

Магнетна кола
Мирослав Бјекић

Садржај

1.1. Основни физички закони и правила која се користе при решавању магнетних кола.....	3
1.1.1. Амперов закон у генерализаном облику	3
1.1.2. Закон о конзервацији магнетног флукса.....	3
1.1.3. Фарадејев закон.....	4
1.1.4. Ленцово правило	5
1.1.5. Лоренцова електромагнетна сила на покретно наелектрисање у електромагнетном пољу	5
1.2. Подела електричних машина.....	7
1.3. Дефиниција и подела магнетног кола.....	11
1.4. Разлика између магнетних и електричних кола.....	12
1.5. Решавање магнетних кола.....	14
1.5.1. Решавање магнетних кола формалном аналогијом са електричним колима.	15
1.5.2. Јединице.....	16
1.6. Магнетна кола побуђена једносмерном струјом	16
1.7. Магнетна кола побуђена наизменичном струјом	17
1.7.1. Губици у магнетним колима побуђени наизменичном струјом.....	19

1.1. Основни физички закони и правила која се користе при решавању магнетних кола

У овом уводном делу књиге биће само набројани основни закони електротехнике који се користе при решавању магнетних кола (МК) са најбитнијим напоменама код њиховог решавања.

1.1.1. Амперов закон у генерализаном облику

Циркулација вектора јачине магнетног поља \vec{H} по произвољној затвореној контури \vec{l} једнака је укупној струји обухваћеној путањом циркулације.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (1.1)$$

Ако се:

- изабере пут циркулације вектора магнетног поља дуж линије константне вредности интензитета вектора H ;
- вектори \vec{H} и $d\vec{l}$ колинеарни;
- интеграл $\oint \vec{J} \cdot d\vec{s}$ је једнак суми струја која протиче кроз N проводника,

може се писати да је

$$Hl = NI \quad (1.2)$$

Постављени услови важи за рачунање магнетног поља правог усамљеног проводника или за танак торус (код кога је занемарљива разлика између унутрашњег и спољашњег пречника).

1.1.2. Закон о конзервацији магнетног флукса

Магнетни флукс (флукс вектора магнетне индукције \vec{B}) кроз ма коју затворену површину је једнак нули:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1.3)$$

Или, сума свих флуксева који улазе у произвољну затворену површину једнака је суми свих флуксева који из те површине излазе. Магнетне линије сила немају ни извора ни понора.

Закон даје математички исказ принципа непрекидности линија магнетног поља које немају ни почетак ни крај. За случај анализа дводимензионалних проблема (какви се најчешће и анализирају у области електричних машина) ове линије се затварају саме у себе.

Уколико је површина s нормална на вектор магнетног поља \vec{B} које је хомогено, магнетни флукс се рачуна као:

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = B s \quad (1.4)$$

Последице примене закона на решавање магнетних кола:

- уколико не постоји расипање, магнетни флукс кроз сваку површину МК без гранања (простог МК), је константан.
- само ако је магнетно поље хомогено на целој површини s могуће је из магнетног флукса израчунати интензитет вектора магнетне индукције B .
- Ако је и материјал константе вредности магнетне пермеабилности $\mu = \text{const.}$ биће константна и јачина магнетног поља H

$$\phi = \text{const.} \xrightarrow{s=\text{const.}} B = \frac{\phi}{s} = \text{const.} \xrightarrow{\mu=\text{const.}} H = \frac{B}{\mu} = \text{const.} \quad (1.5)$$

Написане релације важе нпр. за танак торус. У већини случајева се чини већа или мања грешка усвајајући наведене претпоставке.

1.1.3. Фарадејев закон

Индукована електромоторна сила је једнака брзини промене укупног магнетног флукса

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.6)$$

1.1.4. Ленцово правило

Индукована струја у затвореној контури је таквог смера да се својим магнетним пољем супротставља промени магнетног флукса кроз контуру, тј. у контури се јавља струја која тежи да сузбије узрок свог настанка (објашњење знака – у Фарадејевом закону).

