

## 6. Bobine

Cuprinsul capitolului:

- Proprietate esențială, model analitic simplificat, unitate de măsură, simbol
- Circuit echivalent, bobina în regim permanent sinusoidal
- Mărimi caracteristice
- Marcare
- Tehnologii de fabricație
- Relee electromagnetice
- Transformatoare

### 6.1 Model analitic

Caracteristica esențială a bobinei este inductivitatea (sau inductanța) electrică (bobina este fabricată special pentru această proprietate). Scopul în care sînt folosite bobinele poate fi:

- acumularea de energie (în circuitele de putere, pentru transformatoare sau pentru netezirea curentului în sarcină);
- crearea în circuit a unei comportări dependente de frecvență (filtre în circuite de putere, filtre de semnal, circuite de defazare, separare frecvențe joase de cele înalte, bobine de șoc etc.).

Constructiv, bobina este compusă dintr-un conductor înfășurat.

Poate fi înfășurat pe suport sau fără suport (fără carcasă, bobinare “pe aer”).

Poate avea miez magnetic sau să nu aibă miez (îndeosebi la frecvențe înalte).

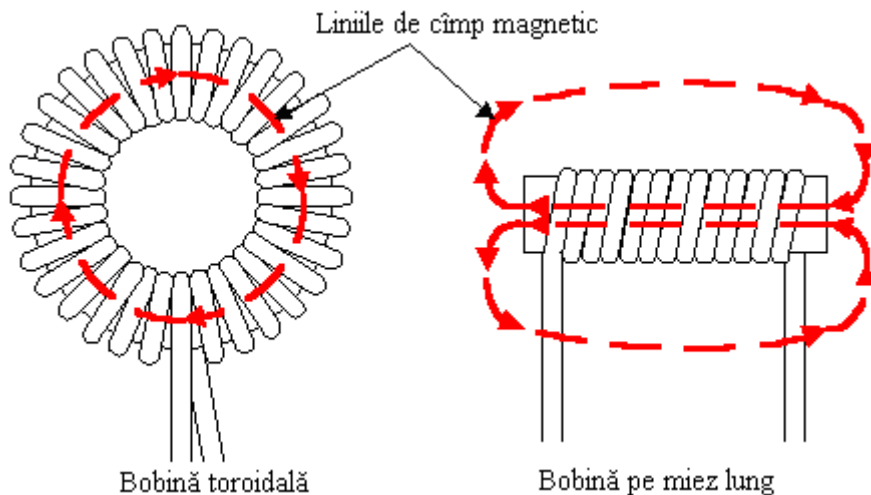


Figura 6.1: Dispunerea liniilor de câmp în bobine de forme simple

În tabelul de mai jos sînt date valorile aproximative ale intensității câmpului magnetic, inductanței, inducției magnetice și fluxului magnetic, pentru cele două cazuri de bobine din figura 6.1. S-a neglijat comportarea neliniară a miezului. Pentru bobina lungă (figura 6.1b),  $l$  este lungimea miezului (mult mai mare decît diametrul). Pentru bobina toroidală (figura 6.1a), lungimea medie a liniei de câmp ( $l_{med}$ ) este cea a cercului cu diametrul mediu, din cuprinsul miezului (se neglijează liniile de câmp care se închid prin aer).

	Toroidală	Lungă
Intensitatea câmpului magnetic	$H(t) = \frac{N \cdot i(t)}{l_{med}}$	$H(t) = \frac{N \cdot i(t)}{l}$
Inductanța	$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l_{med}}$	$L = 4\pi \cdot \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$
Inducția magnetică	$B(t) = \mu H(t)$	
Fluxul magnetic	$\Phi(t) = L \cdot i(t)$	
Permeabilitatea magnetică	$\mu = \mu_r \mu_0, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$	

Modelul analitic al funcționării bobinei în circuit (considerăm bobină fără pierderi) este:

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt},$$

mărimile fiind cele din figura 6.2.

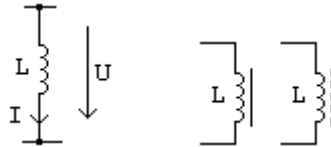


Figura 6.2: Simbolul bobinei și mărimile măsurabile la borne (fără miez, miez feromagnetic, miez ferimagnetic)

(În acest model au fost neglijate elementele reactive și disipative parazite și caracterul neliniar.)

Unitatea de măsură este 1 henry (1H), care reprezintă – prin definiție – inductanța unui circuit format dintr-o spiră care, fiind străbătut de un curent continuu de 1A, produce un flux magnetic propriu de 1Wb. (Echivalent cu definiția de mai sus: inductanța unui circuit în care viteza de variație a curentului este 1A/s, dacă tensiunea aplicată este de 1V.)

Timbul intervine în mod explicit în model, ca expresie a fenomenului de acumulare de energie. Ca și condensatorul, bobina are caracter reactiv.

Ecuția modelului analitic este o ecuație diferențială ordinară, liniară, de ordinul I. Pentru a anticipa forma curentului, nu este suficientă soluția generală a ecuației (care este o familie de funcții), ci este necesară soluția problemei Cauchy.

Problema Cauchy:

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(0) = \text{cunoscută},$$

unde  $t = 0$  este un moment arbitrar, în care cunoaștem valoarea curentului prin bobină.

Soluția:

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau + i(0).$$

Ecuția de mai sus arată că putem determina curentul (funcție de timp), dacă cunoaștem modul de variație al tensiunii și valoarea inițială a curentului. În sens invers, putem determina tensiunea (funcție de timp), dacă cunoaștem modul de variație a curentului (fără valoarea inițială). În analiza circuitelor, cel mai adesea nu cunoaștem aceste mărimi, ci mărimile de la intrările circuitului, ceea ce face ca ecuația diferențială care

modelează funcționarea întregului circuit să conțină mai multe variabile și mai mulți parametri (se va trata în partea afectată circuitelor).

