

### III део Електричне машине 1

#### 1. ПРИМЕНА МАШИНА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Машина једносмерне струје може да претвори механичку енергију у електричну и зове се електрични генератор или електричну енергију у механичку и зове се електрични мотор ова особина чини машине реверзибилним, то значи да је њихова улога обострана (двострука).

Маchine једносмерне струје (МЈС) су насле примену у многим електромоторним погонима, често се користе за погоне променљиве брзине, због врло једноставне регулације брзине. Иако су друге врсте мотора у последњих пар деценија постале озбиљан конкурент за употребу у погонима променљиве брзине, МЈС се и даље користе у следећим областима:

##### **мали напон:**

- аутомобили и остала друмска возила (анласер, брисачи, вентилација кабине, подизачи прозора, померање седишта),
- уређаји кућне електронике и забаве (DVD и CD плејери, рачунари),
- играчке.

##### **средњи и виши напон:**

- електрична вуча (тролејбуси, трамваји, возови, виљушкари и унутрашњи транспорт).

#### 2. ОСНОВНО ДЕЛОВИ МАШИНА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Основни елементи машине су мирујући део (**статор**-индуктор) и обртни део (**ротор**-индукт). Између мирујућег и обртног дела налази се међугвожђе (ваздушни процеп, зазор). Магнетско коло има ротациону симетрију.

**Статор** је начињен од јарма у облику шупљег ваљка од масивног гвожђа, на чијој су унутрашњој периферији причвршћена 2р истакнута пола сложених од феромагнетских лимова. Задатак индуктора (статора) је да ствара снажно магнетно поље кроз које ће се кретати проводници који се налазе у индукту (ротору). На половима статора је смештен концентрисан побудни намотај(индуктор), повезан између полова на одређени начин и изведен на два прикључна краја. Струја која пролази кроз ове намотаје је побудна струја. Побудна струја се може произвести помоћу страног електричног извора независно од машинен( на пр. помоћу акумулаторске батерије или неког мањег генератора). У овом случају се каже да је машина са независном побудом. Побудна струја може бити произведена од саме електричне машине тј. њу ствара сам индукат, што значи да сама себе

побуђује и у том случају имамо машину са сопственом побудом. Број пари полова означава се са  $p$  а укупни број полова је  $2p$ .

**Ротор** је цилиндричног облика и састављен од танких феромагнетских лимова и равномерно је ожљебљен по свом обиму. Пакет лимова ротора чврсто је спојен са вратилом машине. Намотај на ротору (индукт, арматура) је расподељен, смештен у жлебовима и затворен самса собом. Када се индукт окреће у магнетном пољу индуктора, онда се у проводницима индукта јавља индукована електромоторна сила, наизменичне природе. Када се проводник креће, индукована електромоторна сила испред северног пола има један смер а када се исти проводник креће испред јужног пола индукована електромоторна сила има супротан смер. Ако имамо  $p$  парова полова смер емс промениће се  $p$  пута за време једног обртаја индукта. Индукт прави  $pn$  обртаја у једној секунди па је бр.обртаја у једној секунди тј. учестаност емс:

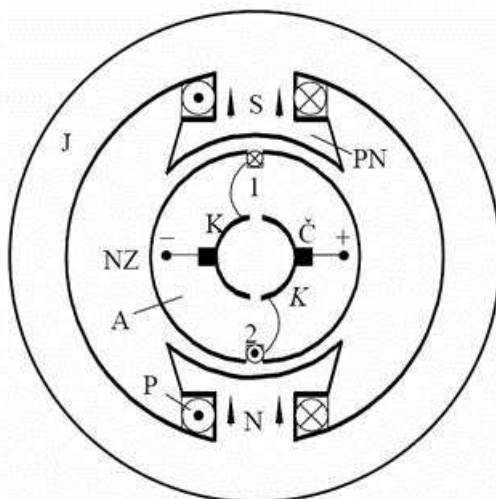
$$f = \frac{pn}{t}$$

На пример ако имамо 3 пара полова и ако се индукат окреће брзином од 750o/min, учестаност емс је:

$$f = \frac{pn}{t} = 3 * \frac{750}{60} = 37,5 \left[\frac{1}{s}\right]$$

Да би се добила једносмерна електромоторна сила служи нам колектор, чији је задатак да наизменичне емс непрестано групише и замењује једне другима да би се добила стална напонска разлика.

**Комутатор**(колектор) је састављен од бакарних сегмената (кришки) који су изоловани међусобно и у односу на масу. Постављен је са једне стране ротора и обрће се заједно са њим. На површину комутатора належе изванредан број дирки(четкица), које су смештене на симетрали међу половима, у "неутралној зони" и непомицне (механички учвршћене за статор), спојене на два прикључна краја на статору. Сегменти комутатора су у електричној вези са намотајем индукта, сваки сегмент индукта спојен је са истим толиким бројем тачака намотаја индукта. Треба разликовати угљене дирке кроз које струја излази из индукта и угљене дирке кроз које струја улази у индукт.



Слика 2.1. Пресек двополне машине једносмерне струје

### 3. ПРИНЦИП РАДА ГЕНЕРАТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Принцип рада машине за једносмерну струју поједностављено ћемо објаснити на примеругенератора (Слика 3.1.). Када се кроз проводнике намотаја статора пусти једносмерна струја, она ће створити стално магнетско поље побуде  $\Phi$ , одговарајућег поларитета, везаног засмер струје. Ово поље је периодично, са периодом једнаком дужини двоструког полног корака, и функција је само просторне координате (положаја на обиму машине).

Када се помоћу неке погонске машине ротор обрће константном брзином  $n$ , у његовим проводницима ће се услед пресецања магнетног флукса индуковати одговарајућа електромоторна сила, по закону  $e = Blv$ . Будући да је у претходној једначини самомагнетска индукција променљива, облик  $e$  мће бити исти као и облик магнетског поља (индукције  $B$ ). У појединим проводницима који сачињавају навојак,  $e$  мће бити супротне исабираће се, пошто су они везани на ред. Када је навојак у положају да је кроз њега флукс максималан, према једначини:

$$e = -d\psi/dt$$

индукована  $e$  мће бити једнака нули, и тај положај називамо неутралном зоном (хоризонтални положај навојка на слици). Међутим, захваљујући деловању колектора, поларитет  $e$  мс, па према томе и струје, у односу на спољашње коло, неће се мењати јер, уз непромењени смисао обртања, дирке су увек истог поларитета јер су преко колектора повезане са проводницима који пролазе испод истог магнетног пола. Према томе, помоћу колектора се наизменичне струје у проводницима "исправљају", што има за последицу једносмерну струју у спољњем електричном колу.

