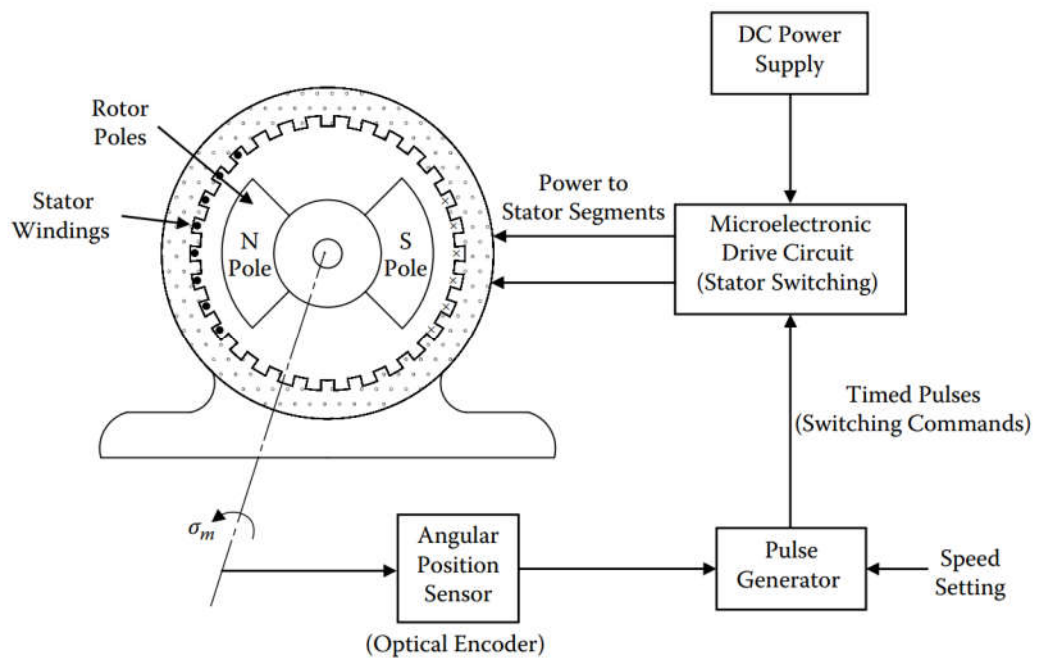


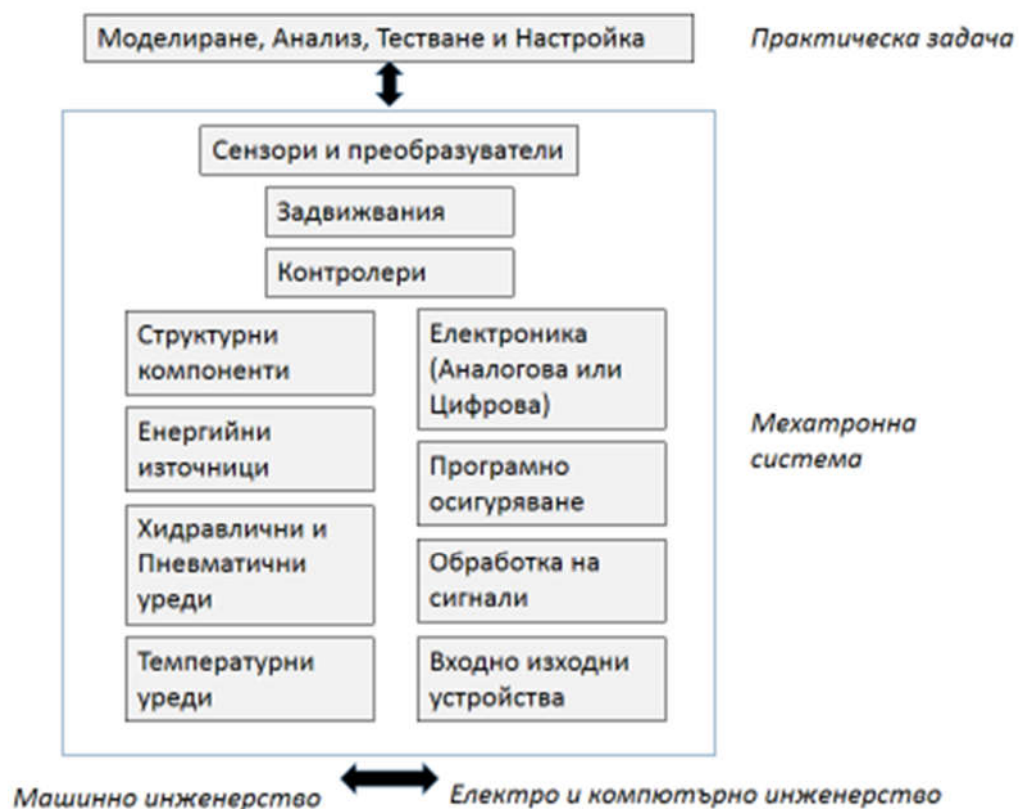
Процесна информация и
обработка

Лекции

№11 и №12



Фиг. 1.2. Типичен пример на сервозавдвижване[1]



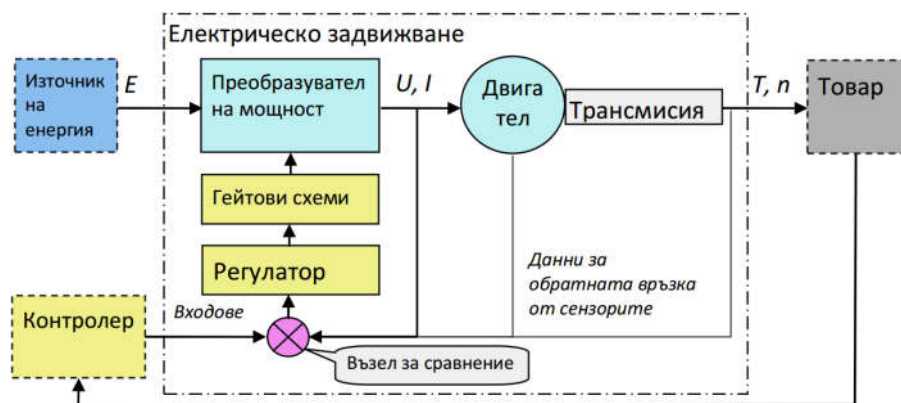
Фиг. 1.3. Технологични проблеми - типичен пример

Основните технологични проблеми при съвременните индустриални механични системи са показани на фиг. 1.3[1]. Те включват както традиционните механични проблеми, така и електрически, електронни, сензорни, контролни, компютърни и други инженерни проблеми. Конструирването на съвременни машини и апарати изисква съвместната разработка и тестване на всички отделни компоненти.

Глава 2. Видове задвижвания в индустрията

Електрическо задвижване

Електрическото задвижване е устройство, състоящо се от електронна система, електрически двигател и механична трансмисия, което е проектирано да задвижва механичен товар с електрическа енергия. Съществуват различни схеми на електрически задвижвания. На фиг. 21.1 е показана обобщена блокова схема на електрическо задвижване.



Фиг. 2.1. Блокова схема на електрическо задвижване

Горната част на схемата показва задвижващата система, а долната – управляващата система. Под действието на входна команда постояннотоковото (DC) и променливотоковото (AC) задвижвания управляват ефективно скоростта n , въртящия момент T и позицията на механичния товар. На базата на сравняване на входната команда за скорост, въртящ момент или позиция с действителните стойности на тези величини, измерени от сензори, контролерът подава сигнали към регулатора през възела за сравнение, а оттам към гейтова (шлюзова) схема, която управлява преобразувателя на мощност. Той се захранва от източник с еднофазно или трифазно синусоидално напрежение с фиксирана честота и амплитуда. Преобразувателят на мощност преобразува електрическата енергия в изходна мощност в подходяща форма (брой фази, честота, напрежение U , ток I) със стойности, които са оптимални за работата на двигателя.

В много приложения от общ характер електрическите задвижвания работят на принципа на отворената система без обратна връзка. Тази голяма група от прости задвижващи системи, захранвани с енергия от електрическата мрежа, се използва при много индустриални и домашни електрически машини. Различни преобразуватели на мощност могат да бъдат открити в задвижващи системи с акумулаторно захранване като вилкови повдигачи (кар високоповдигач), стартерни генератори и автомобилни спомагателни задвижвания. Преобразувателите могат да захранват постояннотокови двигатели, индукционни и синхронни двигатели.

Електрически двигатели - типове и управление

Електрическите двигатели са електромеханични изпълнителни устройства, които преобразуват електрическата енергия в механична енергия, която задвижва работните машини. Електродвигателите са най-разпространените електромеханични **ИУ** в днешно време.

Електрическите двигатели се състоят от статор и ротор. В статора се създава въртящо се магнитно поле, което е необходимо, за да задвижи ротора. Роторът се върти върху вал, свързан с корпуса чрез лагери. Работната машина, която трябва да се задвижи, се свързва към вала. Съществуващата между статора и ротора въздушна междина е нужна за предаването на енергия от статора към ротора. Принципът на работа на един електродвигател е показан на фиг.2.2[3].

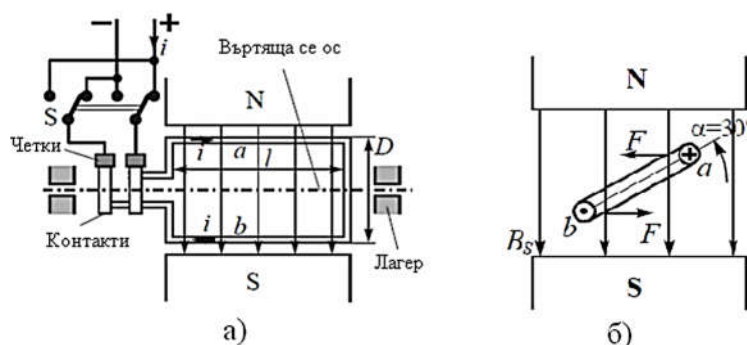
За да се задвижи двигателят, към ротора трябва да бъде приложен въртящ момент. За създаването на въртящ момент са необходими магнитно поле и проводник, по който тече ток. Ако в магнитното поле се разположи електрически затворена рамка, която се захранва от източник на ток, силата F ще действа на рамката (фиг.2.3)[3]. Въртящият момент се получава от произведението на силата F и ъгъла на рамката D по формулата:

$$M = F D \sin(\alpha) \quad [1]$$

В зависимост от типа на захранващото напрежение електрическите двигатели могат да бъдат постояннотокови, променливотокови и електродвигатели с импулсно управление.

