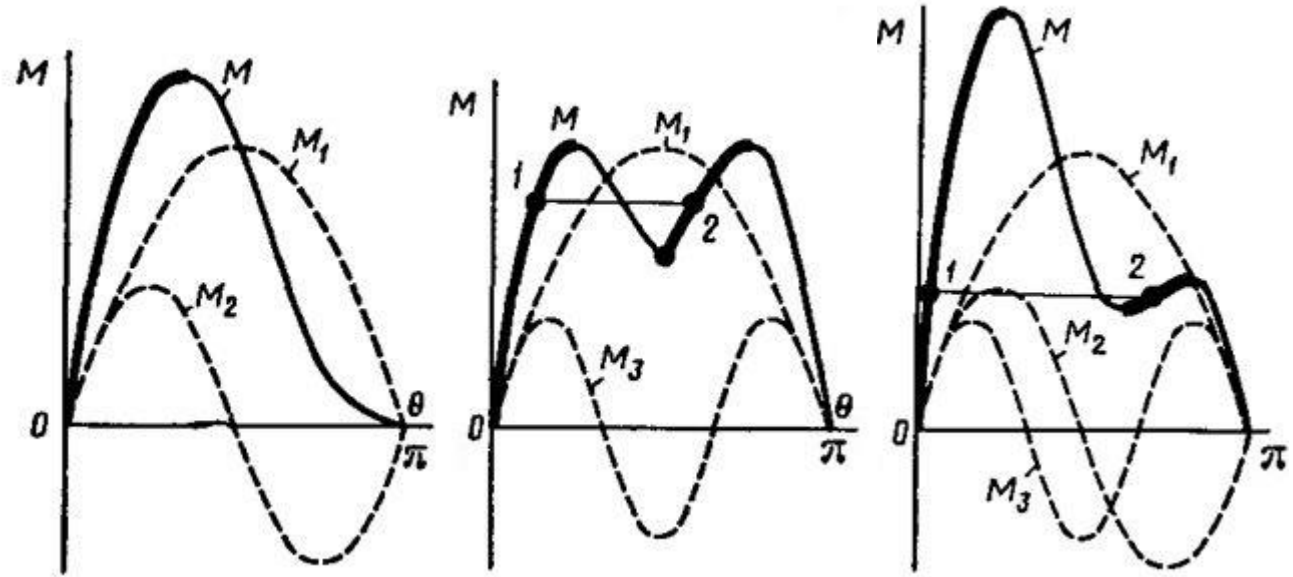
Если ротор не возбужден ($I_R = 0$), остается только составляющая M_S

Синхронизирующий момент

Вид кривой синхронизирующего момента $M_s(\theta)$ определяется конфигурацией зубцовых и полюсных зон статора и ротора