În cazurile simple, când bobina (fără energie) este cuplată la o sursă de tensiune constantă, curentul variază liniar (ca în figura 6.3). Panta curbei din figură este:  $\frac{di}{dt} = \frac{E}{L}$

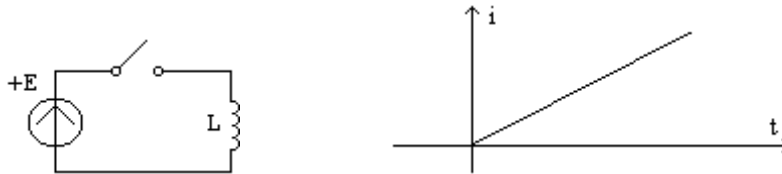


Figura 6.3: Creșterea curentului prin bobina ideală, sursa este tot ideală

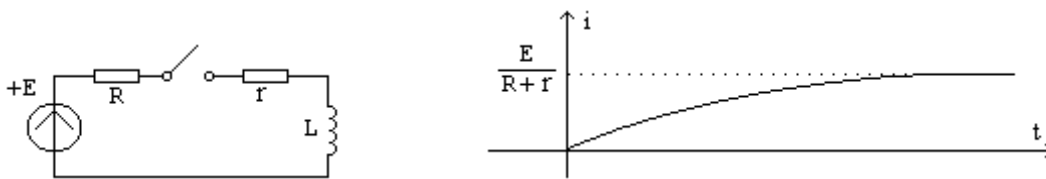


Figura 6.4: Creșterea curentului prin bobina reală

Dacă neglijăm rezistența internă a sursei și rezistența bobinei, curentul ar crește nemărginit. Dar sursa de tensiune nu poate livra un curent mai mare decât o valoare maximă, deci va ieși din funcționarea normală când atinge acest curent. În realitate, rareori se ajunge la situația în care sursa de tensiune ajunge la curentul maxim, deoarece intervine o altă limitare. Modelul trebuie completat cu rezistența internă a sursei și cu rezistența bobinei. Cele două rezistențe limitează curentul, așa cum este prezentat în figura 6.4. O descriere analitică a variației curentului și tensiunii în regimul tranzitoriu se va face în subcapitolul 8.2.

**N.B.** Curentul prin bobină nu variază brusc (cu discontinuități), deoarece este integrala tensiunii la borne (care are discontinuități cel mult de speța I).

**N.B.** Tentativa de întrerupere a curentului prin bobină produce descărcare violentă de energie (datorită tensiunii de autoinducție)!

## 6.2 Inductanța în regim sinusoidal permanent

Dacă  $i(t)$  este semnal sinusoidal, în regim permanent:  $i(t) = I \cdot \sin(\omega t)$ . Presupunem că bobina se comportă liniar și este caracterizată numai prin inductanța  $L$ .

Atunci tensiunea este:  $u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot I \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = L \cdot I \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \pi/2)$ .

Cele două mărimi sînt de aceeași formă, dar tensiunea este defazată înaintea curentului cu un sfert de perioadă (echivalent: curentul este în urma tensiunii). Defazaajul este opus față de condensator, unde tensiunea este în urma curentului. În figura 6.5, semnalul sinusoidal are perioada 1,25 ms (frecvența 800 Hz).

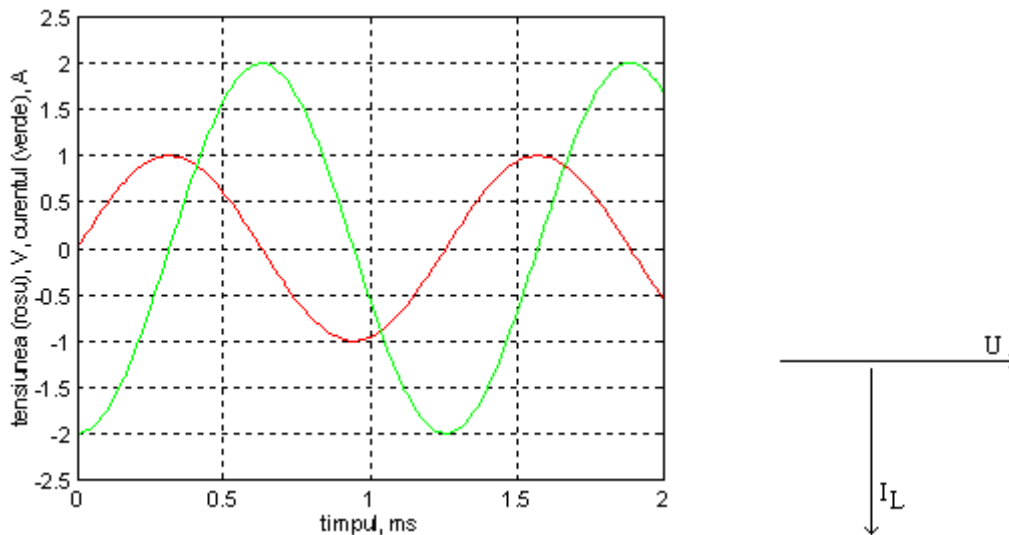


Figura 6.5: Forma tensiunii și a curentului prin bobina ideală, regim sinusoidal permanent

Modulul impedanței, ca raport între amplitudinile tensiunii și curentului:

$$|Z| = \frac{L \cdot I \cdot \omega}{I} = \omega L .$$

Reactanța inductivă (reprezentarea în numere complexe):  $Z = j\omega L$  .

Bobina înmagazinează energie:

$$W(t) = \frac{L \cdot i^2(t)}{2} \text{ (demonstrație asemănătoare cu cea de la condensator).}$$

### 6.3 Circuit echivalent al bobinei reale

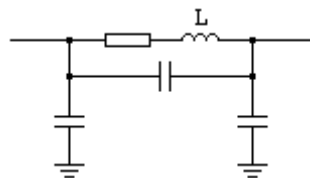


Figura 6.6: Un circuit echivalent al bobinei reale

În figura 6.6 este prezentat un circuit echivalent al bobinei reale. Bobina ideală nu disipă energie. Bobina reală presupune și comportarea disipativă, prin următoarele fenomene:

- disipație în conductorul bobinei
- disipație prin remagnetizare, la miezuri feromagnetice și ferimagnetice (proporțională cu aria ciclului de histerezis și cu frecvența)
- disipație prin curenți turbionari, induși în materialele conductoare din apropiere (cel mai adesea, în miezul metalic).