1.1.5. Лоренцова електромагнетна сила на покретно наелектрисање у електромагнетном пољу

На покретно наелектрисање у електромагнетном пољу делује електромагнетна сила.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.7)$$

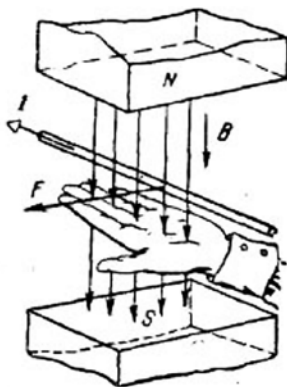
Уколико не постоји спољашње електростатичко поље, први сабирак је нула. Тако се добија израз за рачунање електромагнетне силе (Лапласов закон).

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow \vec{F} = q\left(\frac{\vec{l}}{t} \times \vec{B}\right) = \frac{q}{t}(\vec{l} \times \vec{B}) \Rightarrow \vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1.8)$$

Уколико је угао између \vec{l} и \vec{B} прав, добија се израз за рачунање интензитета силе

$$F = BIl \quad (1.9)$$

при чему се смер деловања силе одређује правилом леве руке.



Сл. 1.1: Правило леве руке за одређивање смера деловања електромагнетне силе F

Уколико се, пак, референтни систем веже за покретно наелектрисање, иста сила \vec{F} се може објаснити **само** постојањем електричног поља у коме се наелектрисано тело налази (пошто нема кретања - посматрано из покретног референтног система везаног за наелектрисање, једина сила која се може констатовати је електростатичка сила

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}_{\text{ind}} \quad (1.10)$$

Значи, кретање наелектрисања (нпр. слободних електрона у проводнику) у магнетном пољу доводи до стварања индукованог електричног поља у проводнику.

$$\vec{E}_{\text{ind}} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (1.11)$$

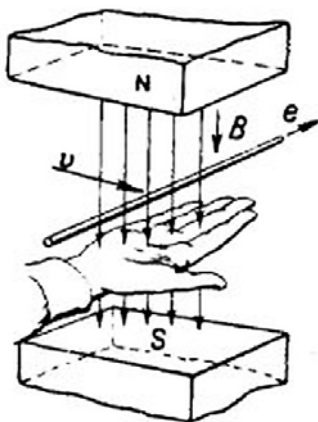
Индукована емс затворене контуре се може рачунати као

$$e = \oint_c \vec{E}_{\text{ind}} \cdot d\vec{l} = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = - \oint_c \vec{B} \cdot (\vec{v} \times d\vec{l}) = - \frac{d}{dt} \oint_c \vec{B} \cdot (d\vec{s} \times d\vec{l}) = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.12)$$

Уколико су углови између вектора \vec{B} , $d\vec{l}$ и \vec{v} управни тако да формирају триједар десне оријентације израз за рачунање индуковане емс је

$$e = B l v \quad (1.13)$$

а смер деловања емс се одређује правилом десне руке.



Сл. 1.2: Правило десне руке за одређивање смера индуковане електромоторне силе е

1.2. Подела електричних машина

Електрична машина је уређај који врши претварање електричне енергије у механичку (електрични мотори) или механичке у електричну (електрични генератори). Већина електричних машина се може наћи и у моторном и генераторско режиму рада. Али, неке машине су због својих карактеристика предодређене да се више користе као генератори (нпр. синхрони генератори) или мотори (асинхрони мотори).

Стара основна подела електричних машина је била на обртне и статичке претвараоче.

Данас, под статичким енергетским претвараочима (енергетски конвертори) се подразумевају уређаји који врше претварање електричне енергије у електричну и то:

- наизменичне у једносмерну ($\sim \rightarrow -$) - **исправљачи**,
- једносмерне у једносмерну ($- \rightarrow -$) – **чопери**,
- једносмерне у наизменичну ($- \rightarrow \sim$) - **инвертори**.

Они садрже полупроводничке претвараоче снаге и проучавају се у оквиру енергетске електронике.

Претварање наизменичне у наизменичну ($\sim \rightarrow \sim$) исте фреквенције обављају **трансформатори** који се и даље проучавају у области електричних машина – јер је принцип рада заснован на електромагнетској спреси његових навоја.