Постояннотокови електродвигатели

Постояннотоковите електродвигатели също се състоят от статор и ротор. На статора са разположени магнитните полюси, които се използват за създаване на магнитно поле. Магнитното поле може да бъде индуцирано или от постоянни магнити, или от електромагнит. Електромагнитът се състои от намотка, навита върху желязна сърцевина. При възбуждане на намотката с ток се появява магнитно поле. Роторът се състои от много навивки, които се възбуждат с постоянен ток. Постоянният ток достига до ротора през четките (наречени също комутатори). За да може да се поддържа константно въртене на ротора, токът в ротора трябва да се реверсира (да се сменя посоката) след всеки полупериод.



Фиг. 2.2. Схема на постояннотоков двигател^[3]

Според типа на възбуждащите намотки постояннотоковите електродвигатели (**ПТД**) могат да се класифицират като:

1. **ПТД** с отделно (независимо) възбуждане, при които възбуждащата намотка се захранва от отделен източник на ток;
2. **ПТД** със серийно(последователно) възбуждане, при които възбуждащата намотка е свързана последователно към главното захранване(последователно към веригата на ротора);
3. **ПТД** с паралелно възбуждане, при които възбуждащата намотка е свързана паралелно към веригата на ротора. Също така често се използват постоянни магнити за създаване на константно хомогенно магнитно поле. При устойчив работен режим на постояннотоковия двигател:

$$U = E + I_a R_a, \quad [2]$$

където U е захранващото напрежение, E е електродвижещата сила, индуцирана в ротора, $I_a R_a$ е падът на напрежението в навивките на ротора.

Съществува пропорционална зависимост между скоростта n , магнитния поток Φ и напрежението U :

$$n \propto \frac{E}{\Phi} \propto \frac{U - I_a R_a}{\Phi} \quad M \propto I_a \Phi \quad [3]$$

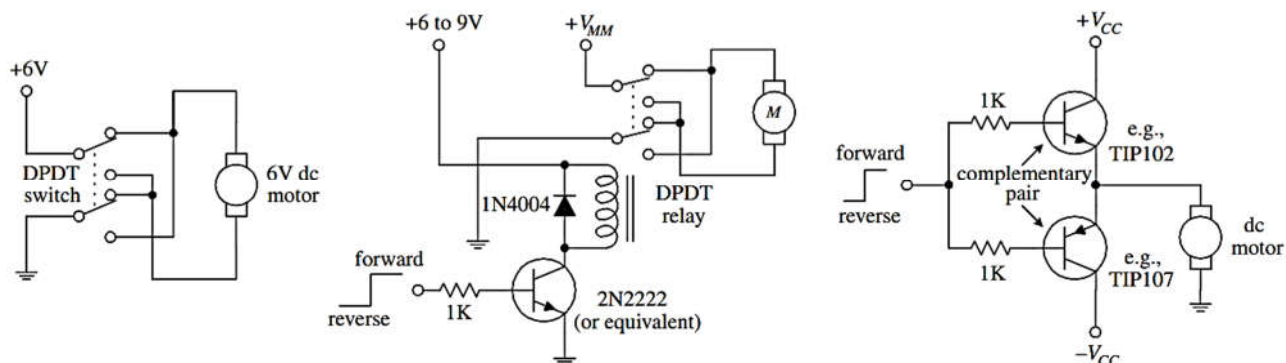
Скоростта на въртене на един **ПТД** може да бъде променяна чрез увеличаване на напрежението или намаляване на магнитния поток (чрез намаляване на захранващото напрежение на възбудителната намотка). Въртящият момент може да бъде увеличен чрез увеличаване на тока или на магнитния поток. Тоест управлението на магнитния поток влияе и на скоростта (обратнопропорционално), и на въртящия момент (правопропорционално). **ПТД** се пускат с допълнително съпротивление, за да се ограничи стартовия ток. С увеличаване на скоростта на въртене стойността на това съпротивление се намалява.

По-рано постояннотоковите двигатели често са се използвали в задвижвания с променлива скорост. Въпреки добрата им ефективност (обикновено КПД-то е над 90%) **ПТД** се използват рядко в днешно време. Съвременните технологии от силовата електроника и микроконтролерите позволяват променливотоковите двигатели да се управляват много по-ефективно. Променливотоковите

двигатели изискват по-малка поддръжка и са по-евтини. В допълнение към това не е позволена употребата на постояннотокови двигатели в помещения с висок риск от експлозии, тъй като при използване на механичен комутатор(четки) неминуемо възникват искри.

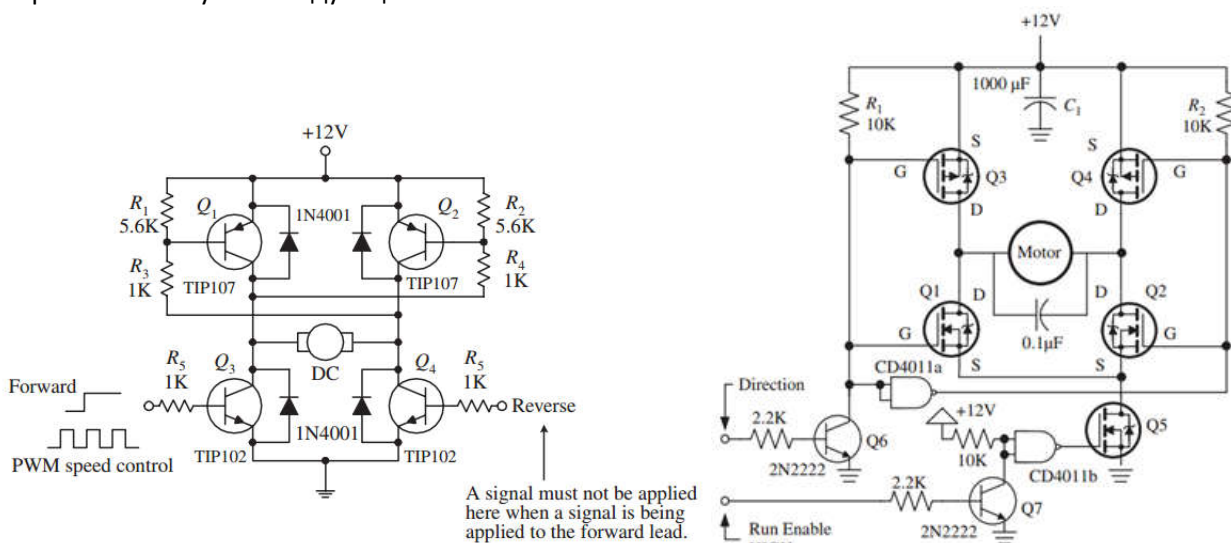
Управление на постояннотоков двигател с промяна на посоката на въртене

За да се контролира посоката на движение на двигателя, поляритета на прилаганото към изводите му напрежение трябва да бъде обърнат. Един прост подход е да се използва ключ **DPDT** (виж най-лявата схема на фиг. 2.3). Алтернативно, може да се използва реле, задействано от транзистор (виж средна верига). При желание може да се използва подобрена схема (виж най-лявата верига).



Фиг. 2.3. Типичен пример за реверсиране на двигател

Друг, особено популярен метод за промяната на посоката на въртене на постояннотоковият двигател (също и за регулиране на скоростта му на въртене) е така наречения **H-bridge**. На фиг.2.4 е показана проста версия на споменатата конструкция. Тя е конструирана от биполарни транзистори. Подобна конструкция, но с използването на **MOSFET** транзистори е показана на фиг.2.4[4]. Посоката се регулира с подаване на сигнал на входа **Reverse** или **Direction**, а скоростта на въртене се регулира с широчинно-импулсна модулация.



Фиг. 2.4. Типичен пример за H-bridge и използването на **MOSFET**[4]

Самият чип на **National Semiconductor LMD18200** осигурява ток от порядъка на 3A и напрежение от 12 до 55 V. Чипът е **TTL** и **CMOS** съвместим със защита от късо съединение и прегряване. Съществуват още много подобни реализации на други конкурентни фирми.

Променливотокови електродвигатели

Променливотоковите електродвигатели използват променлив ток за захранването си. От своя страна те се разделят на едно- и трифазни електродвигатели. Еднофазните двигатели се използват често при различни работни инструменти и устройства и домашни електроуреди. Трифазните двигатели се използват по-често в мощни индустриални приложения. За пускането на еднофазен променливотоков електродвигател е необходима допълнителна пускова верига. В тази книга се

разглеждат само трифазните променливотокови електродвигатели. Съществуват две основни групи променливотокови двигатели: асинхронни и синхронни.

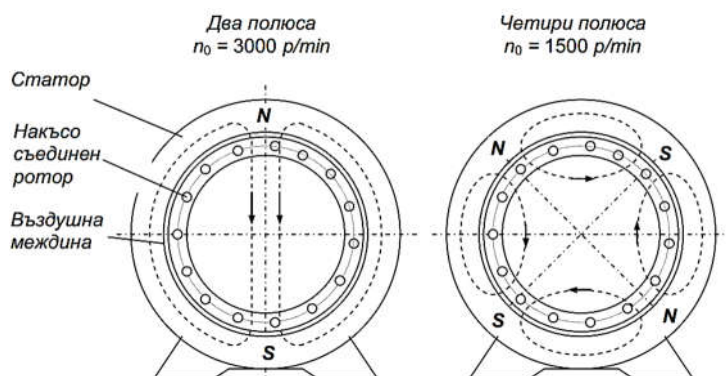
Асинхронни електродвигатели

Асинхронните двигатели са най-широко разпространените двигатели за индустриални приложения в днешно време заради ниската цена и опростената конструкция. Устройството и принципът на работа на асинхронните двигатели са разгледани по-долу.

Асинхронните двигатели са най-често използваните типове електрически двигатели в индустрията. Те се състоят от статор и ротор. Статорът е неподвижната част, а роторът – въртящата се част от електрическия двигател. Статорът и роторът са разделени от въздушна междина. Широчината на въздушната междина е в рамките на 0.1...1 mm. На фиг. 2.5 е показана конструкцията на асинхронен електродвигател.

Статорът на асинхронния електродвигател се състои от три медни намотки, които са геометрично разделени една от друга и се захранват от трифазната мрежа. Намотките са съединени в звезда или в триъгълник. Тази конфигурация създава въртящо се магнитно поле около статора, което прониква през въздушната междина в ротора и предизвиква протичането на ток в него. От своя страна този ток създава магнитно поле в ротора. Взаимодействието между магнитните полета на статора и на ротора създава сила, която ускорява ротора. Скоростта на въртене на двигателя зависи от скоростта на въртене на магнитното поле, която от своя страна зависи от броя на двойките полюси и честотата на захранването. На фиг.2.5 са показани два асинхронни двигателя с една и с две двойки полюси.