Efect semnificativ asupra inductanței: numai miezul feromagnetic, ferimagnetic.

Efect semnificativ asupra pierderilor prin curenți turbionari: orice miez metalic, conductor, plus metalul înconjurător, depinde de frecvență și de rezistivitate.

Efect semnificativ asupra pierderilor prin remagnetizare: miez fero- sau ferimagnetic, cu ciclu de histerezis lat.

Efect semnificativ asupra pierderilor prin conducție: rezistivitatea conductorului și efectul pelicular (depinde de frecvență).



Figura 6.7: Secțiune transversală prin conductor, aria zonei în care se găsește câmp

Efectul pelicular constă în concentrarea fluxului de energie la suprafața conductorului, cu atât mai puțin adânc cu cât frecvența este mai mare. În figura 6.7 apare un desen aproximativ al secțiunii prin conductor, în care este hașurată aria prin care circulă curentul. O explicație intuitivă: pătrunderea câmpului electromagnetic în adâncimea conductorului necesită timp tranzitoriu. La frecvențe mari, perioada oscilațiilor este foarte mică, insuficientă pentru a permite propagarea în adâncime, înainte de a apărea alternanța următoare (inversarea sensului câmpului). Ca urmare, aria secțiunii prin care conductorul transportă energie este din ce în ce mai mică, pe măsură ce frecvența crește.

Măsuri tehnologice la fabricarea bobinelor, care vor funcționa la frecvențe mari:

- Bobinele care lucrează la frecvențe zeci de MHz se confecționează din conductor cu multe fire subțiri (“liță de radiofrecvență”), pentru ca suprafața conductoarelor să fie mare, în volum mic (pierderi mici).
- Bobinele care funcționează la frecvențe de sute de MHz, se confecționează din conductor argintat, deoarece argintul este un conductor foarte bun, iar adâncimea de pătrundere la frecvențe mari este comparabilă cu grosimea stratului de argint. Similar, terminalele condensatoarelor de decuplare la frecvențe mari se argintează.
- La frecvențe de ordinul GHz, se folosesc ghiduri de undă, ale căror suprafețe interioare se argintează.
- Miezul din oțel se fragmentează în tole (valabil la frecvențe mici, pentru că miezul din oțel nu se folosește la frecvențe mai mari de câțiva kHz).

Așa cum a fost descris mai sus, efectele disipative se produc prin mai multe fenomene. Dintre ele, remagnetizarea din miezul feromagnetic sau ferimagnetic este producătoare de neliniaritate, deoarece prezintă atât efectul de saturare cât și histerezis magnetic. Dimpotrivă, disipația în conductorul bobinei și în conductoarele alăturate nu induce o comportare neliniară vizibilă (chiar dacă disipația prin curenți turbionari depinde de frecvență, ea are pondere mică, la frecvențele uzuale). Se mai poate aproxima ca fiind liniară funcționarea bobinelor cu miez, dacă miezul are caracteristică îngustă (“ferită moale”) iar intensitatea câmpului este foarte mică, în comparație cu intensitatea câmpului coercitiv.

Pentru cazul comportării liniare, parametrul care descrie raportul dintre componenta reactivă și cea disipativă este factorul de calitate al bobinei, notat  $Q$ . Rezistența de pierderi cumulează pierderile prin conducție și curenți turbionari. Ea se figurează în serie cu inductanța, ca în figurile 6.6 și 6.8. Pe diagrama fazorială din figura 6.8 se pot exprima factorul de calitate și impedanța bobinei:

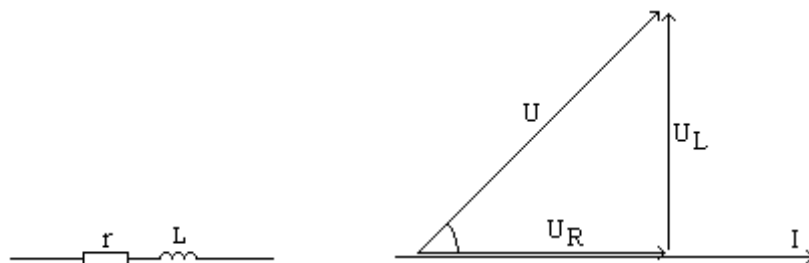


Figura 6.8: Reprezentarea fazorială pentru bobina reală

$$Q = \frac{\omega L}{r} \quad Z = r + j\omega L \quad |Z| = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} = \omega L \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}}$$

În cazul comportării neliniare, se definește o rezistență echivalentă medie, ținând cont de energia disipată în unitatea de timp și de energia înmagazinată în câmp magnetic. Totuși, această rezistență folosește numai la calculul pierderilor, nu și pentru un calcul riguros al defazajelor, deoarece regimul nu mai poate fi sinusoidal (nu este valabilă diagrama din figura 6.8).

Bobinele cu miez fero- și feri-magnetic se folosesc în circuitele de putere, pentru filtrare sau ca transformatoare. În majoritatea aplicațiilor, saturarea miezului este un efect nedorit. Spre exemplu, saturarea miezului unui transformator determină creșterea rapidă a curentului, fără a produce tensiunea dorită în secundar. De aceea, fenomenul este evitat din faza de proiectare, adică se dimensionează miezul astfel încât să nu se atingă saturația, chiar la curent maxim. Uneori se introduce spațiu cu aer în circuitul magnetic (întrefier).

Bobine cu miez ferimagnetic se folosesc în tehnica de radiofrecvență, pentru circuite rezonante și pentru inductanță variabilă.