Постоји више подела електричних машина:

1. **Према току енергије:** електрични генератори и електрични мотори
2. **Према извору напајања:** једносмерне и наизменичне
3. **Према снази:** енергетске и машине малих снага – чија снага не прелази 1 kW (специјалне електричне машине). Мотори чија је снага мања од 50 W се називају микромотори. Док се код енергетских електричних мотора посебна пажња посвећује степену искоришћења, код малих мотора је најважнија тачност (позиционирања, брзине), динамика (нпр. брз одзив), стабилност рада... Специјални мотори се деле у зависности од тога да ли преносе снагу (сервомотори), информацију (мерачи угла/позиције,

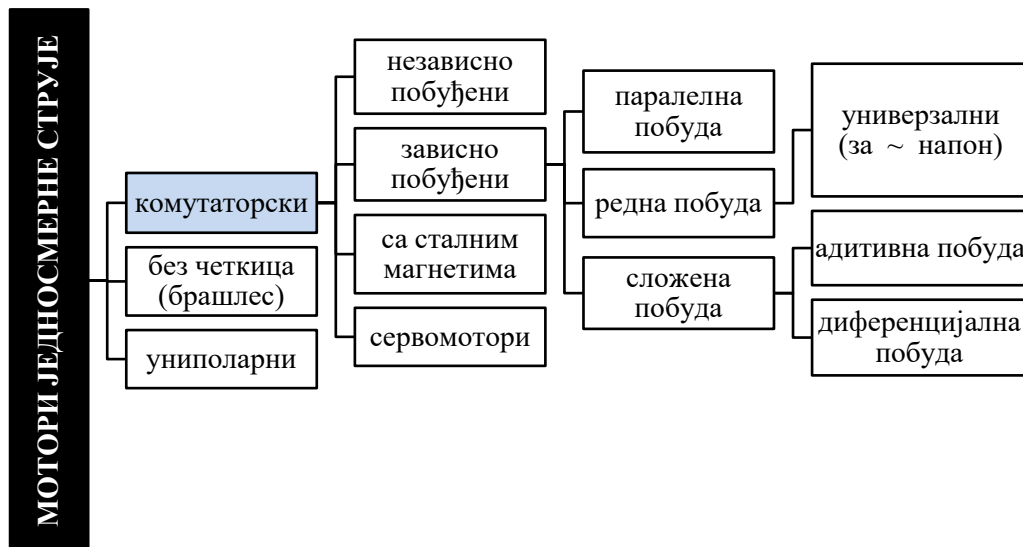
тахогенератори), жирокопски (претварачи момента) и конвертори (напонски конвертори, појачавачи снаге).

4. Према намени

У овој књизи биће обрађивани само енергетске електричне машине и то машине једносмерне струје и асинхроне машине. Област синхроних машина није обухваћена овом књигом.