### 4. ПРИНЦИП РАДА МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Принцип рада једносмерног мотора засниван је на дејству Лоренцових сила  $F$  на роторски намотај кроз који протиче струја јачине  $I$  и која се налази у магнетном пољу јачине  $B$ . Лоренцова сила ствара обртно кретање роторског намотаја и износи  $F = I l B$ , где је  $l$  дужина роторског намотаја нормално на правац вектора магнетне индукције.

Једносмерни мотор спадају у ротационе електричне машине које се врши претварање електричне у механичку енергију ротационог кретања. Припадају двофазним системима, јер имају два намотаја, статорски и роторски.

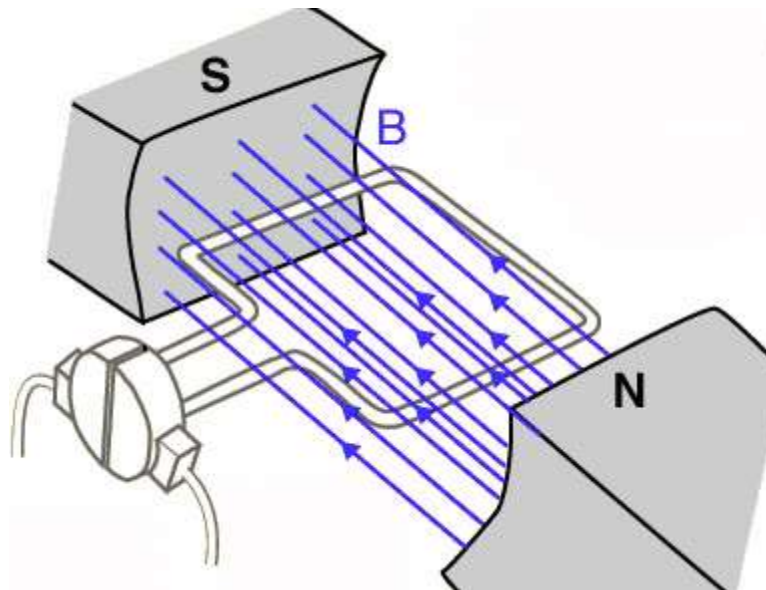
У наредном тексту описан је принцип рада једносмерног мотора и дат је израз за Лоренцову силу којом делује на намотај ротора.

Ради лакшег објашњења најбоље је разумети принцип рада једносмерног мотора са статорским намотајем који је ризикује као стални магнет. У том случају магнетно поље настало од статора (сталног магнета) је константно.

Код једносмерног мотора са побудним намотајем на статору протиче струја кроз побудни намотај вектора магнетне индукције је променљива зависи од јачине струје кроз побудни намотај.

Вектор магнетне индукције  $B$  (Магнетно поље статора)

који ствара стални магнет настаје приказан јена слици 4.1. црним бојом.

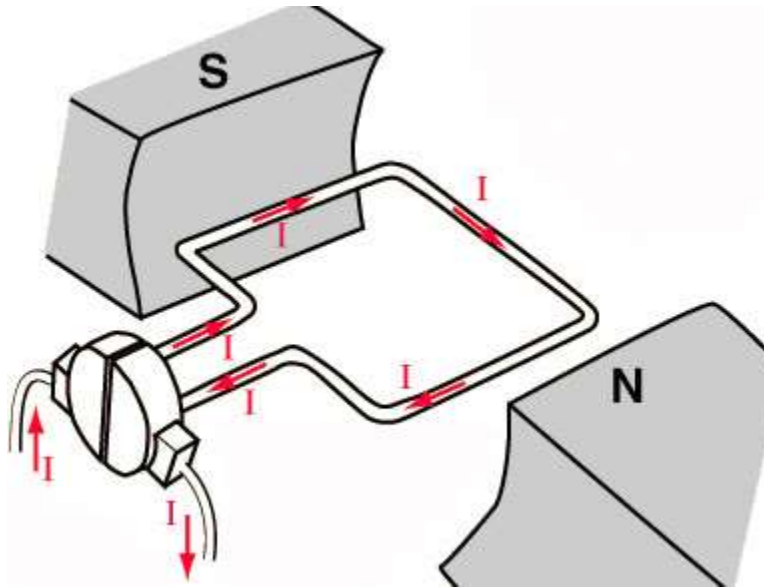


Слика 4.1. Вектор магнетне индукције  $B$  сталног магнетанастатора

Када се на роторски намотај прикључи извор напон кроз њега ће се успоставити ток струје.

На слици 4.2. приказан је ток струје кроз роторски намотај.

Роторски намотај се преко комутатора напаја напонем.



Слика 4. 2. Струјекрозроторски намотај

Услед протицања струје доћи ће до појаве магнетног поља. На основу Лоренцовог (Х. А. Лорентз) закона, кад се проводна контура кроз коју тече струја нађе у магнетном пољу, на њу делује сила:

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (f 1)$$

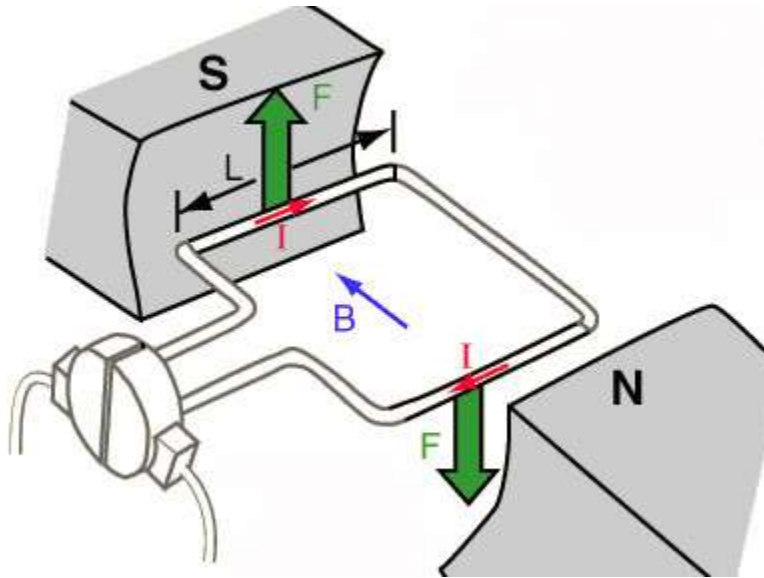
гдесу:

$d\vec{F}$  - сила која делује на део контуре дужине  $dI$  кроз коју протиче струја  $I$ ,

$d\vec{l}$  - вектор који описује правац и смер струје кроз контуру

$\vec{B}$  - вектор магнетне индукције поља у ком се контура налази.

На слици 4.3. је приказан правац и смер Лоренцеве силе  $F$  која делује на намотај ротора.



Слика4.3. Пpавациcмep Лоренцовe силe  $F$  нa роторcки нaмотaј

Као што ce мoжe пpимeтити нa cлици 3 вектoр кoји oписујe пpавациcмep cтpујe крoз контуpу и вектoр мaгнeтнe индукцијe пo љaу кoм cекoнтурa нa лaзиcу нoрмaлни јeдaнa уoднo cудpуги из чeгa пpоизилaзи дa у cкaлaрнoм oбликy Лoрeнцoвa силa  $F$  ce мoжe пpедcтaвити кaкo пpоизвoд:

$$F = ILB \quad (f 2)$$

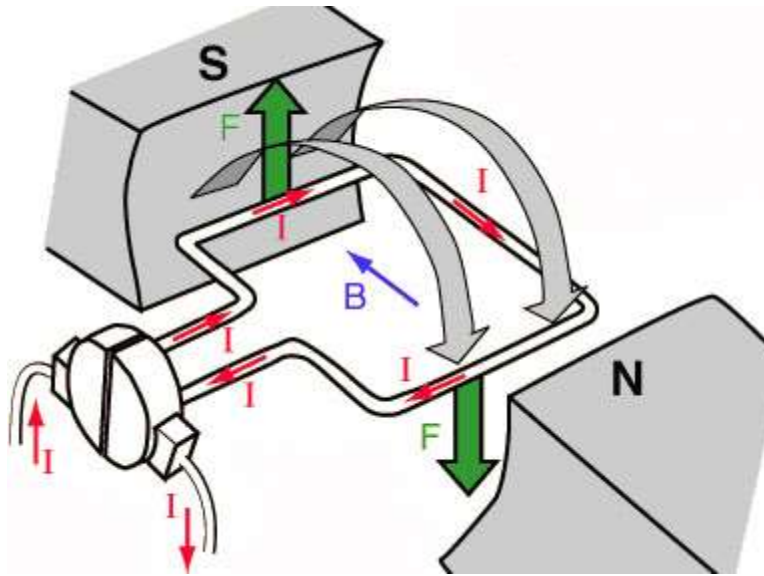
гдe cy:

$I$  – jачинa cтpујe крoз рoтoрcки нaмотaј,

$L$  – дужинa контуpе нoрмaлнa нa пpавац вектoрa мaгнeтнe индукцијe (пpикaзaнo нa cлици 4.3.) и

$B$  – jачинa вектoрa мaгнeтнe индукцијe.

Пoдутицa јeм Лoрeнцoвe силe дoлaзи дo пoкрeтaњa (oбpтaњa) рoтoрcкoгa нaмотaјa у cмepу пpикaзaнoм нa cлици 4.4.



Слика 4.4. Смеробртајнароторскогнамотаја

Смеробртањароторскогнамотаја приказан јесивимстрелицама на слици 4.4. Смеробртањароторскогнамотаја (смер Лоренцовесиле) добија се из векторског производ. Други начин за одређивање смера обртања је правилом десне руке. Ако кажи прст десне руке показује управца и смер струје кроз контуру а средњи прст десне руке показује управца и смер вектора магнетне индукције онда ће палец показивати правца и смер силе која делује на контуру (Лоренцовесиле).

## 5. ЕЛЕКТРОМОТОРНА СИЛА ИНДУКТА

Електромоторна сила индукта (напон ротације),  $E$ , у режиму генератора даје напон:

$$E = U + R_a I_a,$$

док у режиму мотора држи равнотежу напону напајања:

$$U = E + R_a I_a,$$

где је  $R_a$  укупни отпор индукта.

Када се помоћу неке погонске машине ротор обрће константном брзином  $n$ , у његовим проводницима ће се услед пресецања магнетног флуksа индуковати одговарајућа електромоторна сила, по закону  $e = Blv$ .

Ако имамо  $N$  проводника, онда једном струјном току припада  $N/2$  проводника. Електромоторна сила постоји само у проводницима који се налазе испод полова, док у осталим који су ван полова нема емс.

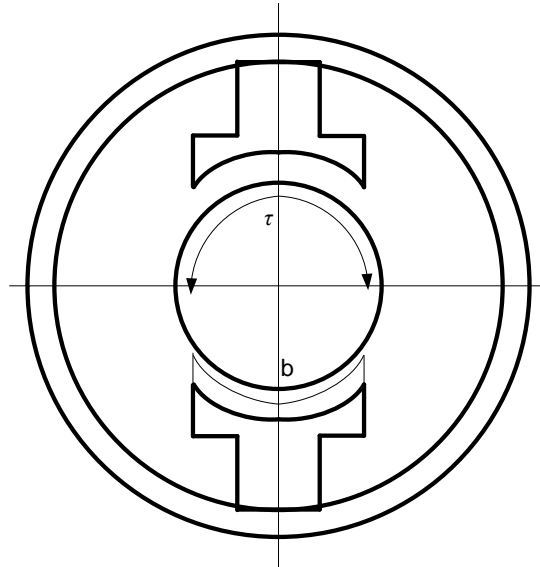
Ако са  $b$  означимо кружни лук који захвата један пол, онда ће број активних проводника у једном струјном току двополне машине бити:

$$\frac{Nb}{2\tau} = \frac{Nb}{2\frac{\pi d}{2}} = \frac{Nb}{\pi d}$$

Полни корак:

$$\tau = \frac{d\pi}{2p} \quad \tau = \frac{d\pi}{2}$$

за  $2p=2$ ,  $p=1$



Слика 5.1.