- кривая момента всегда несинусоидальна
- может содержать различные гармоники

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

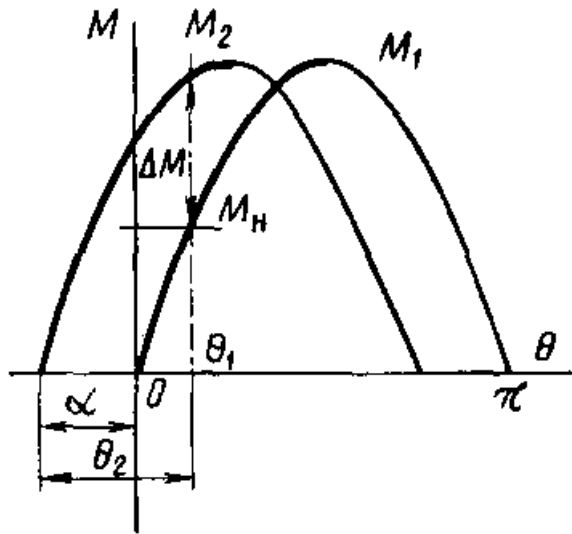


Синхронизирующий момент

Особенность шагового двигателя – скачкообразный поворот МДС в пространстве

Рассмотрим переход ШД в новое положение

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



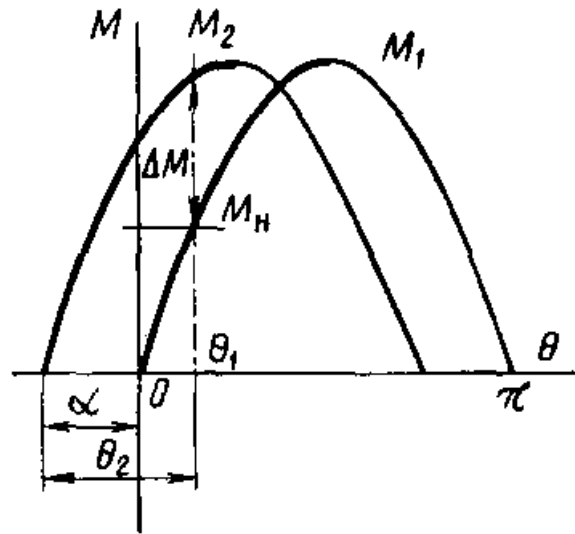
- » в исходном положении кривая момента – M_1
- » при нагрузке M_H угол рассогласования (угол нагрузки) равен θ_1 (положение ротора относительно согласованного положения)
- » на новом шаге МДС смещается на величину шага α
- » в новом положении кривая момента – M_2
- » при той же нагрузке M_H угол рассогласования 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

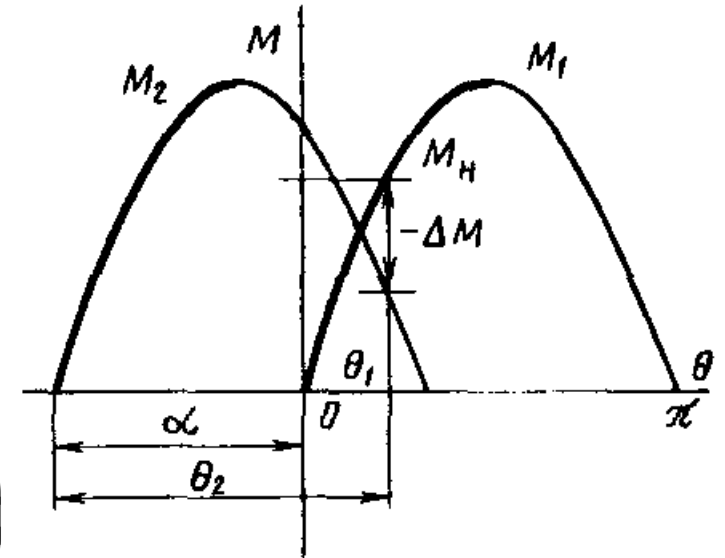


Если шаг α будет слишком большим, ротор попадет в зону неустойчивой работы

- » 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

$$M_H < M_m \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$



Поскольку шаг $\alpha = 2\pi/c_y$

- » чем больше число устойчивых состояний c_y , тем больше может быть нагрузка (M_H)
- » при $c_y = \infty$ 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 определяется моментом инерции J и синхронизирующим моментом M_c

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{pM_c}{J_R}}$$

Электромагнитные переходные процессы не оказывают влияния на работу ШД, если

» постоянные времени обмоток невелики $T_s = \frac{L_s}{r_s} \leq \frac{1}{4\pi f_0} = \frac{T_0}{4\pi}$

» частота поступающих импульсов мала $f_{\text{имп}} \leq \pi f_0$

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

Режимы работы

Статический режим

При частоте поступающих импульсов $f_{\text{имп}} = 0$

→ в обмотках протекает постоянный ток

→ в ШД – постоянное магнитное поле

→ ротор неподвижен в устойчивом положении

» При отсутствии нагрузки ($M_{\text{BH}} = 0$) ротор находится в согласованном положении

» Под действием нагрузочного момента M_{BH} ротор отклоняется на угол рассогласования θ

» Нагрузочный момент M_{BH} не должен превышать максимального синхронизирующего момента $M_{\text{см}}$