#### 6.4 Mărimi caracteristice ale bobinei

**Inductanța (inductivitatea) nominală** este valoarea precizată de producător, uneori marcată pe bobină. Multe bobine nu au valoarea nominală marcată. Multe bobine sînt produse chiar de fabricantul de aparate, sau sînt produse la cerere, numai pentru un client. Produse de catalog, fabricate în serii mari, sînt bobinele de putere foarte mică, în tehnologie SMD, bobinele reglabile (pentru tehnica de radiofrecvență) și transformatoarele pe miez de tole din oțel sau miez de ferită, pentru convertoare de putere mică. În schimb, miezurile de ferită sînt produse de catalog (serii mari).

**Toleranța** este abaterea maximă admisibilă a inductanței, în raport cu valoarea nominală, la temperatura de referință. La bobine, dispersia parametrică este mare (peste 10%), din cauza incertitudinilor constructive, cu excepția componentelor SMD.

**Curentul maxim** este valoarea maximă admisibilă a curentului efectiv. Această valoare este impusă de fenomenul de disipație, care depinde de frecvență, deci va fi precizată o valoare maximă a curentului continuu și o valoare maximă a curentului pentru o frecvență de referință.

**Tensiunea instantanee maximă** este limitată de posibilitatea de descărcare între spire sau între capetele bobinei.

**Gama temperaturilor ambiante** de funcționare și de depozitare.

**Puterea disipată maximă** este importantă, din punctul de vedere al limitării temperaturii interne de funcționare.

**Rezistența de izolație** între conductor și izolația exterioară.

Alți parametri privesc gabaritul, regimul climatic, încercarea mecanică, parametrii de fiabilitate ai lotului.

#### 6.5 Tipuri de bobine, după destinație

- Bobine fără miez, pentru circuite de acord sau oscilatoare la frecvențe foarte mari, curent mic. Se bobinează pe carcase de plastic sau fără carcasă ("în aer").
- Bobine realizate pe cablajul imprimat (inductanțe mici).
- Bobine în tehnologia SMD, curenți foarte mici, funcționare la frecvențe mari, atît în tehnica radio cît și în convertoare.
- Bobine cu miez de ferită (inclusiv transformatoare), ajustabil sau fix, pentru circuite de acord, filtre de radiofrecvență, oscilatoare (curent mic, figura 6.9 și ultimele două din figura 6.10). Se dorește factor de calitate cît mai bun.

- Bobine cu miez de ferită, pentru separarea componentei continue de cea de radiofrecvență (“șoc de radiofrecvență”).
- Bobine cu miez de ferită pentru acumulare de energie sau transformator, în convertoare de putere mică sau mijlocie (figura 6.11). Se dorește un raport inductanță/gabarit cât mai bun. Dimensiunile miezului scad odată cu creșterea frecvenței, ceea ce favorizează lucrul la frecvențe mai mari decât cea a rețelei (zeci de kHz). În plus, filtrarea armonicelor superioare este mai simplă, la frecvențe mari (componente reactive de gabarit mai mic).
- Bobine și transformatoare cu miez din tole de oțel, pentru circuite de putere. Miezul se execută din tole, pentru a micșora disipația prin curenți turbionari. Tolele sînt subțiri, cu dimensiunile principale în sensul liniilor de cîmp.
- Bobine pentru relee (curent continuu, curent alternativ).

Marcarea valorilor (acolo unde este cazul) se face în clar.



Figura 6.9: Bobine cu miez de ferită, reglabile, tehnica radio

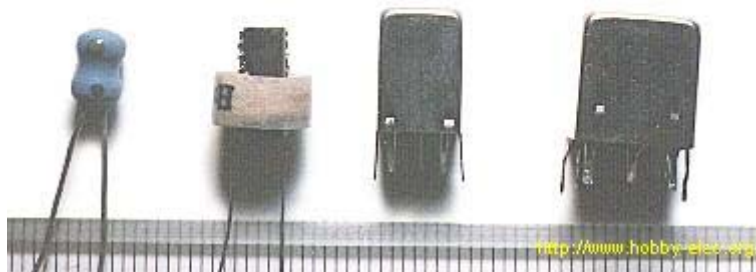


Figura 6.10: Bobine cu miez de ferită, fixe (convertoare, șoc de radiofrecvență) sau ajustabile (tehnica radio)



Figura 6.11: Bobine cu miez de ferită, toroidale, pentru convertoare

Aspecte tehnologice:

- Carcasă izolatoare sau lipsa carcasei
- Conductor rigid sau multifilar
- Conductor argintat (frecvențe mari)
- Bobinare dificilă la miezuri toroidale

- Miez din tole
- Ajustarea inductanței prin rotirea miezului (bobine de acord în tehnica radio)

Tipuri de miez de ferită (figurile 6.9 – 6.11):

- Bară
- Tor
- Oală cu mosor
- 2 oale, 2 X
- Miezuri cu 2, 3, 4 găuri

Tipuri de miez de oțel electrotehnic (figura 6.12):