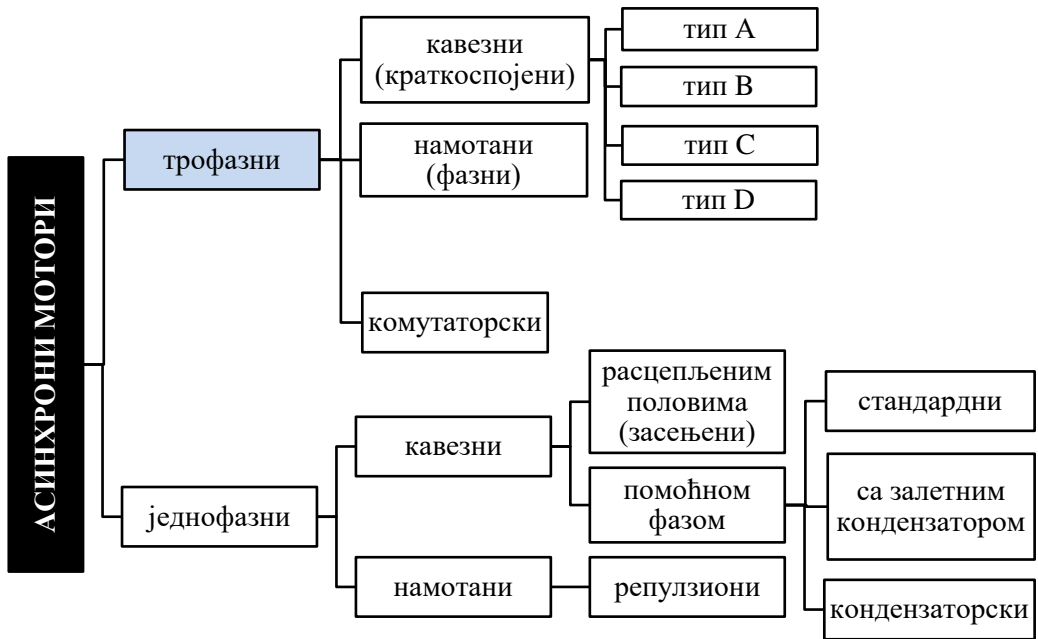
Сл. 1.3.: Подела електричних мотора



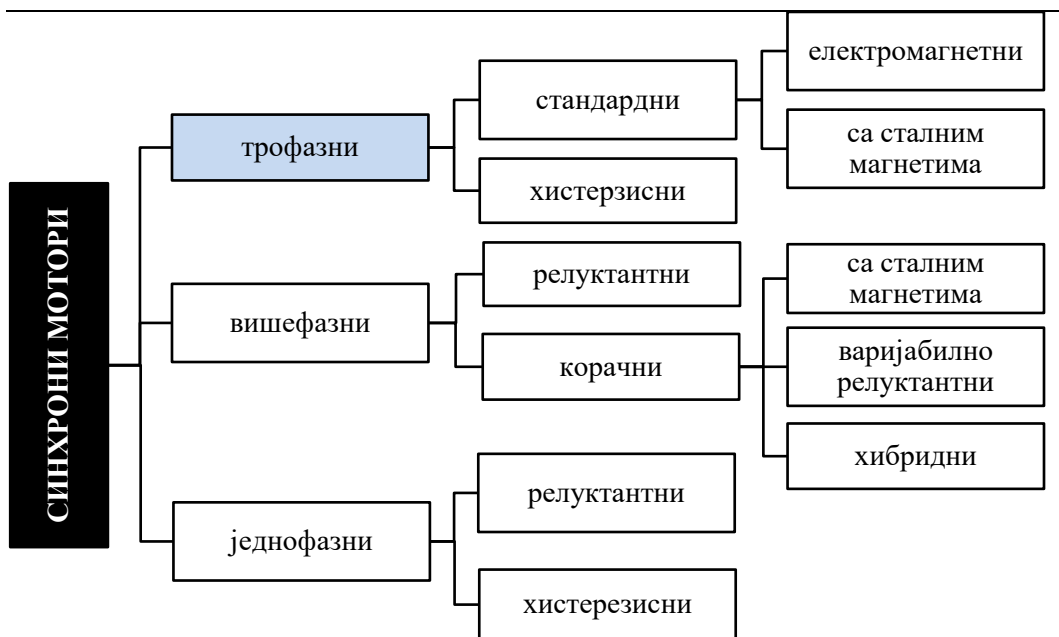
Сл. 1.4: Подела мотора једносмерне струје



Сл. 1.5: Подела мотора наизменичне струје



Сл. 1.6: Подела асинхроних мотора



Сл. 1.7: Подела синхроних мотора

Битно је напоменути да ову поделу треба условно прихватити. Један тип мотора по својој конструкцији припада једној врсти, док нпр. по начину прикључења другој. Тако да универзални мотор по конструкцији је мотор једносмерне струје са редном побудом, док се прикључује на једнофазни наизменични напон. Или у групу сервомотора спадају и корачни мотори који припадају групи мотора синхроног типа...

1.3. Дефиниција и подела магнетног кола

Систем у коме је магнетни флуks скоро у потпуности каналисан феромагнетним материјалом (слично као што је електрична струја „каналисана“ електричним проводницима) се назива магнетно коло.

Магнетни флуks ϕ [Wb] се дефинише као површински интеграл вектора магнетне индукције \vec{B} [T] кроз површину s [m²].

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.1)$$

Уколико је магнетно поље кроз површину s хомогено магнетни флуks се рачуна као $\phi = B s$. Иако је магнетни флуks скаларна величина (добijена скаларним производом два вектора) често се третира као вектор. Вектор флуksа се добија тако што се скалару магнетног флуksа придружи правац и смер орта нормале на површину s , који се одређује правилом десног завртња.

Треба правити разлику између магнетног флуksа у попречном пресеку МК (ϕ) и магнетног флуksа који ствара N побудног навојака ($\Psi = N \phi$).

За разлику од електричних кола, МК могу бити „прекинута“. Да би се ротор електричне машине обртао неопходан је мали ваздушни простор између МК статора и ротора. Овај ваздушни простор се назива ваздушни зазор или међугвожђе.

Феромагнетни материјали су материјали са великим вредностима магнетне проводљивости - пермеабилности μ . Њихова улога је да што боље и са што мање расипања каналишу магнетни флуks. Магнетни флуks може бити последица протицања струје кроз побудне навоје или постојања сталних магнета у МК.