В днешно време се използват два типа ротори в асинхронните двигатели – навит ротор и накъсо съединен ротор. При навития ротор скоростта на въртене се управлява чрез промяна на съпротивлението на ротора, което на свой ред променя тока. За целта се използват специални четки, които предават електрически ток от ротора към съпротивления, разположени в статора. Те обаче се износват много бързо и изискват редовна поддръжка. При накъсо съединения ротор намотките са свързани накъсо и целият енергиен поток от статора към ротора се осъществява през въздушната междина.



Фиг. 2.5. Два асинхронни двигателя с една и с две двойки полюси

Скоростта на статорното магнитно поле се нарича синхронна скорост и може да бъде изчислена по формулата:

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad \omega = 2 \pi f, \quad [4]$$

където n_s е синхронната скорост на двигателя (rev/min), f е честотата на захранването, а p е броят на полюсните двойки. Колкото по-голям е броят на двойките полюси, толкова по-малка е синхронната скорост, но за сметка на това двигателят достига по-висок въртящ момент. Различните синхронни скорости съответстват на различен брой двойки полюси.

Скоростта на магнитното поле може също да се представи като ъглова скорост ω , която показва скоростта на въртене в радиани в секунда.

Действителната скорост на въртене на асинхронния двигател е по-ниска от скоростта на въртящото се магнитно поле на статора. Зависимостта между тези две скорости се представя с хлъзгането S , което показва разликата между действителната скорост на двигателя n и синхронната скорост n_s :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad M = \frac{P_{mech} - n}{\omega_s} = \frac{P_{mech}}{2\pi f}, \quad [5]$$

където ω_s е синхронната ъглова скорост, а P_{mech} е механичната мощност на вала, това е мощността, записана на табелката с характеристиките на двигателя. С увеличаване на товара хлъзгането също нараства, а скоростта пада. Нормални стойности на хлъзгането са между 1% и 5% от синхронната скорост. С развиването на въртящия момент, двигателят започва да се ускорява с ъглово ускорение ε . Съотношението между полезната изходна мощност на една машина или устройство за преобразуване на енергия и входната мощност се нарича ефективност или коефициент на полезно действие (КПД) η ъгловото ускорение и коефициент на полезно действие (КПД) η може да се получат от изразите:

$$\varepsilon = \frac{n}{t}; \quad \eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad [6]$$

При работата на всяка машина възникват загуби. Това означава, че част от цялата консумирана електрическа енергия ще се трансформира в топлина, ще бъде загубена в процесите на магнетизиране, в процесите на триене между вала на двигателя и лагерите и т.н.

където P_{mech} е механичната мощност на вала на двигателя (изходната мощност), а P_{el} е консумираната електрическа енергия от мрежата. Колкото по-висока е ефективността, толкова повече електроенергия се преобразува в полезна изходна мощност.

Съществуват два начина за свързване на асинхронните двигатели (също и на синхронните), наречени свързване в схема звезда и свързване в схема триъгълник.



Фиг. 2.6. Свързване на асинхронен двигател в звезда и в триъгълник Свързване на изводите

Свързване в схема „звезда“

Когато намотките на двигателя са свързани по такъв начин, че едните им краища са съединени заедно в една точка (наречена нулева точка), а другите им краища са свързани към отделна фаза всеки, свързването е в схема звезда. Свързването в звезда се означава със символа Y . На фиг.2.6 е показано свързване в схема звезда.

Свързване в схема „триъгълник“

Когато намотките на двигателя са свързани по такъв начин, че началото на всяка намотка е свързано към края на друга намотка и всяка от тези свързващи точки е свързана към отделна фаза, свързването е в схема триъгълник. Свързването в триъгълник се означава със символа Δ . На фиг.2.6 е показано свързване в триъгълник.

Двигател, свързан в схема триъгълник, консумира три пъти повече мощност от захранващата мрежа, отколкото двигател, свързан в схема звезда. Двигателите могат да бъдат свързвани в схема триъгълник само когато намотките са подходящи за включване към захранващото напрежение.

Пускане на асинхронните двигатели

Пускането на асинхронни двигатели с висока мощност е много проблематично. При някои случаи пусковият ток може да бъде до седем пъти по-голям от номиналния ток на двигателя, което

причинява големи пикове на тока (токови удари) в електрическите линии. Пусковият ток не зависи от товара на двигателя, а има определена стойност, дадена в таблицата с характеристиките на двигателя като I_{start}/I_n . Поради влиянието на товара и на големия инерционен момент пускането на един асинхронен двигател може да продължи доста дълго време и да причини голям пад на напрежението в цялата електрическа система.

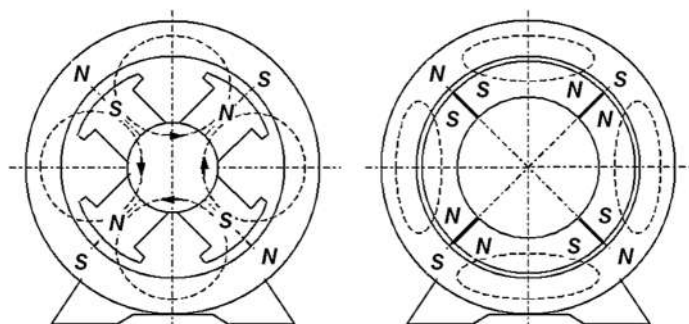
Пускането с честотен преобразувател е най-добрият начин за пускане на асинхронен електродвигател и за управление на скоростта му. В днешно време електрически задвижвания с честотни преобразуватели се използват в много индустриални приложения.

Синхронни двигатели.

Принципът на работа на синхронните двигатели е подобен на този на асинхронните. Трифазното захранване създава въртящо се магнитно поле около статора. В ротора се създава друго магнитно поле с електромагнит или с постоянен магнит. Така в двигателя съществуват две различни магнитни полета. Въртящото се магнитно поле на статора „хваща“ магнитното поле на ротора и роторът започва да се върти със скоростта на магнитното поле на статора. Токът на възбудителната намотка достига до ротора чрез четки, когато се използва електромагнит. На фиг.2.7 са показани различни конструкции на синхронни електродвигатели.

Синхронният електродвигател развива въртящия момент само в синхронен режим (когато е достигната номинална скорост). Пусковият му момент е равен на нула. Това означава, че е много проблематично стартирането на синхронен двигател директно от захранващата мрежа. Обикновено синхронните двигатели се пускат със специална пускова намотка (т.нар. асинхронно пускане), която се включва към мрежата.

Управлението на ъгловата скорост на синхронният двигател може да се реализира чрез управление на честотата.



Фиг. 2.7. Различни конструкции на синхронни двигатели

Тези двигатели се използват в индустриалните **CNC** (Computer Numerical Control, компютърно цифрово управление) машини и при индустриалните роботи.

Пускане и спиране на електрическо задвижване

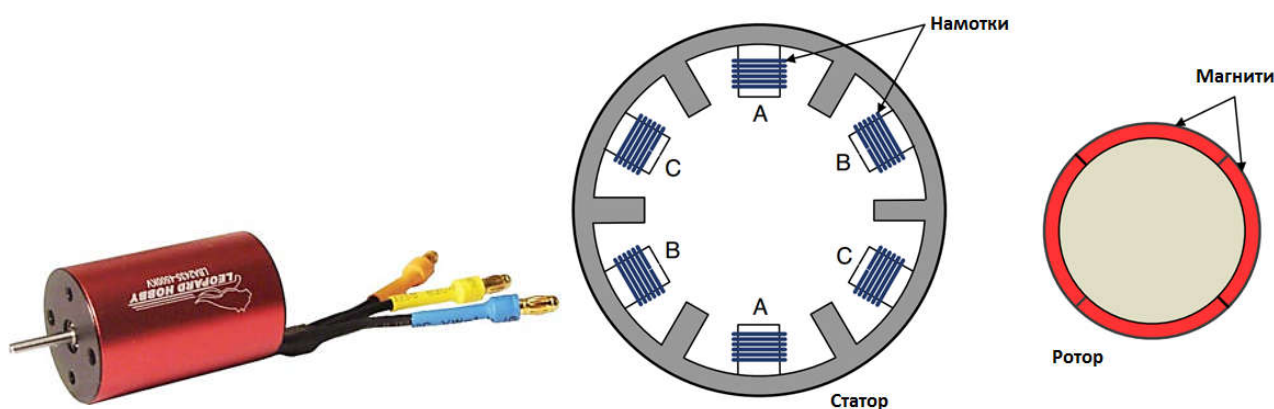
Честотните преобразуватели включват управляваща система. Стартирането и спирането на двигателя се извършват постепенно, с линейно нарастване/намаляване на честотата (в англоезичната литература за това се използва терминът „рампа“). Могат да се използват и изразите „пусков фронт“ и „спирателен фронт“. Продължителността на двата фронта може да се регулира от милисекунди до десетки минути. С нарастването на честотата напрежението също нараства. Двигателят се спира или се намаляват оборотите му по метода на свободния ход или с постепенно намаляване на честотата до определено ниво. При достигане до това ниво се прилага методът на динамично спиране.

Точната форма на двата фронта трябва да бъде избрана според техническите данни на двигателя. Например много стръмна пускова характеристика не може да бъде заложена при двигатели с висок инерционен момент, тъй като това ще причини голяма консумация на мощност, която на свой ред ще активира защитата от претоварване, което ще доведе до спиране на двигателя. При спиране на двигателя по метода на свободния ход двигателят първо трябва да спре преди ново прилагане на пусков фронт, тъй като това също ще доведе до активиране на защитата от претоварване.

Безщеткови мотори

Двадесети век доведе до революция в областта на електрониката, тъй както изследователите използват постиженията на физиката на твърдото тяло за намаляване на размерите на транзистори и други елементи в електронните конструкции. С тези нови интегрални схеми инженерите са в състояние да проектират много по-сложни системи. Променена е съществено и конструкцията и дизайнът на електрическите двигатели. През 1962 г. T.G. Wilson и P.H. Trickey са изобретили нов тип двигател, който използва електрическа комутация вместо механична комутация. Този нов двигател не се захранва с постоянен - DC ток, а вместо това получава точно определени по време и големина от постоянен ток. Wilson и Trickey наричат новия си мотор **безщетков DC мотор**, или **BLDC**. Целта на този раздел е да представи BLDCs в подробности. Ще бъде обяснена как работят те като са разгледани два различни вида BLDCs: **inrunners** и **outrunners**. Първо, накратко научните принципи, които правят възможно съществуването на **BLDC**.