- C + I, 2 x C
- E + I
- 2 x E

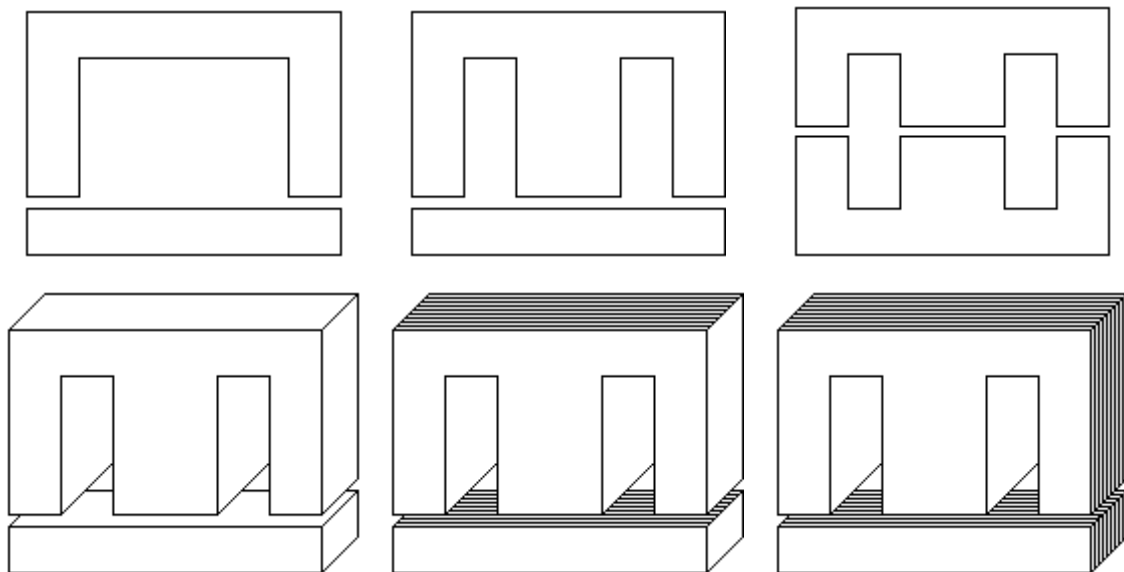


Figura 6.12: Miezuri din tole de oțel

## 6.6 Comportarea neliniară a bobinei

Materialele feromagnetice și ferimagnetice folosite la multe aplicații din electronică are aspectul din figura 6.13 (curba desenată cu negru). Este vorba despre materiale magnetice moi, cu valoare mică a câmpului coercitiv, care se folosesc la aplicații de putere (transformatoare, bobine de filtrare a curentului) și de prelucrare a semnalului (bobine din oscilatoare, bobine de suprimare a curentului la frecvențe mari, circuite rezonante). Ciclul de histerezis magnetic pentru materialele magnetice dure este caracterizat prin valori mari ale câmpului coercitiv, ca și prin forma mai apropiată de un dreptunghi (valoarea inducției remanente este apropiată de a inducției de saturație, ca în curba desenată cu roșu în figura 6.13). Materialele dure sînt folosite în magneți permanenți (în trecut, au mai fost folosite pentru memoriile calculatoarelor, dar această utilizare este depășită).



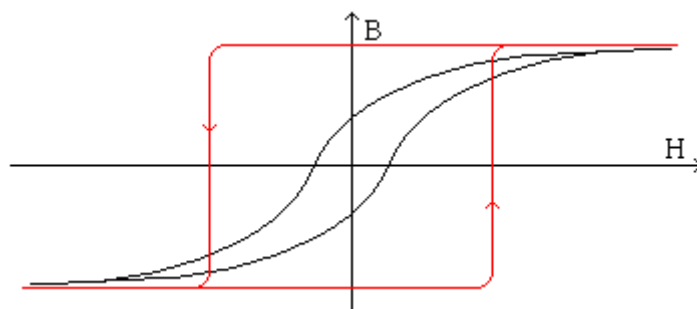


Figura 6.13: Ciclul de histerezis magnetic (cu negru ferita moale, cu roșu ferita dură)

Dacă o bobină cu un miez feromagnetic moale este alimentată la o sursă de tensiune sinusoidală, iar intensitatea câmpului depășește valoarea de saturație, curentul are aspectul din figura 6.14. Dimpotrivă, dacă este alimentată la o sursă de curent constant, tensiunea este deformată, în sensul aplatisării vîrfurilor. Cu excepția unor aplicații speciale din electronica de putere, miezul trebuie dimensionat astfel încît să nu se satureze, altfel el va determina curenți mari (posibilitate de distrugere), fără nici un efect din partea câmpului magnetic.

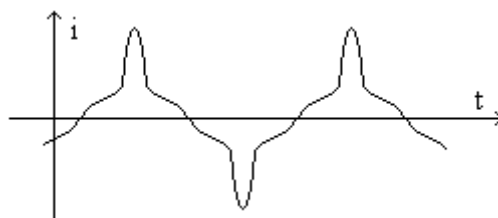


Figura 6.14: Curentul prin bobină cu miez saturat, cînd tensiunea este sinusoidală

## 6.7 Funcționarea releelor

Releele sînt componente electromecanice. Ele sînt formate dintr-o componentă electrică (bobina care crează cîmp magnetic în miezul feromagnetic) și o componentă mecanică mobilă (fracțiune mobilă din miezul feromagnetic, numită armătura mobilă). Structura schematică a unui relee și simbolul pentru reprezentarea în scheme (un contact normal deschis) sînt prezentate în figura 6.14.

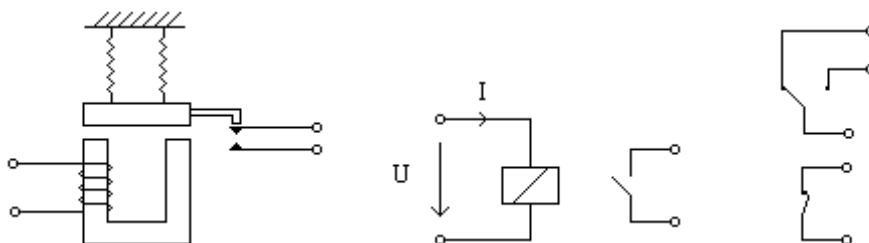


Figura 6.14: Structura mecanică și simbolul releului

**Modul de funcționare.** Armătura mobilă este atrasă spre cea fixă, atunci cînd fluxul magnetic depășește un prag (implicit, cînd curentul prin bobină depășește pragul de atragere). Se spune că releele este „atras”. Armătura mobilă se îndepărtează de cea fixă (de regulă, cu ajutorul unui arc), atunci cînd fluxul magnetic scade sub un prag (implicit, cînd curentul prin bobină scade sub pragul de relaxare). Se spune că releele este în repaus sau relaxat. Pragul de atragere are valoare mai mare decît cel de relaxare, astfel încît releele prezintă un efect de histerezis electromecanic (alt fenomen decît histerezisul magnetic al miezului).