Магнетна кола се могу поделити на више начина:

1. на проста и сложена: у зависности да ли у магнетном колу постоји или не постоји гранање магнетног флуksа;
2. побуђена једносмерном струјом, наизменичном струјом или сталним магнетнима;
3. састављено од једног или више магнетних материјала;

-
4. линеарна и нелинеарна: у зависности да ли је магнетна пермеабилност константна или није.

1.4. Разлика између магнетних и електричних кола

Између магнетних и електричних кола постоје следеће разлике:

1. Код магнетних кола нема струјања (протицања).

Код електричних кола долази до протицања електричне струје кроз проводнике. За МК се каже да се успоставља магнетни флуks. Из тог разлога не постоје ни губици услед протицања па није ни потребно улагати енергију да би се обезбедио магнетни флуks у МК. Пример су стални магнети који побуђују МК. А сами нити стварају енергију нити је троше.

2. Разлика између магнетних проводника и магнетних изолатора је много мања него код електричних кола.

Код електричних кола однос електричне проводности проводник-изолатор је 10^{18} - 10^{24} (не узимајући у обзир суперпроводнике). Код МК овај однос је 10^2 - 10^4 .

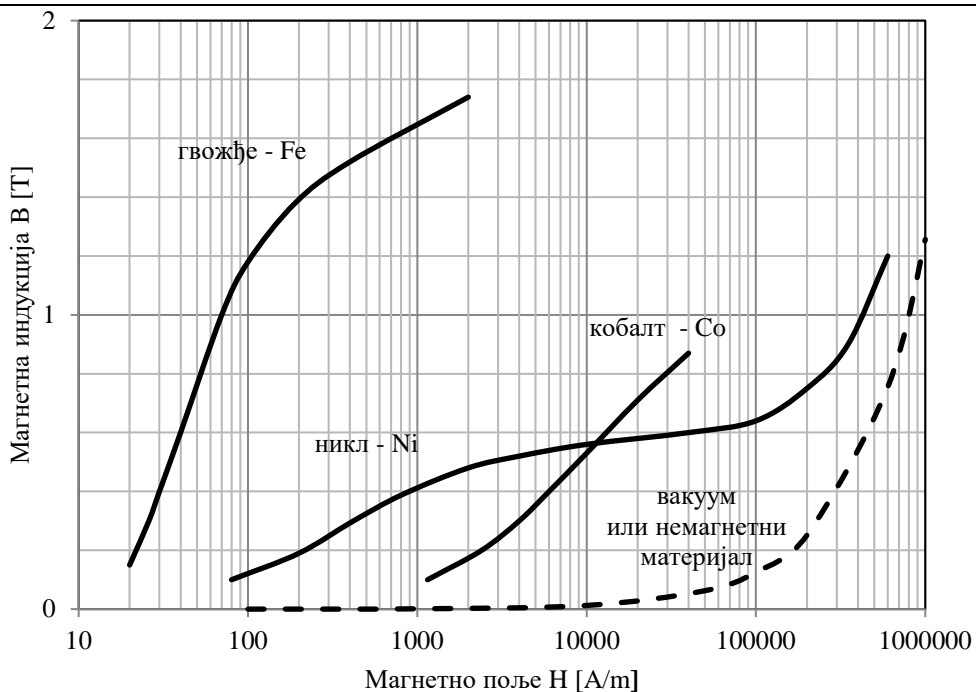
Закључак је: **не постоје магнетни изолатори**

Последице:

- појава магнетног расипања. Укупан магнетни флуks се не каналише феромагнетним материјалом. Долази до појаве расутог магнетног флуksа. Из тог разлога у дефиницији МК стоји неодређеност „скоро у потпуности“.
- постојање међугвожђа (ваздушног зазора)

3. Магнетно коло је најчешће нелинеарно $\mu \neq \text{const}$.

Потребно је знати функционалну зависност $B = f(H)$. Ова зависност се најчешће представља графички и назива крива магнећења. На следећој слици дат је график неколико феромагнетних материјала.