BLDC са по-сложни и по-скъпи от двигателите с колектор, но заради липсата на механичен контакт между ротора и статора те са по-надеждни и ефективни. Фиг. 2.8 представя напречно сечение на статор и ротор на BLDC



Фиг. 2.8. Двигател тип **inrunner BLDC**

Както е показано на фигурата, структурата на **BLDC** е напълно различна от тази на колекторния двигател с четки. Има множество тоководещи проводници, и те са в статора вместо в ротора. Тези проводници са навити около железни сърцевини и образуват електромагнити. Цялостното функциониране на BLDC не е трудно да се разбере. Контролерът осигурява положителен и отрицателен импулс на ток в различни намотки в определена последователност. Роторът се върти, за да могат магнитите да следват промяната на магнитното поле, породено от тока. Ще бъдат разгледани по подробно три структурни аспекта на BLDC: намотки, магнити, и слот / полюс конфигурация.

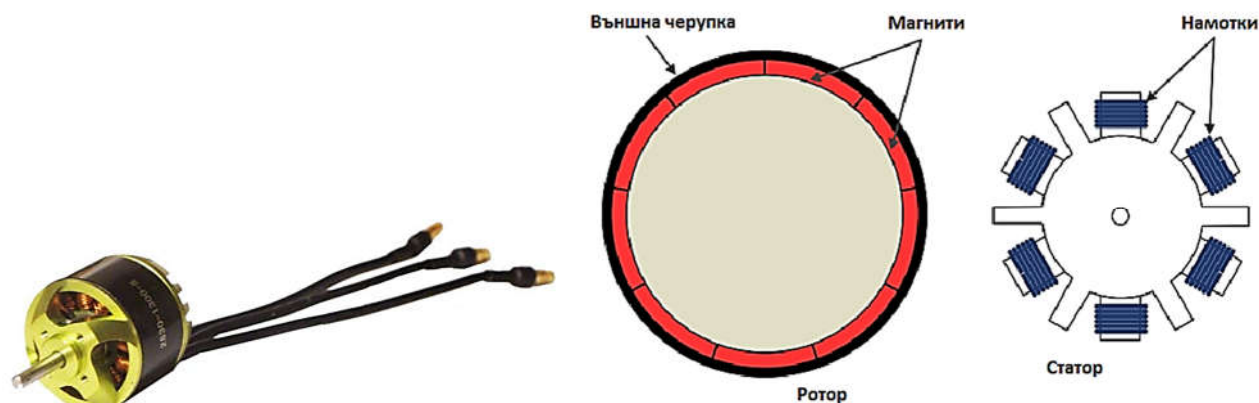
Inrunners

Тъй като ротора се върти във вътрешността на статора, **inrunner BLDC** изглежда като обикновен четков двигател. Основната разлика е, че **BLDC** имат три входа вместо два. Това е показано на фиг.2.8, която изобразява **inrunner BLDC LBA2435**

Много **inrunner** двигатели нямат метални сърцевини. Това намалява загубата в тях и повишава ефективността, но същевременно значително намалява големината на въртящия момент на двигателя. В допълнение **inrunner** моторите обикновено имат по-нисък брой на полюсите (често само два). Поради тези причини **inrunner** мотори обикновено не се използват, за задвижване на въртящи се части без междинна предавка. За да се компенсира ниската стойност на въртящия момент, повечето **inrunner** двигатели се движат с много висока ъглова скорост. Това може да се види, като се разгледат техните K_v коефициенти, които са от порядъка на 7,500 до 10,000 **RPM/V**.

Двигатели тип Outrunners

На **outrunner** двигател роторът е разположен от външната страна на статора. С други думи, постоянните магнити се въртят около намотките. фиг.2.9 е представена структурата на **outrunner BLDC**.



Фиг. 2.9. Двигател тип **outrunner BLDC**

Тъй като магнитите са на външната черупка, **outrunners** двигателите обикновено имат повече магнити от **inrunner** двигателите. Двигателят, показан на фиг.2.9 има девет полюса, но не е необичайно да се срещнат **outrunners** двигатели с до 16. Те не се върти толкова бързо, колкото **inrunners**, и техните K_v коефициенти са около 1000-2000 RPM/V. Те произвеждат със значително по-голям въртящ момент. Ето защо **outrunners** обикновено са използвани в конструкции на CD / DVD плеъри. Тяхният голям въртящ момент ги прави популярни в ред други конструкции.

Друга разлика между **inrunners** и **outrunners** двигателите е валът на двигателя. За **inrunner** двигател валът е свързан към вътрешния ротор. За **outrunners** - валът е свързан към черупката.

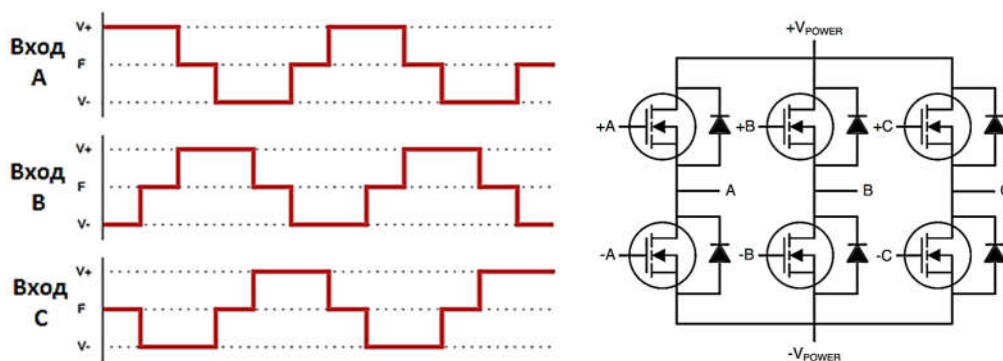
Управление на BLDC двигатели

Brushless двигателите за постоянен ток (**BLDC**) се захранват с времеви импулси на електрическа енергия. Броят на входа се определя от броя на фазите на мотора. Като цяло може да се предположи, че **BLDC** има три входа. За правилно контролиране на **BLDC** импулсите трябва да бъдат разчетени във времето, така че протичането на ток да става, когато роторът е в правилната позиция. За да се определи позицията на ротора, повечето **BLDC** вериги използват един от следните два метода:

1. Измерват обратно **EMF**, произведена от въртенето на мотора.
2. Четат позицията на ротора с помощта на сензори, вградени в мотора.

Контролни сигнали и инвертори

Трифазните **BLDC** имат три входа, които захранват с ток намотките. По всяко време на един от входовете ще бъде зададено високо напрежение (V^+), на друг ще бъде зададено ниско напрежение (V^-) и третият ще бъде оставен без захранване. Ако означим тези входове с **A**, **B** и **C** - фиг.2.10 дава представа как техните сигнали се променят с течение на времето.



Фиг. 2.10. Управляващи сигнали при трифазните **BLDC**. Начин на превключване

За трифазен **BLDC** има само шест уникални фазови състояния, преди те да се повторят. Когато контролерът захранва намотките, чрез тези състояния, ротора прави пълно завъртане (360°). Ето защо, всяко фазово състояние съответства на една шеста от пълното завъртане, или 60° .

Тази схема (фиг.2.10) има шест входа (**+A**, **-A**, **+B**, **-B**, **+C**, и **-C**), които са свързани към контролера. Всеки вход е свързан към гейта на MOSFET. Всяка двойка входове определя изходен сигнал (**A**, **B** или **C**), който захранва намотките на **BLDC**.

Контрол чрез сензори

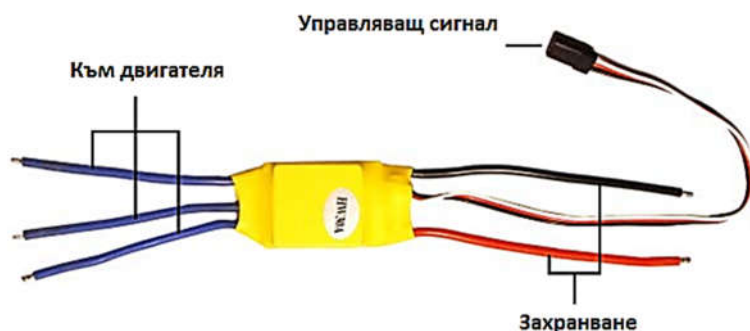
Без значение колко бързо се върти **BLDC** роторът, магнитното поле трябва винаги да се държи пред него. Контролерът трябва да знае ориентация на ротора, преди да захрани намотките. Някои двигатели имат вградени сензори, които идентифицират ориентация и/или скоростта на ротора. Ако това е така, веригата за управление може да се използва за сензорен контрол. Ако двигателят не разполага със сензори, веригата за управление трябва да разчита на безсензорен контрол. Сензорите при **BLDC** двигателя може да използват оптично кодиране, магнитно кодиране, или променливо магнитно съпротивление, но най-често срещан **BLDC** сензор е сензор с ефект **Hall**. Датчикът на Хол представлява преобразувател, който изменя изходното си напрежение в резултат на промяна на магнитното поле. Напрежението се нарича напрежение на Хол - **VH**. Много **BLDC** от висок клас имат вградени сензори на Хол.

Ако **BLDC** има сензори на Хол, то ще има допълнителни електрически връзки, които позволяват на контролера да чете **VH** за всяка намотка. С тази информация контролерът може да определи как е ориентирано магнитното поле, и с това как е ориентиран ротора.

Сензорното управление на двигателя е по-лесно да се приложи и по-надеждно от безсензорния контрол, но сензорният **BLDC** изисква допълнителна схема, което означава по-големи двигатели и по-висока цена.

Електронен контрол на скоростта - *Electronic Speed Control (ESC)*

Вместо да се проектират и изграждат потребителски контролери, много често се използват предварително създадени схеми, наречени *електронен контрол на скоростта (ESC)* системи. Повечето *ESC* са разработени и са предназначени за **BLDC**. За контрол на безчетков двигател се предлагат в две разновидности: *ESC* – сензорно и безсензорно. Повечето (*ESC*) са предназначени за безсензорен контрол. Като пример, фиг.2.11 представя *ESC* предназначени да бъдат свързани към сензори мотор. Както в повечето *ESC* тази на фигурата има три комплекта проводници:



- Три проводника захранват двигателя.
- Два проводника за захранването на сензорите *ESC*.
- Три проводника свързват контролера на двигателя.