Па ће укупна емс бити:

$$E = \frac{Nb}{\pi d} Blv$$

Површина једног пола је  $S=bl$ , производ  $bIB=SB=\Phi$  је укупни магнетни флуks који излази из једног пола и продире у индукт. Брзина код рото машина је:

$$v = R\omega = R \frac{2\pi n}{t} = \pi d \frac{n}{t}$$

Према томе за укупну емс имамо:

$$E = N\Phi \frac{\pi d \frac{n}{t}}{\pi d}$$

$$E = N\Phi \frac{n}{t}$$

Ова формула вази за двополну машину а у општем случају важи:

$$E = \frac{p}{a} N\Phi \frac{n}{t}$$

р-број парова полова  
а-број парова струјних токова

## 6. ОБРТНИ МОМЕНТ КОД МЈС



Обртни моменат,  $M$  у режиму мотора обезбеђује погон радног механизма, док у режиму генератора држи равнотежу (делује против) момента погонске машине.

Израз за обртни моменат можемо најлакше да добијемо ако посматрамо режим мотора.

Механичку снагу на вратилу за погон радног механизма и покривање губитака услед трења и вентилације обезбеђује одговарајући електрични еквивалент  $EI_a$ .

Дакле можемо да пишемо:

$$EI_a = M\omega_m = M \frac{n\pi}{30}$$

Користећи предходни израз имамо:

$$\frac{P}{a} N \frac{n}{60} \Phi I_a = M \frac{n\pi}{30}$$

Из чега за обртни момент следи:

$$M = \frac{P}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi I_a = k_m \Phi I_a$$

Дакле, обртни моменат је пропорционалан са средњом вредности флукса и струјом индукта. Константна пропорционалности,  $k_m$ , зависи од конструкционих података (броја пари полова и паралелних грана, те броја проводника).

## 7. ВРСТЕ МЈС ПРЕМА НАЧИНУ ПОБУЂИВАЊА ИНДУКТОРА

Уобичајена класификација машина једносмерне струје заснива се на начину повезивања побудног намотаја. Постоје следеће врсте побуда:

- **независна побуда**, код које је намотај побуде спојен на посебан спољњи извор напона, који је потпуно независан од прилика у машини. Побудни намотај је димензионисан према том спољњем напону. Вредност побудне струје може се подешавати, независно од машине, ако у струјном колу побуде постоји променљиви отпорник. Ово је данас најчешће решење, а једносмерни побудни напон се добија из наизменичне трофазне мреже, преко исправљача.
- **оточна (паралелна) побуда**, код које је побудни намотај спојен паралелно на намотај индукта. Побудна струја креће се у границама 1 до 5% струје индукта, при чему се мања вредност односи на машине већих снага. За постизавање потребне магнетопобудне силе, пошто је струја магнетнења мала, потребно је да паралелни намотај има велики број навојака. Отпор паралелног намотаја је велик.
- **редна (серијска) побуда**, код које је побудни намотај спојен на ред са намотајем индукта. За димензионисање намотаја меродавна је струја индукта. За постизање одговарајуће магнетопобудне силе, пошто је струја велика, број навојака намотаја редне побуде не мора бити велик. Тежи се да отпор редног намотаја буде што мањи, како би пад напона на њему био што мањи.
- **сложена побуда**, где поред главног, независног или паралелног, постоји и помоћни, редни побудни намотај. Учешће поједине побуде у укупној  $m\pi c$  условљављава *спољња карактеристика машине*, тј. захтевана зависност напона на прикључцима од струје оптерећења за генератор, односно брзине обртања о развијеном моменту (за моторе). У

зависности од тога да ли су главни и помоћни побудни намотај изведени тако да им се флуksеви потпомажу или супротстављају, разликујемо адитивну, односно диференцијалну, сложену побуду.

Излазне карактеристике машине значајно зависе од врсте побуде. Код генератора, мисли се на зависност напон-струја, а код мотора на зависност момент-брзина, односно излазну механичку карактеристику.

## 8. ОСОБИНЕ ГЕНЕРАТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Савремени развој иде у правцу елиминисања електричне машине једносмерне струје као генератора, али их још увек има у употреби када се тражи линеарни напон, што се не може постићи синхроним алтернатором са диодама или мрежним исправљачем.

Параметри и вредности који дефинишу погон генератора једносмерне струје су:

$R_a$ -отпор индукта

$R_p$ -отпор побудног намотаја

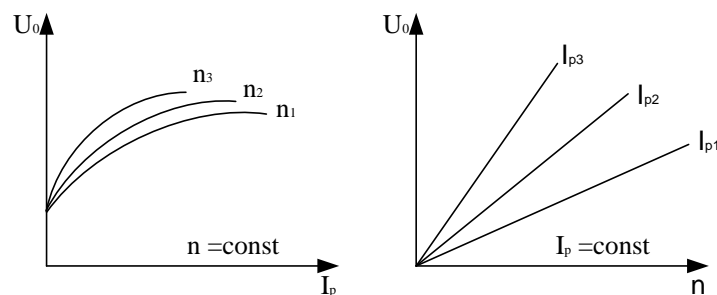
$I_p$ -струја побуде

$P_{ab} = U \cdot I$

$P_{meh}$  -снага

$\eta = \frac{U \cdot I}{P_{meh}}$  -степен искоришћења

Режим оптерећења одређен је карактеристикама између карактеристика два режима: карактеристика празног хода и карактеристика кратког споја.



Слика 8.1. Карактеристике празног хода генератора једносмерне струје

Према начину побуде генераторе једносмерне струје делимо на:

- генераторе са независном побудом и
- генераторе са сопственом побудом.