Сл. 2.1: Криве магнећења феромагнетних елемената

Са горње слике се може приметити следеће:

- При повећању јачине магнетног поља долази до засићења. То значи да се линеарним повећавањем магнетног поља не обезбеђује линеарно повећавање магнетне индукције. Због тога је H оса дата у логаритамској размери, да би се боље уочиле међусобне зависности B и H .
- На графику је, ради поређења, дата и карактеристика магнетне пермеабилности ваздуха или немагнетног материјала. Треба запазити да се криве магнећења, при енормним вредностима магнетног поља приближавају облику ове криве. Значи, материјал при великим вредностима магнетне пермеабилности губи феромагнетне особине.

Последица нелинеарности МК је чињеница да је решавање и најједноставнијих нелинеарних МК далеко теже од решавања електричних кола. Треба само замислити проблем решавања електричног кола састављеног од напонског извора и отпорника

код кога се отпорност мења у зависности од јачине струје која кроз њега протиче.

4. Крива магнећења магнетног кола је неједнозначна

Неједнозначност магнетне карактеристике значи да неће увек за једну вредности магнетног поља бити једнозначна вредност магнетне индукције. Вредност магнетне индукције зависи и од претходног намагнетисања магнетног материјала. Ова појава је позната као магнетни хистерезис. Тиме се још знатно компликује поступак решавања МК. Треба замислити електрично коло из претходног примера у коме електрична отпорност зависи од јачине струје, али и од тога колика је струја пре тога протицала кроз отпорник.

5. Магнетна кола не задовољавају услов квазилинеичности

При решавању електричних кола облик и дужина проводника се најчешће не узимају у обзир. Разлог је тај што се отпорност проводника занемарује и што је сва струја каналисана проводницима. Код МК где је разлика између магнетног проводника и изолатора реда 10^{-4} , не сме се занемарити димензија и облик МК, јер величина магнетног расипања јако зависи од саме његове геометрије.

Све наведене разлике оправдавају потребу да се посебна пажња посвети поступцима решавања МК.

1.5. Решавање магнетних кола

Поступци решавања МК:

- Решавање МК формалном аналогијом магнетних и електричних кола
- Коришћење приближних метода за решавање
- Коришћењем методе коначних елемената – за дводимензионална и коначних запремина – за тродимензионална магнетна поља.

1.5.1. Решавање магнетних кола формалном аналогијом са електричним колима.

Као што је већ објашњено, разлике између електричних и МК су значајне. Да би се применила формална аналогија између магнетних и електричних кола, потребно је занемарити све наведене разлике: (нелинеарност, хистерезис, квазилинеичност)

Облик МК који најбоље задовољава постављене услове решавања формалном аналогијом је танак торус. Применом Амперовог закона и зависности између магнетног поља, магнетне индукције и магнетног флука добија се

$$Hl = NI \Rightarrow H = \frac{NI}{l} \Rightarrow B = \mu \frac{NI}{l} \Rightarrow \phi = \mu \frac{NI}{l} s = \frac{NI}{\frac{l}{\mu s}} \Rightarrow \phi = \frac{F}{\theta} \quad (2.2)$$

при чему се последњи израз назива **Кап-Хопкинсонов** закон или Омов закон за МК.

Укупни магнетни флука побудног навоја износи:

$$\psi = N \phi \quad (2.3)$$

А индуктивност се рачуна као:

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N \frac{F}{\theta}}{I} = \frac{N \frac{NI}{\theta}}{I} = N^2 \frac{1}{\theta} = N^2 \Lambda \quad (2.4)$$

Акумулисана енергија се може рачунати по једном од следећих образаца:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \Lambda F^2 = \frac{1}{2} \theta \phi^2 = \frac{1}{2} F \theta \quad (2.5)$$

Поредећи изразе $\phi = F / \theta$ и $I = U / R$ може се утврдити следећа аналогија

Електрични напон U [V] \rightarrow Магнетопобудна сила $F(M)$ [Anav]

Електрична струја I [A] \rightarrow Магнетрни флука ϕ [Wb]

Густина ел. струје J [A/m^2]	→	Магнетна индукција B [Т]
Електрична отпорност R [Ω]	→	Магнетрни отпорност θ [1/Н]
Електрична проводност G [S]	→	Магнетрни проводност Λ [Н]
Спец. ел. проводност σ [S/m]	→	Спец. магн. проводност μ [Н/м]

За магнетну индукцију се у стројој литератури често користи израз „густина магнетног флукса“.

Први и други Киркохов закон примењен на електрична кола одговара закону одржања магнетног флукса и Амперовом закону за магнетна кола.