Фиг. 2.11. Електронен контрол на скоростта при безсензорен **BLDC**

Стъпкови двигатели

При стъпковите двигатели въртящото магнитно поле се създава с последователност от импулси вместо от трифазно синусоидално напрежение. Те са подходящи за използване в слаботокови приложения с позиционно управление, където броят на импулсите е пропорционален на въртенето на двигателя. Поради ниската им ефективност стъпковите електродвигатели не са подходящи за използване в приложения с голяма мощност (силнотокowi приложения).

Стъпковият двигател е електрическа машина, която преобразува постояннотокowi енергийни импулси в механична енергия на вала на двигателя. В зависимост от конструкцията (двуполюсни или еднopolюсни) стъпковите двигатели имат 4, 6 или 8 терминала за свързване. Тяхната конструкция наподобява тази на синхронните електродвигатели, като роторите им се въртят в съответствие с управляващите импулси, подавани на намотките на статора, а ъгълът на завъртане се определя от броя на импулсите.

Тъй като стъпковите двигатели се управляват по цифров път, те са идеални за дискретни системи за управление, като например микропроцесори. На всеки импулс съответства определен стъпков ъгъл α , т.е. за n импулса ъгълът на завъртане ще бъде: $\gamma = n\alpha$. В съответствие с това стъпковият двигател може да се използва за позиционно управление по отворен контур, т.е. в системи

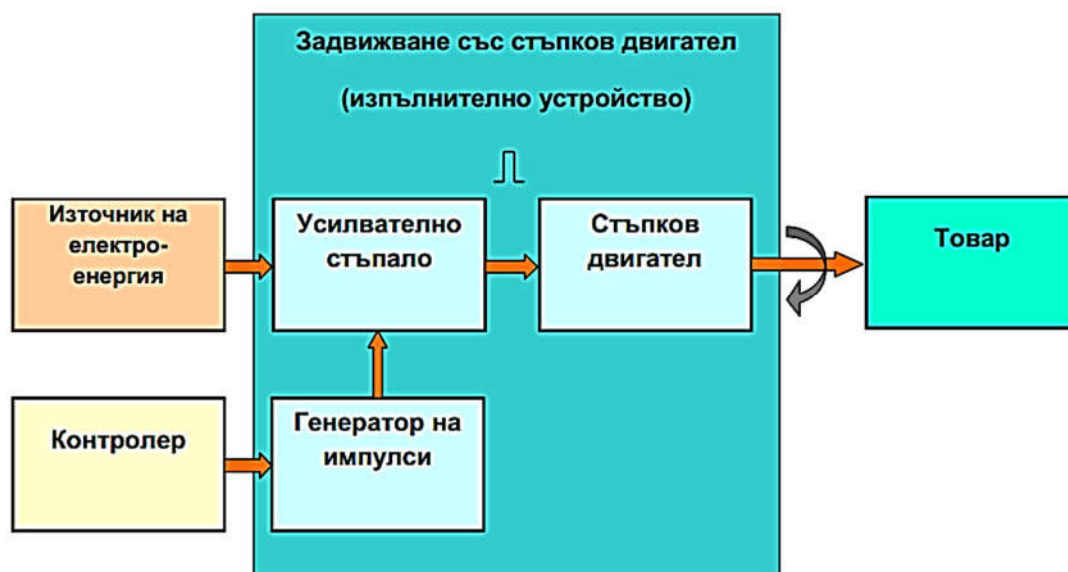
без обратна връзка. Предимство на стъпковите двигатели е, че не са необходими сензори за обратна връзка по време на позиционирането. За увеличаване на точността на позициониране двигателите могат да се конструират с по-голям брой полюси. Тъй като двигателят се задвижва с последователност от импулси, движението при ниски скорости може да не е гладко.

Стъпковите двигатели са с мощност до ~1 kW; те се произвеждат също като линейни двигатели.

Стъпковият ъгъл α се определя по формулата: $\alpha = \frac{360^\circ}{N_{ph} \cdot m \cdot Z}$, [7]

където N_{ph} е броят полюси на фаза, m е броят на фазите, а Z е броят на зъбите.

Едно стъпково задвижване включва стъпков двигател, генератор на импулси и усилвателно стъпало. Управляващите импулси се генерират на базата на еталонни работни стойности (скорост, позиция, ускорение) и се използват за управление на усилвателното стъпало, което е изпълнено с транзисторни ключове. Ключовете от своя страна активират намотките на стъпковия двигател, така че да се следва зададена траектория на изпълнителното устройство колкото е възможно по-прецизно.



Фиг. 2.12. Структура на задвижване със стъпков двигател

Типове стъпкови двигатели

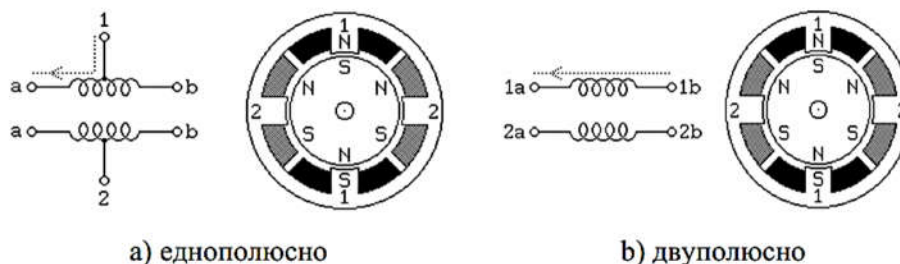
Според конструкцията си стъпковите двигатели се разделят на двигатели с реактивен ротор (от феромагнитен материал) и двигатели с активен ротор (с постоянен магнит). Възможна е и комбинация от двете решения. При първия тип стъпкови двигатели роторът се състои от монолитна зъбчата сърцевина от електротехническа стомана. След изключване на напрежението на статора остатъчният магнетизъм изчезва. Следователно, след прилагане на напрежение към двигателя, магнитният поток ще може да се движи през сърцевината без никакви пречки. Роторът започва да се движи (да се завърта) в посоката на минимално магнитно съпротивление, т.е. към най-малката въздушна междина между следващия зъб и намотката.

Статорът на стъпковите двигатели с постоянен магнит (фиг.2.13) се състои от електротехническа стомана, а роторът е от постоянни магнити с алтернативно променящи се полюси. Роторът се завърта от магнитното поле, създадено в статора. Тъй като стъпковите двигатели с реактивен ротор нямат постоянни магнити, те нямат и задържащ момент, когато не им е подаден ток. Броят на техните полюси и съответно точността на позициониране при тях са ограничени. При хибридните стъпкови двигатели могат да бъдат открити характеристиките и на двете конструкции стъпкови двигатели, като роторите им имат както постоянни магнити, така и зъбчата сърцевина.

Терминът двигатели с висок въртящ момент се използва за описание на стъпкови двигатели, при които за направата на роторите са използвани изключително силни редки земни магнитни материали. Такива магнити създават по-голяма плътност на магнитното поле от обикновените.

Принцип на работа

Еднополюсните стъпкови двигатели с 5 или 6 проводника обикновено се свързват по начина, показан на фиг.2.13. Показано е напречното сечение на „30° стъпков двигател“. Намотка1 на двигателя е разположена между горния и долния полюс на статора, а намотка2 – между левия и десния полюс на двигателя. Роторът е постоянен магнит с шест полюса (3 двойки полюси), разположени по периферията му. За постигане на по-висока ъглова резолюция роторът трябва да има пропорционално повече полюси. Ако се махне захранването на намотка 1, а намотка 2 остане под напрежение, роторът ще се завърти на 30°, или с една стъпка. За да се върти двигателят непрекъснато, захранването трябва да се включва последователно към двете намотки.

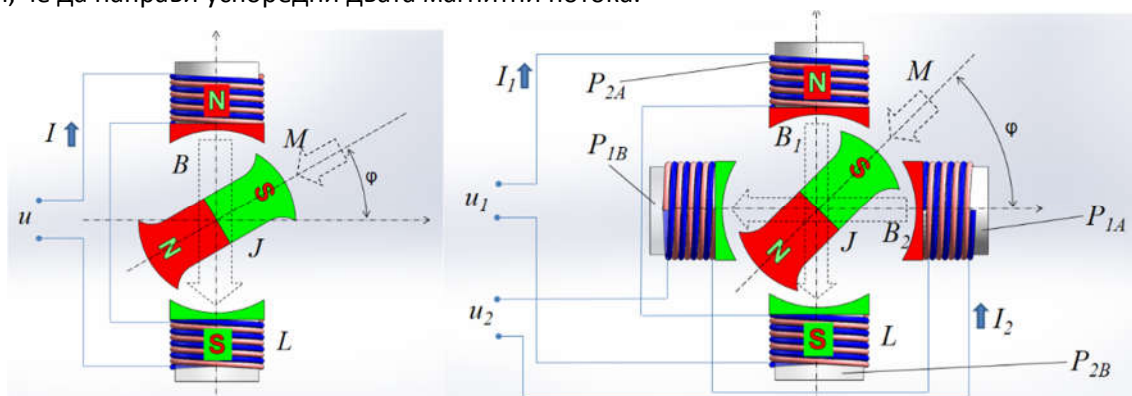


Фиг. 2.13. Свързване на стъпкови двигатели

Двуполусните стъпкови двигатели с постоянен магнит и хибридните двигатели са със същата конструкция като еднополюсните, но двете намотки са свързани по по-прост начин, без централни разклонения. Така самият двигател е по-опростен, но управляващата схема, нужна за смяна на полярността на всяка двойка двигателни полюси, е по-сложна. Ако намотките не са под напрежение, възбуденият двигател с постоянен магнит или хибриден стъпков двигател поддържа задържащия момент, избягвайки нежелано движение, причинено от външни сили.

Опростен модел на стъпков двигател с ротор с постоянен магнит

Опростен модел на стъпков двигател с ротор с постоянни магнити е показано на фиг.2.14 Той се състои от статор, съдържащ две или повече фазови намотки, навити на фиксирани магнитопроводи и ротор с постоянни магнити с голяма коерцитивна сила. При захранване на статорните намотки, техният магнитен поток взаимодейства с този на постоянния магнит на ротора. Ротора ще се завърти по такъв начин, че да направи успоредни двата магнитни потока.