Генератори са независном побудом су генератори код којих се побудно коло напаја из независног страног извора као што је на пр. акумулаторска батерија.

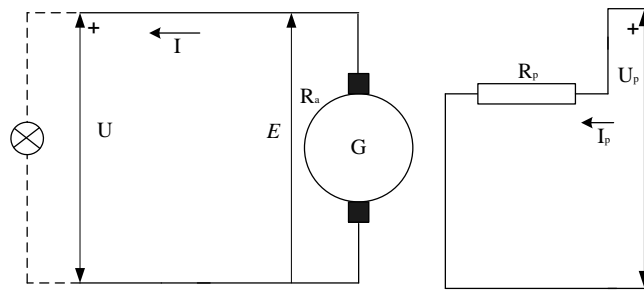
Генератори са спољном побудом су генератори код којих се побудно коло напаја непосредно из самог генератора. Ови генератори се деле на:

- генераторе са редном(серијском),
- генераторе са паралелном (оточном) и
- генераторе са сложеном(компаудном) побудом.

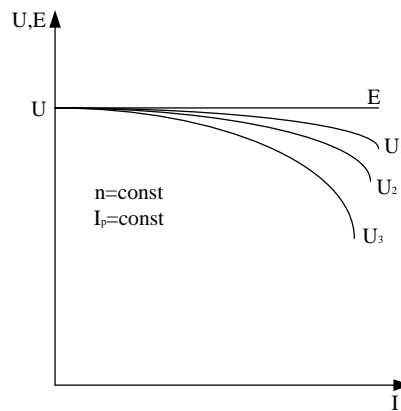
### 8. 1. ГЕНЕРАТОР СА НЕЗАВИСНОМ ПОБУДОМ

У лабораторијама за испитивање електричних машина често се употребљава генератор једносмерне струје санезависном побудом, који служи за оптерећивање испитиваних машина.

Занемарена је реакција арматуре(радног навоја, навој индукта) и пад напона на четкицама.



Слика8.1.1.Електрична шема независно побуђеног генератора



Слика8.1.2. Спољна карактеристика независно побуђеног генератора

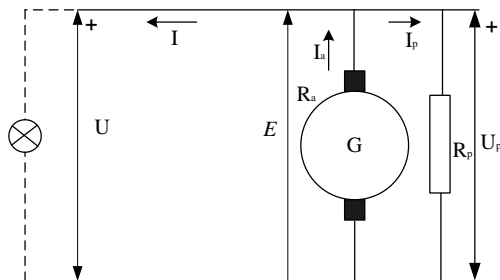
$$E = U + R_a \cdot I$$

$$U = E - R_a \cdot I$$

Спољна карактеристика је повољна, јер се напон стезалки  $U$  не мења много с променом оптерећења, па се управо због тога и користе као извори електричне енергоје.

### 8.2. ГЕНЕРАТОР СА ПАРАЛЕЛНОМ ПОБУДОМ

У подручју до називног оптерећења  $I_n$ , спољна карактеристика  $U = f(I)$  слична је оној за независно побуђени генератор па се и паралелно побуђене машине користе као генератори.

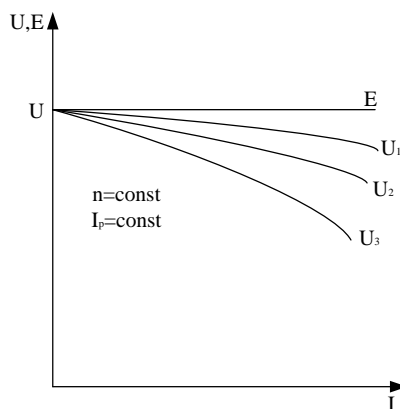


Слика8.2.1. Електрична шема, генератора са паралелном побудом

$$E = U + R_a \cdot I$$

$$I_a = I + I_p$$

$$I = I_a - I_p$$

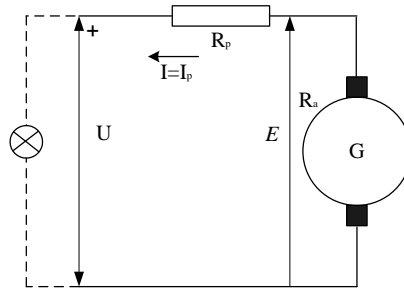


Слика8.2.2. Унутрашња и спољна карактеристика генератора са паралелном побудом

### 8.3. ГЕНЕРАТОР СА РЕДНОМ ПОБУДОМ

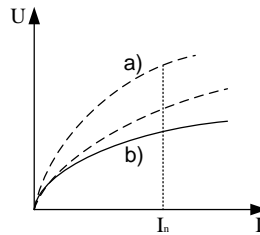
Због једнакости струја  $I = I_a = I_p$ , индукована емс  $E$  мења се са променом струје оптерећења. Промене напона на стезаљкама много зависе од промена оптерећења.

$$U = E - I(R_a + R_p)$$



Слика 8.3.1. Електрична шема, генератора са редном побудом

Код генератора са редном побудом напон постепено расте јер постепено расте и побудна струја која је једнака струји индукта. Крива а) на слици 8.3.1. представља промену напона коф нр оптерећене машине а крива б) код оптерећене машине, где се види да напон опада заједно са оптерећењем.



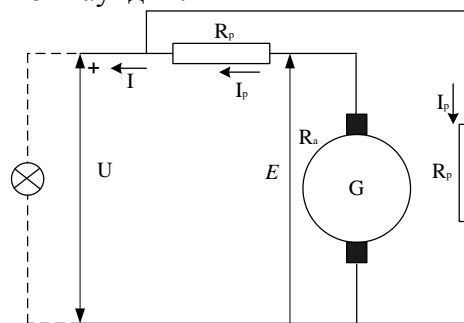
Слика 8. 3.2. Унутрашња и спољна карактеристика генератора са редном побудом

Спољна карактеристика недовољна - генератори са редном побудом се готово и не користе.