1.5.2. Јединице

У међународном SI систему јединица, дефинисане су ознаке јединица за магнетно поље [A/m] и за магнетну индукцију [Т].

У америчкој литератури се уместо ових јединица користе јединице G – гаус, и Oe – ерстед: $1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$; $1\text{ Oe} = 10^3/4\pi\text{ A/m} \sim 80\text{ A/m}$

$$\frac{\text{G}}{\text{Oe}} = \frac{10^{-4}}{\frac{10^3}{4\pi}} = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ H/m} \quad (2.6)$$

Из написаних израза се примећује да је количник $G/\text{Oe} = \mu_0\text{ H/m}$, тако да њиховим дељењем се директно добија релативна вредност магнетне пермеабилности.

1.6. Магнетна кола побуђена једносмерном струјом

У магнетним колима побуђеним једносмерном струјом, извором напајања је одређена магнетнопобудна сила $F = NI$. У зависности од укупног магнетног отпора, применом Кап-Хопкинсконовог закона, одређује се вредност магнетног флукса и индукције.

Губици који се јављају у овим колима су Џулови губици у побудним намотајима.

Повећавањем дужине међугвожђа, повећава се магнетна отпорност магнетног кола и смањује вредност магнетног флукса. Индуктивност побудног навоја се смањује као и акумулисана електромагнетна енергија.

У МК побуђеном једносмерном струјом, јачином једносмерне струје је одређена укупна магнетопобудна сила. Колики ће бити пад магнетног напона и магнетна индукција на појединим деловима МК, зависи од њихове магнетне отпорности.

Корисно је запамтити: за магнетну индукцију од 1 Т у ваздушном зазору дужине 1 mm, потребно је обезбедити магнетопобудну силу приближно вредности 800 Анав.

1.7. Магнетна кола побуђена наизменичном струјом

Треба посматрати магнетно коло:

- У облику **танког** феромагнетног торуса (да би се могло претпоставити да је магнетно поље у свакој тачки његовог попречног пресека исте амплитуде)
- **константне** магнетне пермеабилности (тј. линеарно магнетно коло да би све посматране величине биле простопериодичне)
- **густо и равномерно** намотан са N навоја (да би се елиминисало магнетно расипање)
- **занемарљиве** електричне отпорности (да би се занемарио пад напона Ri .)

Магнетно коло је прикључено на извор наизменичног простопериодичног напона u .

Прикључном напону, по другом Киркоховом закону, држи равнотежу само индукована емс једнака брзини промене магнетног флукса у магнетном колу:

$$u = U_m \cos \omega t = \frac{d\psi}{dt} \quad (2.7)$$

Из горње једначине се може изразити укупни магнетни флукс побудног намотаја, а затим израчунати све остале физичке величине (магнетни флукс у попречном пресеку МК, магнетна индукција, магнетно поље и јачина побудне струје):

$$\psi = \int u \, dt + C = \int U_m \cos \omega t \, dt = \frac{U_m}{\omega} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad \psi_m = \frac{U_m}{\omega} \quad (2.8)$$

$$\phi = \frac{\psi}{N} = \frac{U_m}{\omega N} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad \phi_m = \frac{U_m}{\omega N} \quad (2.9)$$

$$B_{Fe} = \frac{\phi}{s_{Fe}} = \frac{U_m}{\omega N s_{Fe}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad B_{Fem} = \frac{U_m}{\omega N s_{Fe}} \quad (2.10)$$

$$H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} = \frac{U_m}{\omega N s_{Fe} \mu_{Fe}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad H_{Fem} = \frac{U_m}{\omega N s_{Fe} \mu_{Fe}} \quad (2.11)$$

$$i = \frac{H_{Fe} l_{Fe}}{N} = \frac{U_m}{\omega N^2 \mu_{Fe} \frac{s_{Fe}}{l_{Fe}}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad I_m = \frac{U_m}{\omega N^2 \mu_{Fe} \frac{s_{Fe}}{l_{Fe}}} \quad (2.12)$$

Добијена једначина је могла бити написана преко Омовог закона, рачунајући индуктивност и реактивну отпорност побудног навоја:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}, \quad X_L = \omega L, \quad L = N^2 \Lambda, \quad \Lambda = \mu_{Fe} \frac{s_{Fe}}{l_{Fe}} \quad (2.13)$$

Из написаних једначина се може запазити да су физичке величине ϕ, B_{Fe}, H_{Fe}, i такође простопериодичне али да фазно касне за $\frac{\pi}{2}$ у односу на прикључни напон u .