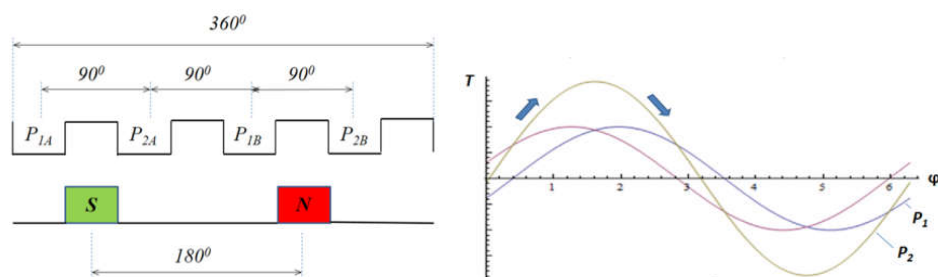


Фиг. 2.14. Опростена схема на стъпков двигател

Въртящия момент \vec{T} е векторно произведение на вектора на магнитния момент на постоянния магнит \vec{M} и вектора на магнитната индукция \vec{B} :

$$\vec{T} = \vec{M} \times \vec{B} \quad |\vec{T}| = |\vec{M}| |\vec{B}| \cos \varphi \quad [8]$$

Самия ротор не е пръчковиден магнит, а има специфична конструкция, където има два назъбени диска от постоянни магнити съответно за N и S полюсите. Диска за N се разминава с този за S , с един зъб. Стъпката на двигателя се измерва в ъгове градуси и зависи от броя зъби на ротора. Колкото са повече те, толкова повече на брой и по-малки са стъпките. Статорът също има назъбена структура. Освен това въртящия момент зависи и от броя на захранените фази.



Фиг. 2.15. Опростена схема на стъпков двигател

При наличие на две статорни намотки взаимодействието е следното:

$$|\vec{T}| = |\vec{M}| |\vec{B}| \cos(\varphi) + |\vec{T}| = |\vec{M}| |\vec{B}| \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad [9]$$

Фази, полюси и стъпкови ъгли

Обикновено стъпковите двигатели имат две фази, но се срещат и варианти с повече фази.

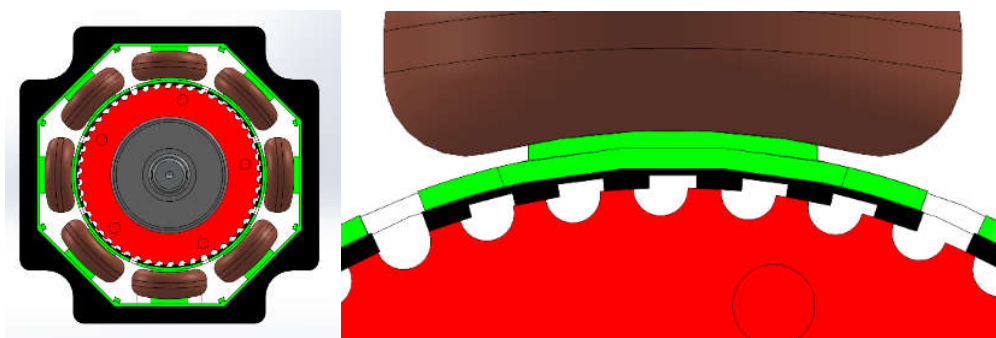
Полюсът може да бъде дефиниран като област в магнетизираното тяло, където е концентриран магнитния поток. Както статора така и ротора имат полюси. Стъпковия двигател с постоянни магнети в ротора има еднакъв брой роторни и статорни полюси. Типично такъв мотор има 12 полюсни двойки. Хибридният двигател има ротор със специфично назъбване. Роторът разделен на две части разделени от постоянен магнит – това прави половината от зъбите северен полюс, а другата половина южен. Броя на полюсите е еднакъв с броя на зъбите. Статорът на хибридният двигател също е назъбен, като назъбването е върху сърцевината на намотките. Обикновено се използват 4 полюса за 3.6 градусова конструкция и 8 – за 1.8 градусова.

Зависимостта между броя на роторните полюси и еквивалентните статорни полюси и броя на фазите определя ъгъла за режим **full-step** на стъпковия двигател:

$$\varphi_{Step} = \frac{360}{N_{Phase} \cdot Phase} = \frac{360}{N}, \quad [10]$$

където N_{Phase} - брой на еквивалентните полюси за фаза. $Phase$ - Броя на фазите, N - Общия брой на полюси за всички фази.

По същността си, хибридният двигател представлява двигател с постоянни магнети в ротора, но с голям брой полюси. Той обединява предимствата на двата други типа стъпкови двигателя: с променливо магнитно съпротивление и с постоянни магнети. Днес това е най разпространеният двигател.



Фиг. 2.16. Опростена схема на стъпков двигател

Преглед на топологията на схемите за управление на стъпковите двигатели

Съществуват няколко характерни възможности за контрол на стъпковите двигатели, като най характерни са:

- Отворена верига и фиксирано напрежение - *Open Loop – Fixed Voltage*;
- Отворена верига и фиксиран ток - *Open Loop – Fixed Current*;
- Затворена верига и токов контрол.

Всеки от тези варианти има собствена специфика на динамиката на движение.

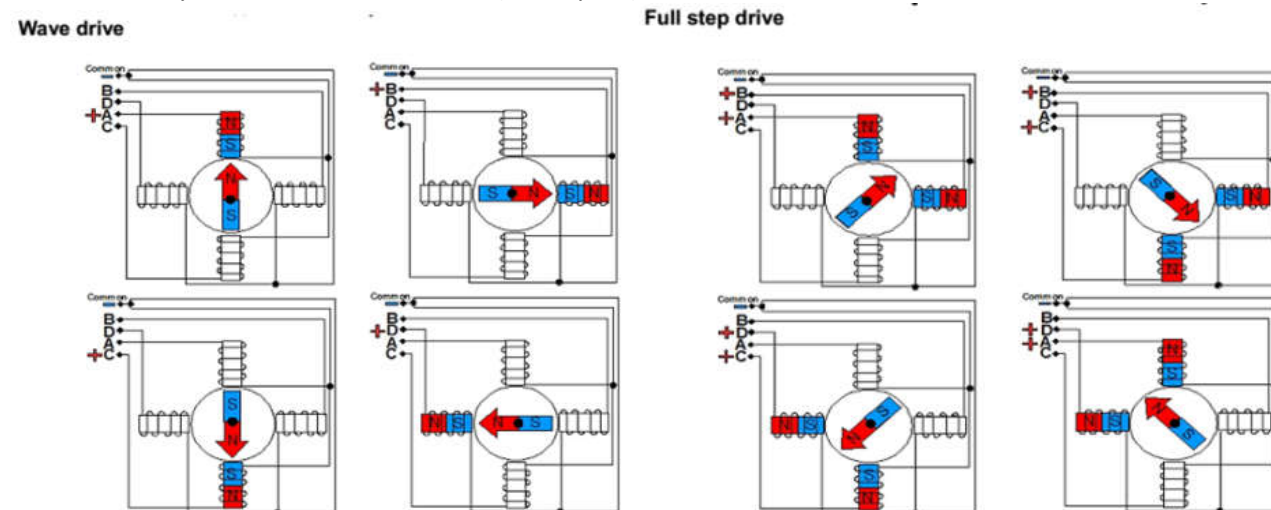
Методи за управление с отворена верига

Съществуват два метода за управление с отворена верига. Единият е метод с фиксирано напрежение при които се използва **PWM** регулиране без обратна връзка.

Вторият метод е с фиксиран ток, в този метод се извършва корекция на всеки четири стъпки за да се постигне желаната стойност на тока.

Управление на стъпкови двигатели

Най-простият начин за управление на стъпкови двигатели е т.нар. **Вълново управление**, при което се възбужда само една намотка (една фаза) в даден момент.



Фиг. 2.17. Вълново управление на стъпков двигател

Недостатък на този подход е по-малкият генериран въртящ момент. Възможните позиции на ротора на един двуфазен двигател са на 0° , 90° , 180° и 270° . При едновременно възбуждане на двете намотки двигателят започва да работи в двуфазен режим на пълна стъпка (фиг.2.17) и генерира по-голям въртящ момент. Възможните позиции на ротора са между позициите на вълновото управление, съответно 45° , 135° , 225° и 315° . При комбиниране на двата режима, т.е. при алтернативното активиране ту на една, ту и на двете намотки, са възможни 8 позиции на ротора. Този режим се нарича режим на половин стъпка (фиг.2.17).

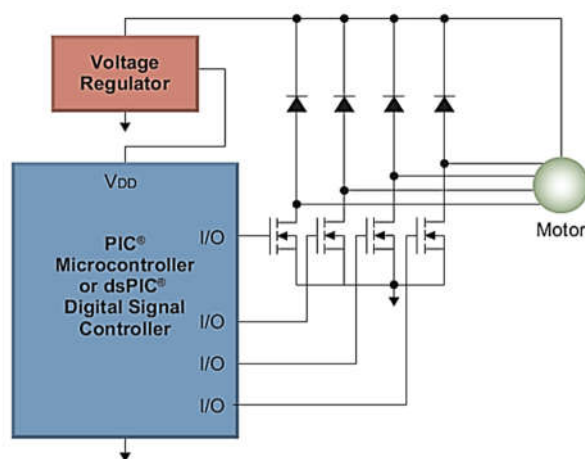
При захранването на двете намотки съответно със синусоидален и с косинусоидален сигнал се получава почти идеално въртящо се магнитно поле и следователно ще има идеално въртливо движение. Ефективността на стъпковите двигатели нараства с нарастването на броя стъпки на оборот, консумацията на енергия става по-равномерна, опасността от загуба на стъпка (явление, при което двигателят не изпълнява стъпка, въпреки че е получил входен импулс) намалява и двигателят работи по-бързо.

Захранването на намотките на стъпковия двигател с дискретни импулси, базирани на правилото синус-косинус, се нарича микростъпков режим. Предимството на този режим е бързината на движение, а недостатъкът – понижена точност, която обуславя нуждата от сензори за скорост и за позиция.

Стъпковият двигател изчислява ъгъла на завъртане чрез преброяване на импулсите. Получава се постоянно инкрементираща се стойност. За определяне на абсолютната позиция, броячът първоначално се зарежда с еталонна стойност, което обикновено се осъществява с крайни изключватели.

Управляващата част на задвижването със стъпков двигател се състои от генератор на импулси на основата на микроконтролер и усилвателно стъпало (фиг.2.18). Микроконтролерът трябва да генерира 4-битова последователност за активиране на краищата на 4-те намотки. С всяка битова последователност роторът се завърта постъпково; постоянно въртене се постига с програмен цикъл, където броят на стъпките се задава като еталонна стойност. Предимство на стъпковия двигател е точността на определяне на позицията на ротора.