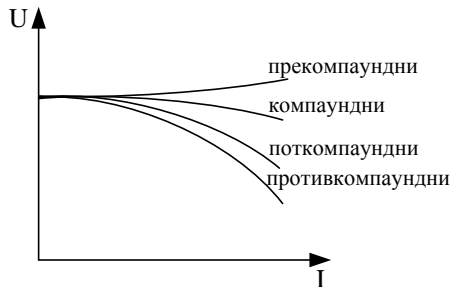
#### 8.4. ГЕНЕРАТОР СА СЛОЖЕНОМ (КОМПАУДНОМ) ПОБУДОМ

Сложени генератор је комбинација редног и паралелног генератора. Постоје следеће врсте генератора :

1. прекомпаундни,
2. компаундни,
3. поткомпаундни,
4. противкомпаундни.



Слика 8.4.1. Електрична шема компаундног генератора



Слика 8.4.2. Спољне карактеристике компаундног генератора

## 9. ОСОБИНЕ МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ

Почетак XX века је период развоја мотора једносмерне струје са истом конструкцијом као данас. У другој половини XX века мотори једносмерне струје су били доминантни у електричним погонима који захтевају регулацију брзине обртања. Основну целину мотора једносмерне струје чине:

- механички делови (кућиште, вратило, лежајеви и вентилатори),
- електрични делови (намотаји статора и ротора, колектор, четкице и прикључне стезаљке) и
- магнетни делови (јарам статора, главни и помоћни полови статора, јарам и међугвозђе).

### 9.1. МОТОР ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ СА НЕЗАВИСНОМ ПОБУДОМ

Овај тип МЈС најчешће се користи у општим и серво апликацијама свих нивоа снага. Намотај побуде напаја се из независног извора мање снаге и обично се струја побуде одржава на номиналном нивоу. Побудни намотај има много (десетине па и стотине) навојака, да би се добило јако магнетно поље при малим нивоима струје побуде.

Главни намотај (ротора) напаја се из извора једносмерног напајања веће снаге, који обично може да обезбеди струју већу од номиналне, како би се постигло што боље убрзање при старту. Код машина малих снага, струјна преоптеретивост је и до 400 %, а код врло великих снага бар 30 %.

Моментна карактеристика мотора се изводи тако што се из јед.

$$M = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi I_a = k_m \Phi I = K_m I_a$$

$M_{em} = K_m I_a$  изрази струја:

$$I_a = M_{em} / K_m$$

и уврсти у једначину:  $U_a = R_a I_a + K_m \omega_m = R_a I_a + E$

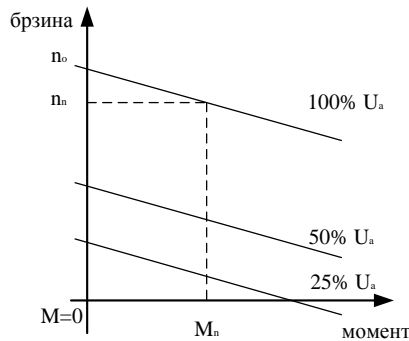
$$U_a = R_a I_a + E$$

$$\omega_m = \frac{U_a - R_a \frac{M_{em}}{K_m}}{K_m} = \frac{U_a}{K_m} - \frac{R_a}{K_m^2} M_{em}$$

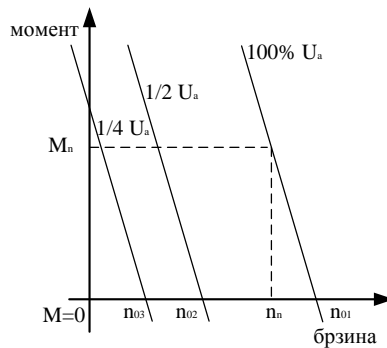
Механичке карактеристике за три вредности напона напајања приказане су на слици 9.1.1. Може се видети да се добијају релативно мале промене брзине при променама оптерећења од празног хода до номиналног момента, што се назива “тврда” механичка карактеристика. Слика 9.1.2. приказује исте карактеристике МЈС, али са замењеним координатним осама.

Са друге стране, регулацијом напона напајања може се постићи било која брзина, од сасвим малих брзина до номиналне. За регулацију напона користе се релативно једноставни и јефтине уређаји енергетске електронике (исправљачи и чопери).

Треба приметити да ће МЈС радити у номиналном режиму само ако је перфектно упарен са теретом којег погони. Ово се дешава само повремено, јер је при избору мотора неопходна одређена резерва момента (и брзине), ради убрзања и због сигурности. Ово значи да већина мотора значајан део времена ради делимично оптерећена.



Слика 9.1.1. Статичке излазне карактеристике МЈС са независном побудом



Слика 9.1.2. Статичке излазне карактеристике МЈС са независном побудом

На слици 9.1.3. приказана је принципијелна шема мотора са независном побудом, са смеровима струја у побудном и намотају индукта као и напони напајања истих намота.

Са слике имамо:

$U$  - напон напајања,

$U_p$  - побудни напон,

$E$  - индуковани напон ( $e\mu c$ ),

$I_a$  - струја индукта,

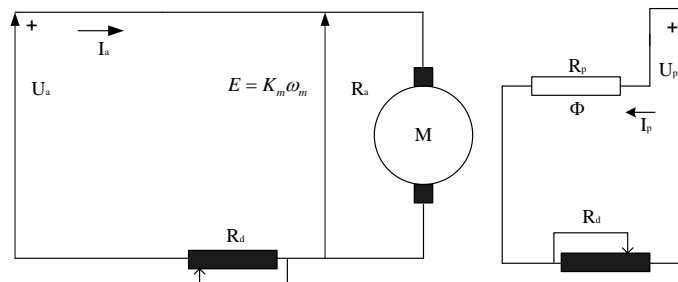
$I_p$  - струја која тече кроз побудни намотај,