Pe partea fixă și pe partea mobilă a miezului sînt prinse perechi de contacte electrice. Unele dintre acestea sînt deschise cînd releele este în repaus și se vor închide cînd releele este atras (contacte „normal deschise”). Celelalte contacte sînt închise cînd releele este în repaus și se deschid cînd releele este atras

(contacte „normal închise”). Din cauza părților mecanice aflate în mișcare, timpii de închidere, respectiv de deschidere a contactelor (numiți „timpul de zbor” al contactelor) sînt mari, în comparație cu timpii tranzitorii uzuali din circuitele electronice. Valori uzuale ale timpului de zbor: 10-100ms. Timpul de zbor la atragere nu este egal cu cel de la relaxare. Tot din cauza structurii mecanice, releul este producător de vibrații mecanice și poate fi perturbat de existența vibrațiilor mecanice în mediu (se poate întrerupe curentul prin contactele releului atras, din cauza vibrațiilor).

Mărimi caracteristice ale releelor:

- Tensiunea nominală pe bobină
- Curentul nominal prin bobină
- Rezistența bobinei
- Inductanța bobinei în cele două stări (atras, relaxat)
- Curentul maxim prin contactele releului
- Tensiunea maximă pe care o pot întrerupe contactele releului
- Timpul de zbor la atragere
- Timpul de zbor la relaxare

Scopul releului este de a comanda închiderea sau deschiderea de circuite electrice, printr-un curent care circulă separat de acel circuit. Circuitul comandat transportă fie puteri mari, fie semnale slabe (cu scop de informație).

În primul caz, curentul prin bobină este de valoare mică, în comparație cu cel comandat, deci scopul este de a comanda circuite de putere mare prin comenzi de putere mică, izolate galvanic. Exemple: aplicațiile de electronică de putere, comanda circuitelor de iluminat. Tipurile de aparate de comutație electrică, cu funcție de releu, prevăzute a comuta curenți mari (peste 10A) se numesc contactoare. Tipul de releu folosit pentru comanda curentului prin bobina unui contactor se numește releu intermediar. Exemplu de caracteristici pentru un releu intermediar: tensiune nominală de alimentare a bobinei la 24Vcc, curent nominal prin bobină 40mA, 2 perechi de contacte normal deschise și 2 perechi de contacte normal închise, curent maxim prin contacte 2A, tensiune maximă pe contacte 300V, timp de zbor 30ms.

În al doilea caz, puterea în circuitul comandat este neglijabilă, deci scopul este protecția circuitelor de semnal care vin în contact cu omul sau cu aparate scumpe. Exemplu: releele care cuplează circuitele de transmisiuni la linia de comunicație, releele de intrare în telefon, în fax, în placa de rețea a calculatorului, unde efectul unei descărcări electrice atmosferice este distrugător.

Circuitul echivalent al bobinei este format din inductanță în serie cu rezistența, ca în figura 6.15. Inductanța se modifică în momentul atragerii releului (are o valoare sensibil mai mare după ce s-a închis circuitul magnetic, decît în starea relaxată). La releele de c.c., rezistența echivalentă este chiar rezistența ohmică a bobinei. La releele de c.a., rezistența echivalentă este compusă din rezistența ohmică, rezistența de pierderi prin histerzis magnetic și cea de pierderi prin curenți turbionari.

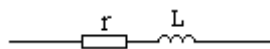


Figura 6.15: Circuitul echivalent al bobinei releului

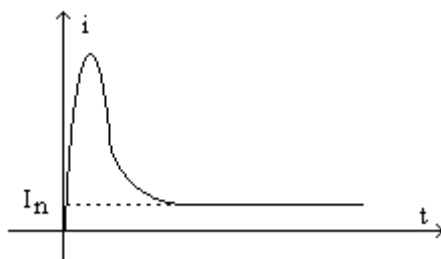


Figura 6.15: Variația curentului la atragere (bobină în c.a.)

Unele relee sînt proiectate astfel ca bobina să fie alimentată în c.a.. Acestea au avantajul că, după atragerea armăturii mobile, curentul prin bobină scade puternic, din cauză că reactanța inductivă a crescut semnificativ (figura 6.16). Consecința este consumul redus de curent. Dezavantajul acestui tip de releu este

că, atunci când armătura mobilă este blocată mecanic în poziția relaxată, curentul rămâne foarte mare și bobina se arde. Este important ca realizarea mecanică să prevină astfel de situații. Limitarea curentului prin bobină, în regim de releu atras, este efectul reactanței inductive.

A doua variantă de proiectare este pentru alimentarea în c.c.. Limitarea curentului se face doar prin rezistența ohmică a bobinei, deci bobina nu se poate arde, chiar dacă circuitul magnetic rămâne deschis. Dezavantajul este consumul de curent, mai mare decât în cazul alimentării în c.a.. Limitarea curentului prin bobină, în regim de releu atras, este doar efectul rezistenței ohmice.

În figura 6.17 este prezentat graficul curentului printr-o bobină alimentată în curent continuu, la atragerea și relaxarea releului. S-a presupus că există un circuit destinat descărcării energiei din bobină, atunci când dorim suprimarea curentului (acest circuit va fi studiat la un alt curs). Valoarea  $I_n$  este curentul nominal prin bobină,  $I_1$  este pragul de atragere, iar  $I_2$  este pragul de relaxare. În figura 6.18 apare un exemplu tipic de circuit în care releul este folosit pentru transmiterea de informație, la puteri mici. Rolul diodei D2 este de a permite descărcarea energiei din bobină, fără străpungeri, atunci când se întrerupe alimentarea bobinei releului.