Входните портове на усилвателното стъпало могат да се свържат директно към изходния порт на микроконтролера или към паралелния порт на компютър (фиг.2.18).



Фиг. 2.18. Усилвателно стъпало на електро задвижване със стъпков двигател

Както може да се види, необходими са само три порта за управление на стъпковия двигател в желаната посока със желана скорост.

Таблица 1. Означения при стъпковите контролери

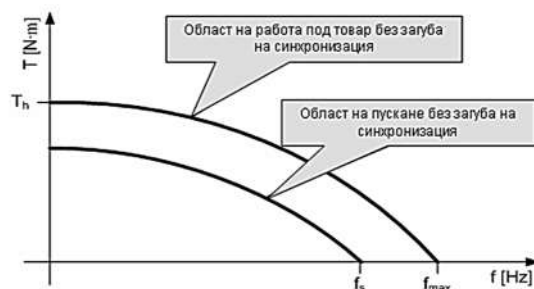
CW/CCW	Задава посоката на въртене(CW - по посока на часовниковата стрелка, CCW - обратно на часовниковата стрелка).
Clock	При подаване на кратък импулс на този вход, роторът се завърта с една стъпка. По време на управляващия цикъл само този вход е активен.
Half/Full	По подразбиране е заземен. При подаване на +5V, двигателят започва да работи в режим на половин стъпка.
Enable	При заземяване на този вход се прекъсва захранването на двигателя.
Vref	Vref (0..3 V) определя максималния ток на двигателя Vref=Im.RS Например, ако максималният ток е Im=0.5A и е избрано съпротивление RS=1 Ω, то към терминала трябва да се подаде напрежение 0.5V.
Reset	Установяване на стъпковия двигател в начално състояние. За да работи двигателят, на този вход трябва да се поддържа напрежение +5V
Control	Когато входа е активен, токът се изменя бавно (режим на "насихане" на фазата). При заземяване на входа, токът се изменя бързо(забрана на "насихането")
Synk, Home	Обикновено тези портове не се свързват

Товар на стъпковите двигатели

Развиваният от един стъпков двигател въртящ момент зависи от честотата на стъпките и съответно от скоростта на ротора. Двигателите осигуряват въртящия момент, заложен в техническите им характеристики само при относително ниски скорости. С увеличаване на скоростта наличният въртящ момент намалява, което може да доведе до излизане от синхронизация, наречено загуба на стъпка. Този тип характеристика въртящ момент – скорост е обусловена от индуктивностите на намотките, където възникват условия за създаване на противоелектродвижеща сила, действаща срещу захранващото напрежение, което причинява намаляване на тока и на въртящия момент. Съвременните стъпкови двигатели обикновено се захранват от управляеми източници на ток, които осигуряват постоянен ток и въртящ момент за голям диапазон от скорости. При поддържането на тока на константно ниво напрежението на един номинално 12-волтов терминал на двигателя може да се повиши до 30-40 V.

Трябва да се имат предвид някои ограничения при натоварването на стъпковия двигател:

1. Задържащият момент T_h е товарът, който може да бъде приложен към един статично възбуден неподвижен (роторът не се върти) двигател, без това да причини завъртане на ротора.
2. Честотата на пускане/спиране f_s е най-високата стъпкова честота, при която може да се пусне(спре) не натоварен стъпков двигател без загуба на синхронизация.
3. Скоростта на двигателя е ограничена до максимална стойност, съответстваща на f_{max} .
4. Областта, в която двигателят може да се пуска и спира без загуба на синхронизация, е ограничена от вътрешната крива и координатните оси на фиг.2.19. Външната крива определя областта, в която двигателят под товар може да работи без загуба на синхронизация.

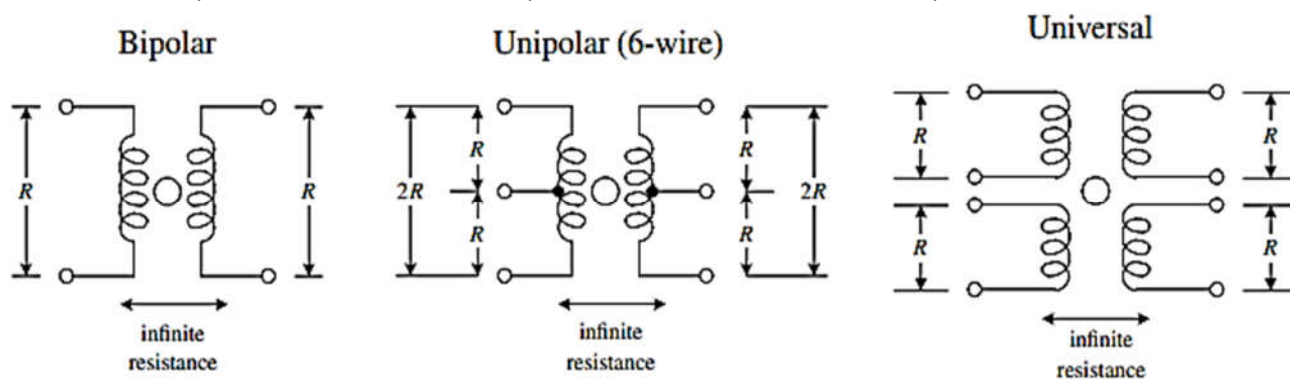


Фиг. 2.19. Зависимост на въртящия момент от скоростта при стъпков двигател

Идентификация на стъпковите двигатели

Когато става въпрос за определяне на характеристиките на неизвестно стъпков двигател – „степер“, следните съображения могат да са полезни. По-голямата част от степерите на пазара днес са еднополюсни, биполярни, или универсални. Въз основа на това ако един степер има четири извода, то най-вероятно е биполярен степер. Ако има пет извода, а след това на мотора най-вероятно е еднополюсен с обща точка на изводите. Ако степерът има шест извода, то вероятно е еднополюсен с отделени намотки. А двигател с осем потенциални извода най-вероятно ще бъде универсален степер. При опит да се завърти валът, ако валът се върти свободно, двигателя най-вероятно е от *variable-reluctance* тип. Невъзможността за лесно завъртане на вала означава че степерът е от *permanent-magnet* тип.

След определяне на вида на степера, следващата стъпка е да се определи кои изводи какви са.



Фиг. 2.20. Видове изводи при стъпковите двигатели

Серво задвижване

Терминът сервозадвижване смислово включва следяща система за автоматично управление на положението, скоростта и евентуално нейните производни на физически обект с помощта на обратна връзка с цел корекция. Обратната връзка отличава сервосистемите от останалите видове задвижвания. При сервомеханизмите заданието (координати, скорост и др.) се подава на входа на сервосистемата, тя определя текущата величина, сравнява я със зададената и изработва управляващо въздействие, намаляващо разликата им. С основание сервозадвижванията се приемат като най-високотехнологичните електрозадвижвания

Принцип на работа

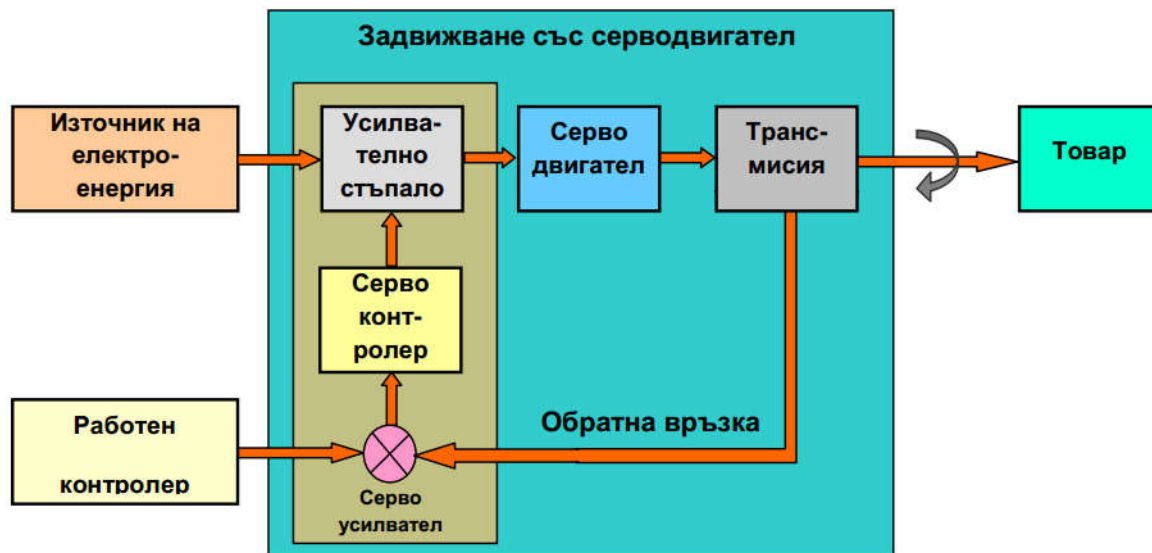
Едно сервозадвижване се състои от серводвигател и сервоусилвател (фиг.2.21). Предназначението на сервоусилвателя (известен още като сервопреобразувател) е да управлява фазовите токове на серводвигателя. В системите за автоматизация сервозадвижванията обикновено се използват като спомагателни задвижвания.

Сервоусилвателят управлява тока, който се подава на намотките на двигателя, така че да се развият въртящият момент и скоростта, зададени от работен контролер. Основните компоненти на сервоусилвателя са усилвателно стъпало и сервконтролер.

Контролерът на сервоусилвателя управлява усилвателното стъпало и осигурява точната работа на задвижването при променливи товари чрез постоянно сравняване на еталонните (зададените) и действителните стойности на тока, позицията и скоростта.

Усилвателното стъпало на практика е един модулатор от областта на силовата електроника, формиращ токовете на серводвигателя по такъв начин, че зададената траектория на изпълнителното устройство да бъде точно следвана.

За разлика от конвенционалните електрозадвижвания, които най-често работят с постоянна скорост, работата на един серводвигател по правило не е „гладка“. Ускоряването до разчетната скорост често става в рамките на милисекунди, последвано веднага след това от бързо забавяне, по време на което точността на позициониране трябва да остане в рамките на няколко стотни от милиметъра.



Фиг. 2.21. Структурна схема на сервозадвижване

Обикновено сервозадвижванията трябва да отговарят на следните изисквания: висока точност на позициониране; висока точност на контролиране на скоростта; широка област на управление; стабилност на въртящия момент; достатъчно голяма претоварваща способност; бърза реакция.