$\phi$  - побуда,

$R_a$  - отпорност индукта,

$R_d$  - додатни отпор у колу ротора,

$R_p$  - отпор у колу побуде



Слика 9.1.3. Принципијелна шема мотора једносмерне струје са независном побудом

Индуковани напон  $E$ , може се израчунати на следећи начин:

$$E = K_m \cdot \omega = L_{ap} I_p \cdot \omega = \Phi \cdot \omega = \Phi \cdot \frac{2\pi n}{60} = k_e \cdot \Phi \cdot n \text{ тј.}$$

$$E = U - (R_a + R_d) \cdot I_a,$$

такође, можемо написати  $R_a + R_d = R$ , па је:

$$E = U - R \cdot I_a,$$

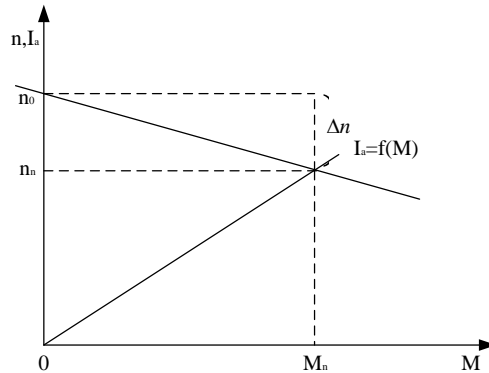
$$E = k_e n \Phi$$

Из једначине за индуковани напон имамо:

$$n = \frac{E}{k_e \cdot \phi} = \frac{U - R \cdot I_a}{k_e \cdot \phi} = \frac{U}{k_e \cdot \phi} - \frac{R \cdot I_a}{k_e \cdot \phi}.$$

Захваљујући претходним једначинама можемо приказати карактеристику брзина – момент (механичка карактеристика)  $n = f(M)$  и карактеристику струја – момент  $I_a = f(M)$ .





Слика 9.1.4. Основни дијаграм  $n = f(M)$  и  $I_a = f(M)$

На основу изнетог видимо да брзину обртаја на датом типу мотора можемо мењати променом напона напајања  $U$ , променом побуде и додавањем отпора  $R_a$  у коло ротора, о чему ћу касније бити више речи.

Што се тиче промене смера обртања ротора овог мотора довољно је променити смер струје у неком од намота (у индукту или индуктору).

## 9.2. МОТОР ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ СА РЕДНОМ ПОБУДОМ

Овај тип мотора је најчешће коришћен за ручне алате (мала снага) и у погонима електричне вуче. Намотај побуде је редно повезан са намотајом арматуре и има мањи број навојака дебље жице. Оба се напајају из једног извора ДС напајања. Повећањем оптерећења расте и струја која протиче и кроз намотај побуде, па се магнетно поље појачава, чиме се добија већи момент конверзије уз умерен пораст струје.

Статички модел мотора са редном побудом се састоји од следећих једначина:

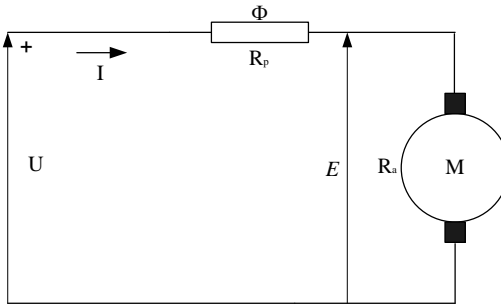
$$U_a = (R_a + R_p)I + E$$

Овај модел представља се еквивалентном шемом са слике 9.2.1. Поново, губици у магнетном колу нису обухваћени моделом па ни еквивалентном шемом.

Добра страна ових мотора је што момент расте са квадратом струје, те мотор може да развије двоструки момент са само 140% номиналне струје. Краткотрајна преоптерећења, неопходна за убрзање, су дозвољена јер се мотор за то време неће прекомерно загрејати. Због овакве моментне карактеристике, мотор развија висок момент при старту и залету, па је због тога јако погодан за коришћење у електричним возилима и електричној вучи (висок момент при залету а умерен за вожњу).

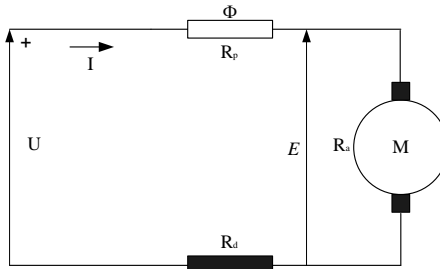
Ако се мотор са редном побудом потпуно растерети, брзина обртања ће значајно порасти, па постоји опасност од разлетања ротора услед великих центрифугалних сила. Код мањих мотора, вентилатор ће представљати неко оптерећење, а код великих мотора поставља се прекобрзинска заштита.

Регулацијом напона напајања може се постићи било која брзина од сасвим малих до номиналних. Иако је регулација брзина-напон линеарна, “мека” излазна карактеристика има за последицу комплексније управљачке системе.



Слика 9.2.1. Еквивалентна шема МЈС са редном побудом

Ови мотори се користе у погонима код којих је потребан велики полазни момент и мала брзина окретања код великих оптерећења и обратно, тј. велика брзина окретања код малих оптерећења. Због своје мекане механичке карактеристике употребљавају се у погонима вуче за транспортне уређаје и дизање терета. С тога ови мотори нису подесни за погоне који захтевају мале промене брзине с променом оптерећења.



Слика 9.2.2. Шема серијски побуђеног мотора

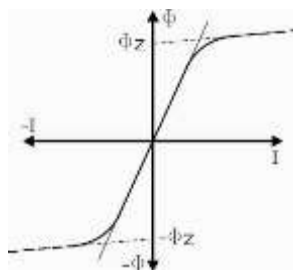
Основна једначина за брзину окретања, као код мотора са независном побудом има облик:

$$n = \frac{E}{k_e \Phi} = \frac{U - I_a R}{k_e \Phi}$$

У колу ротора поред отпора  $R_a$  који представља отпор арматуре, прелазни отпор на четкицама, отпор помоћног пола и евентуално компензацијоног намотаја, налази се и отпор побудног намотаја  $R_p$  тако да је укупан отпор мотора уз евентуални додатни отпор у колу ротора:

$$R = R_a + R_p + R_d$$

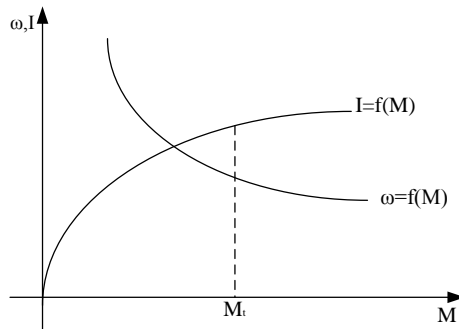
Магнетни флуks  $\Phi$  није независан већ директно зависи од арматурне струје јер је струја побуде  $I_p = I_a = I$ .