Из једначине 2.22 се може изразити ефективна вредност напона у зависности од максималне вредности магнетне индукције, броја навоја, попречног пресека и фреквенције:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega B_{Fem} N s_{Fe}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f B_{Fem} N s_{Fe}}{\sqrt{2}} \Rightarrow U = \sqrt{2} \pi f B_{Fem} N s_{Fe} \quad (2.14)$$

Значи, у магнетном колу побуђеном наизменичном струјом, амплитуда прикључног напона одређује вредност магнетне индукције у колу док јачина струје зависи од укупног магнетног отпора у колу.

Корисно је запамтити: за магнетно коло у коме је успостављена магнетна индукција од 1 Т, за сваки волт прикључног наизменичног напона, фреквенције 50 Нз потребно је намотати навојака толико да је производ $N S_{Fe} [cm^2] \approx 50$ (нпр. за попречни пресек $5 cm^2$ потребно је намотати 10 навојака по једном волту прикључног напона да би се постигла магнетна индукција од 1 Т).

Често се у литератури уместо чиниоца $\sqrt{2\pi}$ пише приближна нумеричка вредности 4,44. Из последње једначине се може закључити да за конкретно магнетно коло непроменљивог попречног пресека, броја навоја и фреквенције прикључног напона постоји линеарна зависност између ефективне вредности прикључног напона и остварене вредности магнетне индукције.

$$U = K B_{Fem} \quad (2.15)$$

Могло би се претпоставити да се са повећањем прикључног напона може добити било која жељена вредност магнетне индукције. Знајући да је максимална вредности магнетне индукција реда 1-2 Т, треба објаснити зашто се линеарним повећањем прикључног напона не може добити линеарно повећање вредности магнетне индукције. Проблем је у томе што је феромагнетно магнетно коло **нелинеарно** и што у описаном случају долази у засићење. Може се исто магнетно коло прикључити на виши напон од пројектованог. Али би се тиме побудна струја несразмерно повећала у односу на пројектовану.

1.7.1. Губици у магнетним колима побуђени наизменичном струјом.

У магнетним колима побуђеним наизменичном струјом, поред губитака услед Цуловог ефекта, постоје и губици, проузроковани простопериодичном променом магнетног флуksа у феромагнетном делу магнетног кола (губици у гвожђу).

Јављају се две врсте ових губитака:

- Губици услед вихорних струја
- Губици услед хистерезиса.

Губици услед вихорних струја су поседица чињенице да је феромагнетно коло и електропроводно. У њему се индукују емс које проузрокују протичање вихорних струја. Ове струје загревају феромагнетни материјал и стварају губитке.

Ови губици се рачунају као:

$$P_{vs} = \sigma f^2 B_{Fem}^2 M_{Fe} \quad (2.16)$$

Треба запазити да су ови губици сразмерни са квадратом фреквенције f , квадратом магнетне индукције B_{Fem} а линеарно су сразмерни са укупном масом феромагнетног дела магнетног кола M_{Fe} .

Да би се смањили ови губици, уместо пуног феромагнетног материјала користе се танки, међусобно изоловани лимови дебљина 0,35 и 0,5 mm.

Губици услед хистерезиса се јављају као последица неједнозначности криве магнећења. Сразмерни су са површином хистерезисне петље која се формира на графику $B_{Fe}=f(H_{Fe})$, и рачунају се као:

$$P_h = \eta f B_{Fem}^2 M_{Fe} \quad (2.17)$$

Ови губици се могу смањити додавањем силицијума у феромагнетни материјал. Али тиме он постаје кртији, па се ово решење примењује за непокретна магнетна кола (нпр. трансформаторе), док се код обртних електричних машина не сме дозволити да обртни делови буду крти, јер су подложни центрифугалним силама.

У литератури се могу наћи табеле које за одређене материјале, њихове дебљине и одређене вредности магнетне индукције дају вредности губитака по килограму МК.

Таб. 1.1 Специфични губици неких феромагнетних материјала

материјал	дебљина [mm]	губици [W/kgA]	
		$B=1$ T	$B=1,5$ T
MT93	0,35	0,93	2,4
MT100	0,35	1	2,6
MT110	0,35	1,1	2,8