Предимствата на сервозадвижванията пред другите типове задвижвания са добрите им динамични свойства, точността им и големия въртящ момент при близки до нулата скорости, както и компактната им конструкция и добрата специфична мощност (плътност на мощността). Под динамични свойства се разбират времето за реакция, което нараства с увеличаване на скоростта и броят на работните цикли, което съответно се отразява и на производителността на машините.

Изискуемата от едно задвижване точност често се определя от работната машина, която трябва да се задвижи. Едно модерно задвижване с бърза реакция трябва да може да се настройва така, че да може да изпълнява изискванията на различни работни машини.

Сервозадвижванията са задвижващи системи с висока точност и бърза реакция, които работят с голям диапазон скорости и запазват характеристиките си дори при кратковременни претоварвания.

Двигатели на сервозадвижванията

Серводвигателите са електрически двигатели, конструирани така, че приоритет да имат динамичните свойства, т.е. бързо ускорение и бързо намаляване на скоростта. Произвеждат се серводвигатели както за променлив ток (синхронни и индукционни двигатели), така и за постоянен ток (със или без четки).

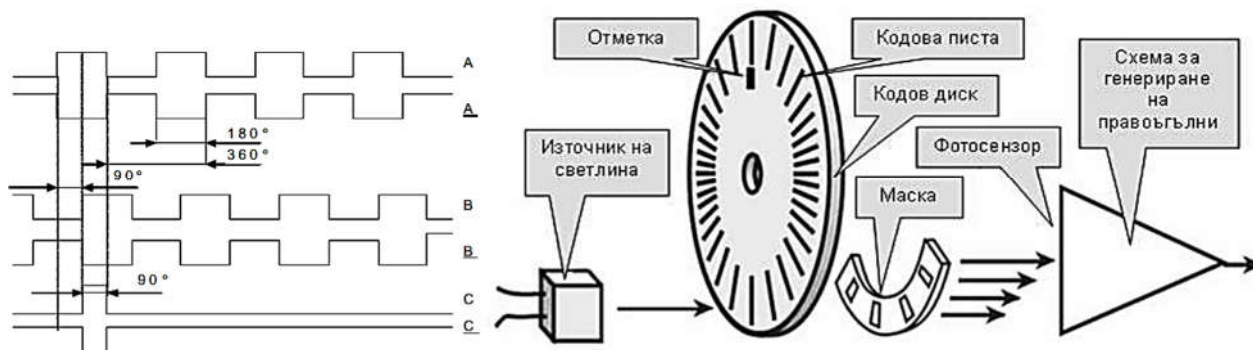
Синхронният двигател с постоянен магнит (СДПМ) **BRASHLESS** е най-подходящият съвременен двигател, който отговаря на изискванията, поставени към двигателите на сервозадвижванията. Висока плътност на мощността се постига с използване на постоянни магнити като например неодим-желязобор (NdFeB), самарий-кобалт (SmCo) или феритни материали. В по-малка степен се използват и индукционни двигатели за сервозадвижванията. Серводвигателите се произвеждат с вграден позиционен сензор, осигуряващ и обратна връзка по скорост на контролера.

Конструкцията на безчетковия постояннооточков двигател (БПД) наподобява **СДПМ**, като разликата е само в метода на управление.

Управление и обратна връзка при сервозадвижванията

Обратна връзка

Стандартно серводвигателите се доставят заедно със сензори за позиция, наречени резолвери, които определят абсолютната позиция на вала за един оборот (360°). Сензорите синус-косинус (сензори за един или повече обороти) и инкременталните сензори за позиция също са съвместими с цифровите сервоконтролери. Тези сензори осигуряват висока точност и бърза реакция.



Фиг. 2.22. Сигнали на инкрементален сензор за позиция. Конструкция^[1]

Инкременталният сензор за позиция се състои от източник на светлина и непрозрачен кодов диск с перфорирани кодови писти (пътечки). Фотосензор улавя светлината, която прониква през отворите и генерира синусоиден сигнал, който трябва да се превърне в последователност от правоъгълни импулси (фиг.2.22). Скоростта на въртене на вала се определя от честотата на изходните импулси на сензора (фиг.2.23).



Фиг. 2.23. Зависимост между изходния сигнал на сензора и скоростта

Примери за приложения на сервозадвижванията

Позиционирането е класическа задача на сервозадвижванията. За части от секундата задвижващото устройство трябва да развие разчетната си скорост и след много кратко време трябва много бързо да спре, за да достигне до зададената позиция с максимална точност.

Управлението на скоростта се използва за осигуряване на плавна работа на задвижването. Степените на ускорение и намаляване на скоростта са дефинирани със съответни пускови и спирателни фронтове. Подпрограмите в индустриалните контролери позволяват прилагане на няколко различни криви на изменение на скоростта в зависимост от конкретния етап на производствения процес.

За позициониране на шпиндел двигателят трябва да бъде спрян за кратко и оста да бъде преместена на друга позиция за смяна на инструмента или произведения продукт.

Синхронизация на осите е необходима при приложения, при които движението по една координата зависи от другите координати.

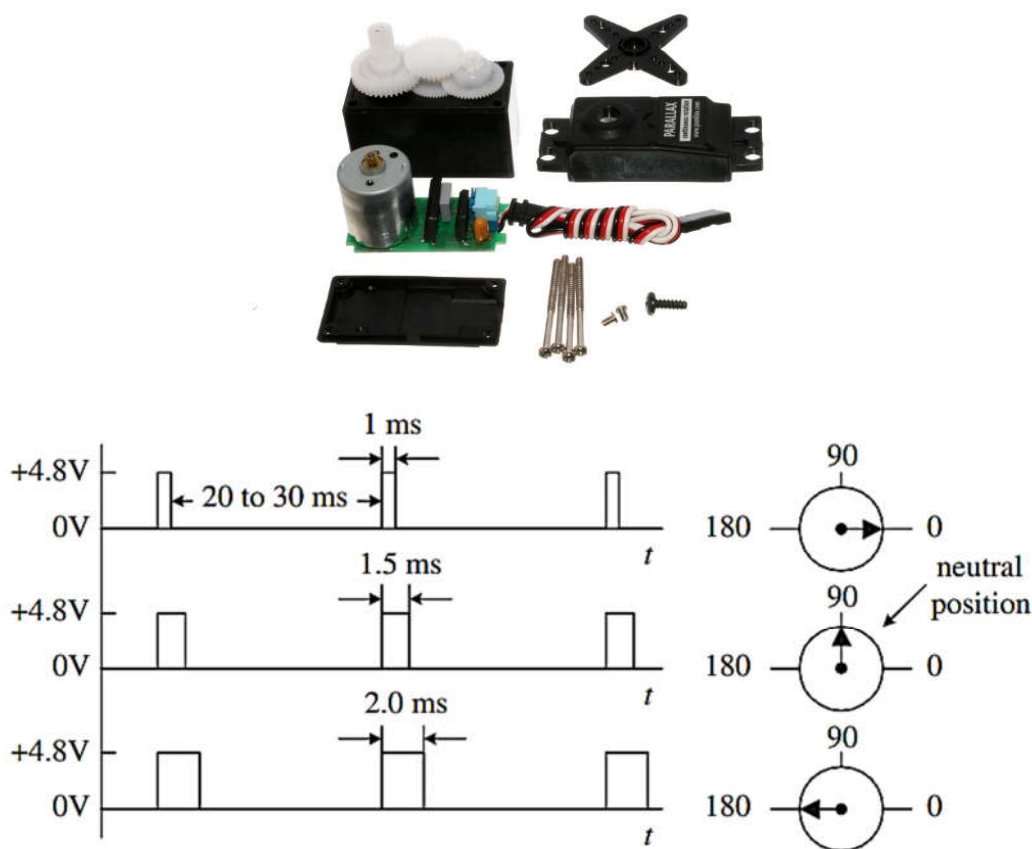
Електронният ексцентриков диск се използва в механизми с променлива трансмисия (с променливо предавателно отношение), където заменя по-старото механично решение с ексцентриков диск на главния вал.

Т.н. летящ трион е механизъм, използван за обработване на движещи се материали, например по транспортно устройство: рязане, печатане, заваряване и др. По време на обработката оста трябва да следва продукта и да се върне в началната си позиция след приключване на обработката.

Сервозадвижването е способно да развие пълния въртящ момент при ниски скорости и затова се прилага в навиващи машини и преси.

RC Серво

Дистанционно управление (RC сервомеханизмите), за разлика от постояннотоковите двигатели, са устройства, предназначени специално за позициониране и контрол. Един RC серво използва външен ШИМ (Широчинно импулсна модулация - **PWM**) сигнал за контрол на позицията на своя вал. За да се промени положението на вала, ширината на импулса на модулирания сигнал е различна. Количеството на ъгловото завъртане на вала на усилвател на RC се ограничава до около 180° или 210° в зависимост от конкретна марка на сервомеханизма. Тези устройства могат да предоставят значително количество въртящ момент при ниска скорост на въртене (поради вътрешна система от предавки) и осигуряват точно преместване. RC сервомеханизмите често се използват за управление на волана в модели на коли, лодки и самолети. Използват се често в роботиката, както и в много сензори за позициониране. Обикновеният RC сервомеханизъм изглежда като проста кутия с задвижващ вал и три жици, излизащи от него. Трите проводника са съответно: проводник на захранването (обикновено черен), заземителна линия (обикновено червен), и проводник за контрол на позиционирането (цветът варира въз основа на производителя). В кутията има DC мотор, устройство за обратна връзка, както и схема за управление (Фиг. 2.24).



Фиг. 2.24. Сервомеханизъм в разглобен вид и типичен сигнал за управление

Устройството за обратна връзка обикновено се състои от потенциометър, механично свързан към двигателя чрез поредица от зъбни колела. Когато двигателят се върти, потенциометърът също се върти. Валът на двигателя обикновено се ограничава до завъртане на 180° (или 210°). Потенциометърът действа като позициониращо устройство за точно завъртане на вала. Схемата за управление използва потенциометъра, заедно с ШИМ, за да завърти двигателя на определен ъгъл и след това да го фиксира. (Големината на въртящ момент варира от серво до серво.).

С малка преработка на електроинсталацията, сервото може да бъде превърнат в двигател, с непрекъснато въртене. За да се завърти двигателя в посока на часовниковата стрелка, към управляващия вход се прилага пулс по-широк от $1,5\text{ ms}$. Докато контролният сигнал е на място, двигателят ще продължи да се върти. За включване на двигателя обратно на часовниковата стрелка, пулсът, приложен към управляващия вход трябва да е по-тесен от $1,5\text{ ms}$.