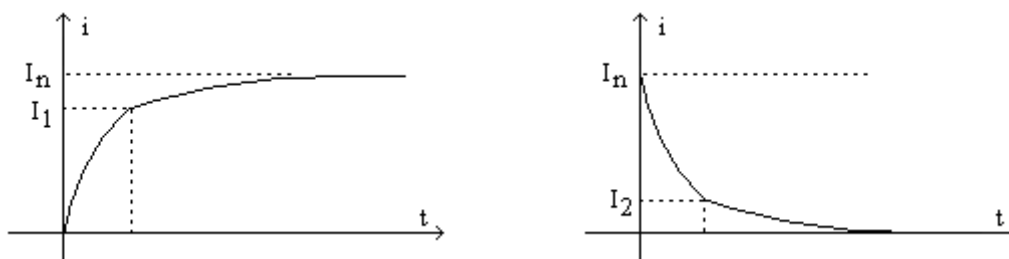


Figura 6.17: Variația curentului (c.c.) prin bobina releului, la atragere și la relaxare

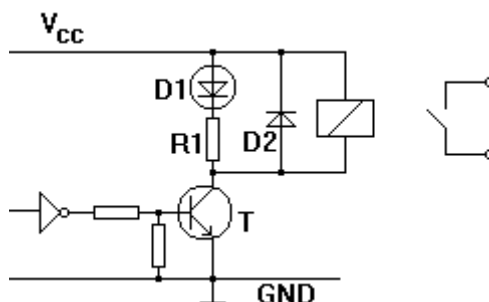


Figura 6.18: Circuit pentru transmiterea informației prin releu

## 6.8 Funcționarea transformatoarelor

Transformatorul este o mașină electrică, fără componente mecanice în mișcare. El posedă cel puțin două bobine pe același miez sau o bobină cu priză (în cazul autotransformatorului), dar poate avea mai multe bobine (fiecare bobină este situată în câmpul creat de celelalte). Bobinele sînt realizate pe un miez fero-sau ferimagnetic, cu excepția transformatoarelor de frecvențe foarte mari, care pot lucra fără miez. De regulă, una dintre înfășurări preia energie sau informație de la o sursă, pe care le livrează către celelalte înfășurări. Prima se numește înfășurare primară (pe scurt: primar), iar celelalte se numesc înfășurări secundare. Simbolurile transformatoarelor cu miez fero- și ferimagnetic sînt prezentate în figura 6.19. Efectul esențial este inducerea unei tensiuni în înfășurarea secundară, pe seama variației curentului din înfășurarea primară. De aici se deduce că transformatorul nu poate fi folosit pentru transferul de energie în c.c.. Mai mult, cu cît frecvența de bază a tensiunii aplicate în primar este mai mică, cu atît este necesar un miez mai voluminos. Ca și în cazul releului, scopul poate fi transmiterea de energie sau de informație. Transformatoarele folosite în surse de alimentare și în echipamente electronice de putere au rol preponderent energetic. În tehnica radio, în

trductoare, în comunicațiile de voce și de date se folosesc transformatoare pentru scopul informațional (adaptarea impedanțelor, izolare galvanică, cuplarea sarcinii sau a reacției în oscilatoare etc.).

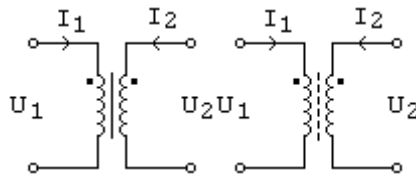


Figura 6.19: Simbolurile transformatoarelor cu miez feromagnetic și ferimagnetic

Pentru cazul general, al unor tensiuni și curenți de formă neprecizată, modelul transformatorului conține ecuațiile diferențiale scrise pentru bobina primară și cea secundară, în care apare și efectul inductanței mutuale (cuplarea între cele două bobine). Neliniaritatea miezului (curba de primă magnetizare, fenomenul de histerezis magnetic) complică serios ecuațiile.

Pentru unele cazuri particulare, când efectul neliniarității este mic, se pot folosi modele simplificate. Presupunem că fiecare înfășurare a transformatorului este caracterizată prin:

- inductanța proprie (inclusiv efectul miezului),  $L_k$
- rezistența de pierderi,  $r_k$
- numărul de spire,  $n_k$

1. În cazul când secundarul nu este cuplat la o sarcină, contează doar comportarea primarului, ca o bobină de sine stătătoare, caracterizată prin inductanța  $L_1$  și rezistența de pierderi  $r_1$ , ca în figura 6.15.
2. În cazul regimului permanent sinusoidal, dacă puterea transferată către secundar este semnificativă (comparabilă cu puterea nominală) iar impedanța de sarcină (din secundar) are caracter pur rezistiv, se pot neglija energia înmagazinată în bobine și puterea pierdută în conductoare și în miez (randamentul este aproximat ca fiind 100%). În acest regim, se obișnuiește ca mărimile  $U$  și  $I$  să desemneze valorile efective ale tensiunii și curentului (totuși, modelul este valabil și pentru valorile de vîrf ale mărimilor). Modelarea analitică a funcționării transformatorului poate fi simplificată astfel:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad P_1 = U_1 I_1 = P_2 = U_2 I_2,$$

unde indicele 1 semnifică primarul.

Rezultă: 
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

3. Pentru regim periodic, altul decît cel sinusoidal, se aplică același model, cu condiția ca armonicile superioare să nu depășească domeniul de frecvențe pentru care a fost proiectat transformatorul. Semnificațiile mărimilor rămîn aceleași.
4. Dacă transformatorul are mai multe înfășurări secundare prin care se închid curenți, modelul care descrie transferul de putere va conține ecuațiile tensiunilor secundare și ecuația care egalează puterea din primar cu suma puterilor livrate în secundare.

Pentru regimurile particulare 2 și 3, prezentate mai sus, circuitul echivalent al transformatorului poate fi separat în două circuite (pentru scrierea comodă a ecuațiilor în primar și secundar).

Presupunem că circuitul în care este folosit transformatorul are aspectul din figura 6.20 (sarcină rezistivă).