Номинальный момент ШД обычно $M_{\text{H}} = (0,4 \dots 0,5)M_{\text{см}}$

Режимы работы

Квазистатический режим

При низкой частоте поступающих импульсов $f_{\text{имп}} \ll f_0$

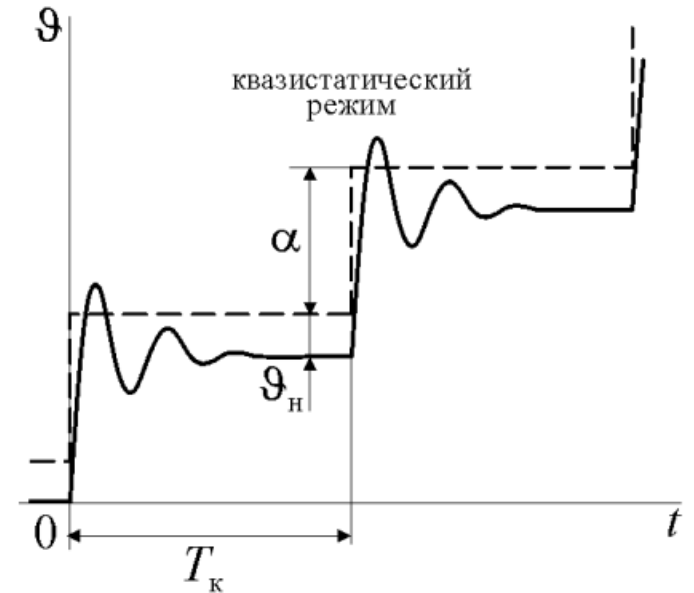
ШД обрабатывает единичные шаги

- 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 θ_H
- » При подаче импульса происходит отработка шага
 - МДС поворачивается на угол шага α
 - угол нагрузки становится равен $\theta_2 = \alpha + \theta_H$
 - увеличившийся синхронизирующий момент M_c поворачивает ротор в новое положение, если конечно $M_{\text{вн}} < M_{\text{см}} \cos(\alpha/2)$

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)



Период коммутации $T_k \gg T_0$

Режимы работы

Резонансный режим

При частоте поступающих импульсов $f_{\text{имп}} = f_0$

→ 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

Установившийся режим

При частоте поступающих импульсов $f_{\text{имп}} > f_0$ → установившийся периодический режим

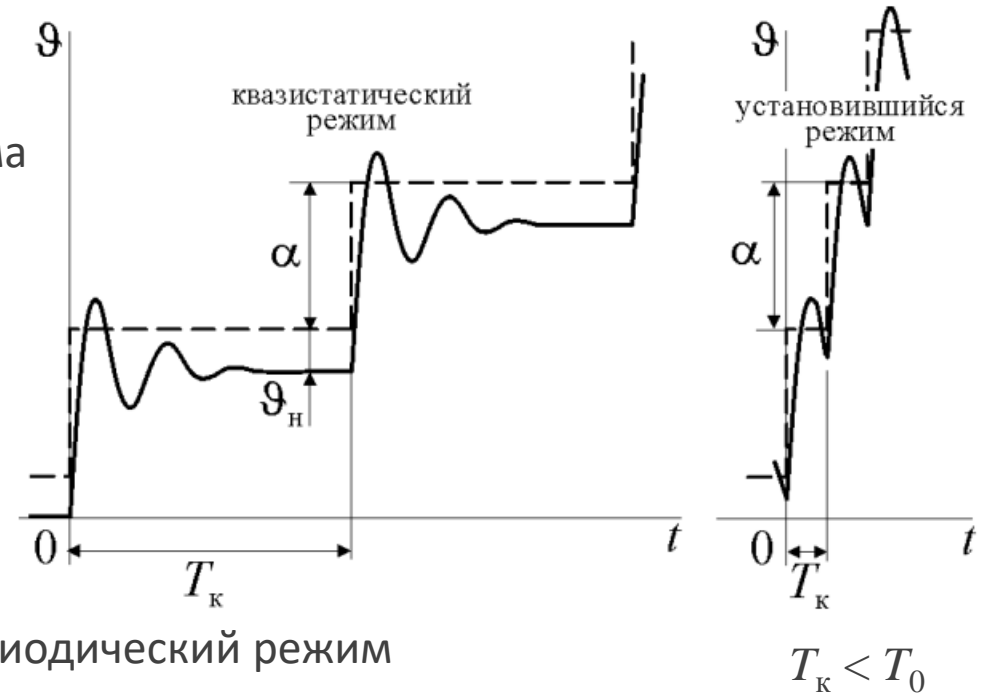
» ротор не успевает остановиться в устойчивом положении

» возможны вынужденные колебания возле точки устойчивого равновесия

» ротор имеет постоянную среднюю частоту вращения n пропорциональную $f_{\text{имп}}$

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 $f_{\text{имп}}$

Требование к ШД в переходных режимах – сохранение синхронизма при изменении $f_{\text{имп}}$ (отсутствие потери шага)

Важная характеристика ШД – частота приемистости $f_{\text{пр}}$ – предельная частота импульсов, при которой ротор из состояния покоя втягивается в синхронизм (начинает вращаться без потери шага)

Соответствующая средняя скорость вращения – скорость приемистости $\Omega_{\text{пр}}$