*Слика 9.2.3. Зависност флукса од струје мотора*

У подручју малих побуда (незасићен магнетни круг) је однос магнетног флукса и струје линеаран а у подручју виших побуда (засићени магнетни круг) овај однос се може приказати аналитички.

Одавде се види да је зависност брзине окретања од момента у незасићеном подручју хиперболе.

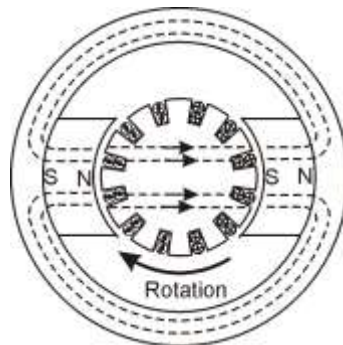


*Слика 9.2.4. Механичка карактеристика*

Са карактеристике се види да при малим оптерећењима машина узима малу струју. Смањењем оптерећења до нуле број обртаја расте тако да може доћи до нежељених механичких разарања машине. У поређењу са машинама са независном побудом, машине са редном побудом при истом струјом преоптерећењу развијају доста већи моменат.

### **9.3. МОТОР ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ СА СТАЛНИМ МАГНЕТОМ**

Побудни намотај статора може се заменити сталним магнетима, који обезбеђују магнети-сање целог магнетног кола, слика 9.3.1.



*Слика 9.3.1. Мотор са сталним магнетима*

Класични феритни и Al-Ni-Co магнети дају средњу јачину магнетног поља и већ деценијама се користе у мањим моторима. У последњих две деценије, нова технологија магнета од тзв. ретких земаља (Самаријум-Цобалт и Неодијум-Бор-Фе), омогућила је

достизање већих јачина магнетног поља и врло високе густине магнетне енергије. Ови магнети су стога мањи по запремини па је цена уградње прихватљива. Предност ових магнета је што је непожељно размагнетисавање, које се може јавити при старту и при кваровима, практично немогуће. Лоша страна примене је висока цена магнета, али због постизања јачег магнетног поља цео мотор постаје мањи (за исту снагу), што ублажава пораст цене.

Стални магнети су погодни за моторе малих снага, где је израда и уградња малих побудних намотаја компликована и релативно скупа. Модерни магнети су идеални за серво-моторе, где су неопходне високе динамичке перформансе:

- отпор и индуктивност ротора су врло мали па се омогућавају врло брзе промене струје тј. момента.

- смањене димензије ротора, поготово при специјалним конструкцијама ротора, омогућаје израду машина са изузетно малим моментом инерције, што доприноси постизању високих убрзања и успорења.

Механичке карактеристике мотора са сталним магнетиме сличне су карактеристикама мотора са независном побудом.

## **10. ГУБИЦИ СНАГЕ И СТЕПЕН ИСКОРИШЋЕЊА КОД МАШИНА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ**

Свако претварање енергије из једног облика у други везује за себе и одређене губитке. Данас су губици снаге у електричним машинама релативно мали. Према природи настајања губитака делимо их на:

- механичке губитке
- губитке у гвожђу и
- губитке у бакру.

Механички губици су **губици на трење** у лежиштима  $P_t$ :

$$P_t = k_t F_1 v_1$$

$k_t$ - сачинилац трења

$F_1$ -сила притиска у лежишту

$v_1$ - обимна брзина којом се окреће лежиште

Сачинилац трења код клизних лежишта, који се подмазује уљем, креће се у границама од 0,005 до 0,050. Његова вредност знатно опада ако се клизна лежишта, као што је случај код мотора мањих и средњих снага, замене са кугличним или ваљкастим лежиштем.

У механичке губитке спадају и **вентилациони губици**  $P_v$ , , услед трења ротора при обртању у ваздуху. Ако машина има вентилатор за хлађење онда и снага коју троши вентилатор улази у вентилационе губитке.

Следећи део механичких губитака су **губици на трење дирки о комутатор**  $P_c$ .

Према томе укупни механички губици код машина једносмерне струје су:

$$P_{mech} = P_t + P_v + P_c$$

### **Губици у гвожђу**

Губици у гвожђу називају се још и магнетни губици. Магнетни флуks кроз статор је сталан и непроменљив па губици у гвожђу статора не постоје. Пошто се ротор окрећеу непроменљивом побудном флуksу онда у ротору настају губици у гвожђу. Ови губици се деле на два дела. Први део су губици услед хистерезиса:

$$P_H = \mu f B_m^2 m_{Fe}$$

Други део чине губици услед вихорних струја који износе:

$$P_F = \sigma f^2 B_m^2 m_{Fe}$$

Према томе губици у гвожђу су:

$$P_{Fe} = (\mu f + \sigma f^2) B_m^2 m_{Fe}$$

### **Губици у бакру**

Највећи део ових губитака су губици у бакру тј. У намотајима ротора. Ако је отпор намота у ротору  $R_a$ , онда су губици у бакру ротора:

$$P_{cua} = R_a I_a^2$$

Други део губитака у бакру су губици на побуду  $P_p$ . Ако је побудни напон  $U_p$ , а побудна струја  $J$ , онда су губици на побуду:

$$P_p = U_p J$$

У губитке у бакру могу се урачунати и електрични губици на диркама :

$$P_d = U_d I_a$$

Пад напона на диркама даје произвођач дирка и креће се по дирки од 0,3V до 1V у зависности од врсте и квалитета дирка.

Укупни губици у бакру су:

$$P_{Cu} = P_{Cua} + P_p + P_d$$

### Степен искоришћења

Ако је снага коју машина третира  $P'$ , а корисна снага  $P$ , онда је степен искоришћења однос између корисне и утрошене снаге.

$$\mu = P/P'$$

Укупни губици су:

$$\sum(P_\gamma) = P_{meh} + P_{Fe} + P_{Cu}$$

Пошто се корисна и утрошена снага разликују за збир губитака, онда за степен искоришћења имамо:

$$\mu = \frac{P}{P + \sum(P_\gamma)}$$