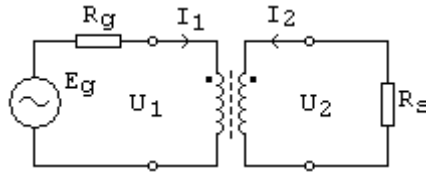


Figura 6.20: Circuit în care este folosit transformatorul (regim periodic)

Circuitul echivalent al transformatorului, văzut la bornele generatorului, este o rezistență cu valoarea:

$$R_1 = R_s \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

(circuitul echivalent în figura 6.21). Această valoare poartă numele de rezistență de sarcină reflectată în primar. Pentru mai multe secundare care lucrează simultan, rezistențele reflectate apar în paralel.

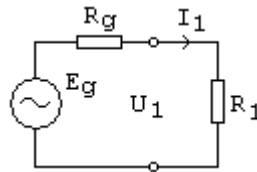


Figura 6.21: Circuitul echivalent în primar (conține rezistența reflectată din secundar)

Circuitul echivalent al transformatorului, văzut la bornele sarcinii, este un generator de tensiune cu valoarea

$$E_2 = E_g \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

și cu rezistența internă de valoare:  $R_2 = R_g \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$ . Această valoare poartă numele de rezistență a generatorului reflectată în secundar (circuitul echivalent în figura 6.22).

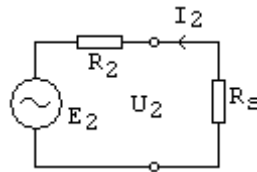


Figura 6.22: Circuitul echivalent în secundar (cu generatorul echivalent și rezistența reflectată din primar)

Pentru a cunoaște faza tensiunii și curentului din secundar, se folosește convenția bornelor polarizate (prezente în figurile 6.19, 6.20), astfel: faza tensiunii măsurate de la borna polarizată a secundarului spre cea opusă este identică cu cea măsurată de la borna polarizată a primarului spre cea opusă. Un exemplu important de aplicare a convenției apare atunci când transformatorul are mai multe secundare, legate între ele. În figura 6.23, apar două situații diferite: în cazul *a* sînt legate o bornă polarizată cu una nepolarizată. Tensiunea *U* este suma celor două tensiuni secundare. În al doilea caz, se măsoară tensiunea dintre două borne de același fel, iar valoarea ei este diferența dintre cele două tensiuni secundare. În particular, dacă cele două secundare au același număr de spire, tensiunea rezultantă în cazul *b* este nulă.

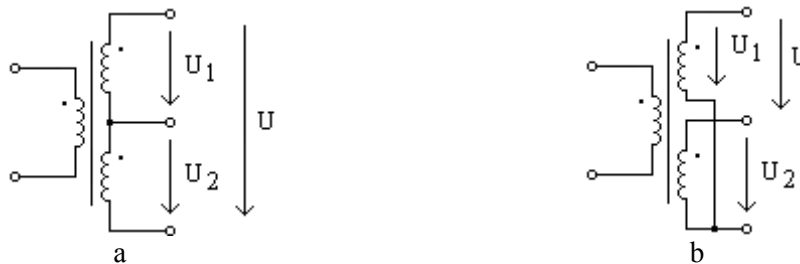


Figura 6.23: Transformator cu două secundare. Sumarea (a) și scăderea (b) tensiunilor secundare

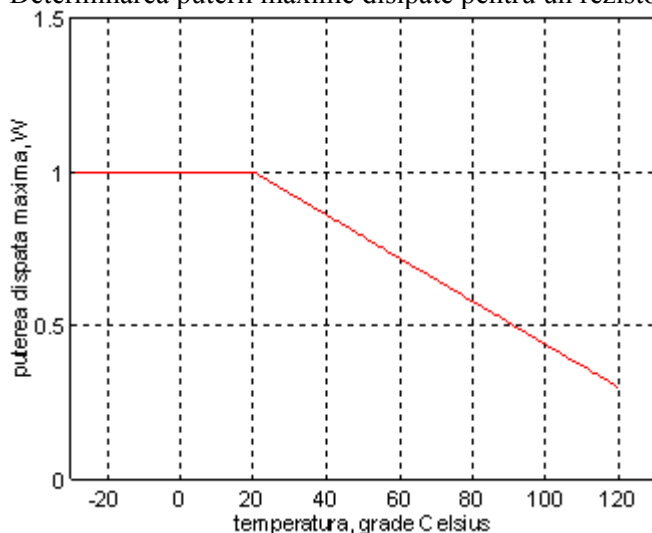
NB. Tot o convenție a notațiilor se aplică și pentru sensul curentului. Spre exemplu, în figura 6.20, semnul lui  $I_2$  este contrar față de cel al lui  $I_1$ . Dacă se întâmplă că bobinele au același număr de spire, atunci  $i_2(t) = -i_1(t)$ .

Mărimile caracteristice ale transformatorului sînt:

- Intervalul frecvențelor de lucru
- Tensiunea nominală din primar
- Tensiunile nominale pe secundare
- Puterea maximă totală transferată spre secundare (puterea nominală a transformatorului)
- Curentul maxim prin primar
- Curentul maxim prin fiecare secundar

### Probleme propuse

Determinarea puterii maxime disipate pentru un rezistor, cînd temperatura ambiantă este ...



Determinarea intervalului de valori posibile ale unui lot de rezistoare (se cunosc valoarea nominală și clasa de toleranță)

Determinarea rezistenței unui rezistor la altă temperatură decît cea de referință

Determinarea valorii rezistenței (capacității) marcate numeric

Evaluarea capacității, inductanței (din geometria componentei)

Determinarea reactanțelor capacitivă și inductivă, a factorilor de pierderi, a energiei înmagazinate

Diagrame fazoriale, determinarea defazajelor, a impedanțelor și a mărimilor variabile

Determinarea tensiunilor, curentului, puterii într-un transformator, determinarea impedanțelor reflectate și a circuitului echivalent al transformatorului.

Determinarea tensiunilor compuse din mai multe secundare, convenția bornelor polarizate.