Рассмотрим процесс вхождения в синхронизм на основе баланса энергии

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

Работа (энергия) синхронизирующего момента A_c

за вычетом работы внешнего момента $A_{\text{вн}}$

должна быть больше необходимого прироста кинетической энергии

$$\Delta W_k = \frac{J\Omega_{\text{пр}}^2}{2}$$

$$A_c - A_{\text{вн}} \geq \Delta W_k$$

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 $M_{BH} = \text{const}$)

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

Уравнение баланса энергии $A_c - A_{BH} \geq \Delta W_k$ в пределе даст

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

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

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

Работа шагового исполнительного двигателя

Упростим уравнение баланса энергии

$$4 \left(\cos \theta_1 - k_{\text{BH}} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) \right) = \frac{p^2 \Omega_{\text{пр}}^2}{\omega_0^2}$$

Обычно $k_{\text{BH}} < 0,5$, поэтому примем

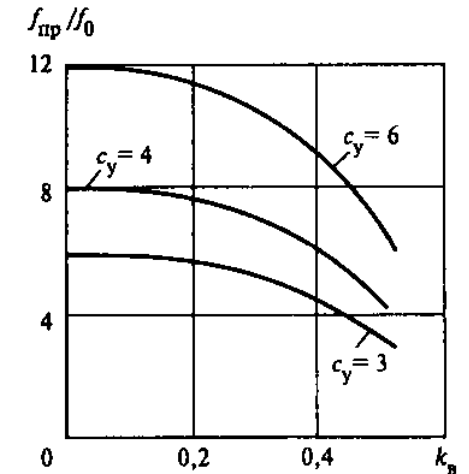
$$\cos \theta_1 = \sqrt{1 - k_{\text{BH}}^2} \approx 1 - 0,5 k_{\text{BH}}^2 \quad \theta_1 = \arcsin k_{\text{BH}} \approx k_{\text{BH}}$$

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

- » Скорость приемистости (максимальная начальная скорость) зависит от нагрузки (k_{BH})
 - » Частота приемистости кроме того зависит от числа устойчивых состояний ШД c_y
- В современных ШД $f_{\text{пр}} = 100 \dots 1000$ Гц

Другие ограничения ШД

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



Зависимость $f_{\text{пр}}$ от нагрузки (k_{BH})

Влияние индуктивности обмоток

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

Влияние индуктивности – аналогично L в вентильных двигателях

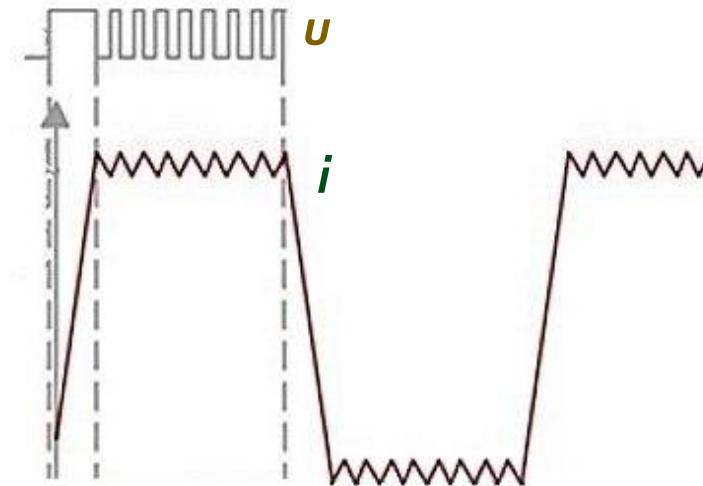
» замедленное нарастание тока → снижение момента (при больших n)

Для противодействия используют повышенное напряжение с одновременным ограничением тока

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

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

- но приходится ограничивать ток на безопасном уровне (chopper)



Применение шаговых двигателей

- » При частотах вращения $n = 2000 \dots 3000$ об/мин применяют ШД с возбуждением от ПМ
 - номинальный момент $M_H = 0,01 \dots 1$ Нм
 - угловой шаг $\alpha_M = 15^\circ \dots 90^\circ$
- » При частотах вращения до $n = 1000$ об/мин применяют гибридные индукторные и реактивные ШД
 - номинальный момент $M_H = 0,1 \dots 2,5$ Нм
 - угловой шаг $\alpha_M = 1,5^\circ \dots 3^\circ$



Преимущества шагового двигателя

- » точное позиционирование без обратной связи
- » фиксация ротора в требуемом положении
- » отсутствие щеток (бесконтактность → 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

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

