

INDUCTOARE

1. Scopul lucrării: Cunoașterea parametrilor caracteristici, a structurii constructive a diverselor tipuri de inductoare cu terminale pentru inserție și pentru montarea pe suprafață; realizarea unor măsurători specifice.

2. Noțiuni teoretice:

2.1 Generalități

Inductorul este componenta care în regim armonic (curent, tensiune sinusoidale) realizează la borne un defazaj, φ , al tensiunii de aproape 90° față de curent.

În cazul ideal, defazajul este de $\varphi = 90^\circ$, dar practic este $\varphi < 90^\circ$ (fig. 1)

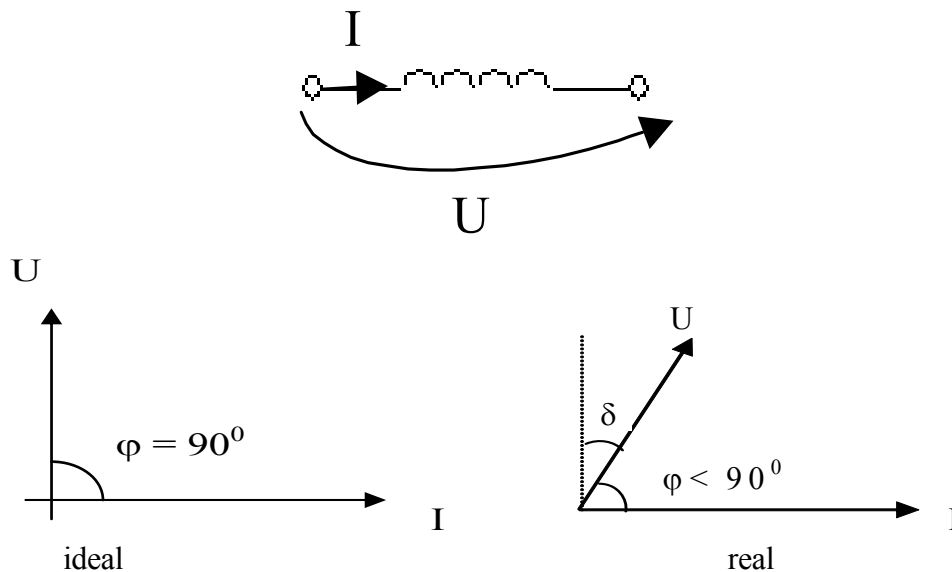


Fig. 1 Diagramele fazoriale ale tensiunii și curentului pentru un inductor

Alături de condensatoare, care sunt capabile să acumuleze energie electrică, inductoarele reprezintă componentele pasive capabile să acumuleze energie magnetică. În consecință, în anumite condiții (trebuie să fie parcurse de curent), inductoarele sunt în stare să producă un câmp magnetic asemănător celui produs de un magnet.

Trecerea unui curent de intensitate " i " printr-un conductor dispus într-o formă oarecare determină apariția unui flux magnetic prin suprafața care se sprijină pe firul conductor. Între cele două mărimi există o directă proporționalitate, factorul fiind numit inductanța circuitului:

$$L = \frac{\phi}{i} \quad (1)$$

Cum mărimea fluxului, la o valoare bine precizată a curentului, depinde de forma suprafeței străbătute de liniile de câmp generate de curent și de natura magnetică a mediului parcurs de aceleași linii de câmp, rezultă că inductanța depinde de factori geometrici pe de o parte și de factori ce caracterizează proprietățile magnetice ale mediului pe de altă parte.

În acest sens, cu cât mediul este mai permeabil la liniile de câmp magnetic, cu atât fluxul magnetic va fi mai mare și deci, corespunzător aceleiași geometrii a traseului conductor parcurs de același curent, inductanța rezultată va fi mai mare.

Totodată, corespunzător aceluiași mediu, cu cât aceleași linii de câmp magnetic parcurg de mai multe ori suprafața ce se sprijină pe traseul conductor, cu atât fluxul magnetic este mai mare și ca atare și inductanța traseului conductor ce a generat respectiva suprafață. Cu alte cuvinte se poate

afirma că inductanța unui traseu de lungime "l" dispus sub forma unui cerc este superioară inductanței obținută cu aceeași lungime de traseu dispusă sub o formă diferită de cerc.

Așa cum a fost definită inductanța nu s-a luat în considerare nici un alt efect fizic care ar putea conduce la diminuarea fluxului magnetic determinat de curentul electric "i" și de aceea această inductanță mai poartă numele de inductanță intrinsecă și poate fi considerată inductanța determinată în curent continuu sau cu foarte bună aproximație inductanța determinată la joasă frecvență.

Odată cu creșterea frecvenței curentului ce parcurge traseul conductor, în condițiile prezenței și a altor efecte fizice (de tip capacitiv și disipativ), este posibil ca fluxul magnetic să fie influențat de respectivele efecte și ca atare inductanța să nu mai rămână constantă de la o frecvență la alta.

Această dependență este mai mare sau mai mică după cum fluxul magnetic este influențat mai mult sau mai puțin de efectele secundare menționate anterior, numite și efecte parazite.

De fapt, prezența acestor efecte parazite determină reprezentarea unui inductor prin intermediul unei scheme care evidențiază comportarea sa într-un anumit interval de frecvență. Schema electrică echivalentă conține nu numai o inductanță (cea intrinsecă) ci și elemente ce pun în evidență efectul capacitiv (capacități) sau efectul disipativ (rezistențe), ca în figura 2.

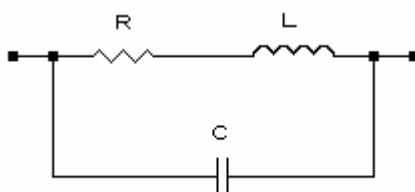


Fig.2 Schema echivalentă a unui inductor

Ca atare, comportarea inductorului în gama de frecvență este determinată de ponderea unuia dintre efectele fizice asupra celorlalte. Cum din prezentare a rezultat că, în principal, la un inductor sunt prezente efectul inductiv, efectul capacitiv și efectul disipativ, rezultă că această componentă electronică poate fi o inductanță, o capacitate, o rezistență sau combinații ale acestor elemente.

Evident că în aplicații se caută ca efectul inductiv să fie preponderent, această cerință fiind satisfăcută de la curent continuu (frecvență nulă) și până la frecvența de rezonanță proprie. Existența acestei rezonanțe este explicabilă dacă se ține seama de faptul că pe baza efectelor fizice ce au loc într-un inductor se poate considera că acesta este alcătuit dintr-o inductanță și o capacitate parazită. Acest circuit admite o frecvență proprie de rezonanță, aceasta fiind cu o bună aproximație precizată de relația:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_p}} \quad (2)$$

unde C_p este capacitatea parazită.

Este important să se evidențieze faptul că datorită efectului disipativ în inductor se dezvoltă putere activă. Pierderile de putere activă din inductor sunt caracterizate prin tangenta unghiului de pierderi (factor de pierderi, factor de disipație), $\text{tg } \delta$, mărime ce reprezintă raportul dintre puterea activă și puterea reactivă din inductor.

$$\text{tg } \delta = \frac{P_a}{P_r} = \frac{I}{Q} \quad (3)$$

Inversul mărimii $\text{tg } \delta$ reprezintă factorul de calitate al inductorului. El se notează cu Q și este, în general, preferat în caracterizarea pierderilor unui inductor față de $\text{tg } \delta$.

Din diagrama fazorilor U și I de la bornele inductorului se poate considera o schemă echivalentă formată din două elemente: inductiv (L) și disipativ (R). Această schemă poate fi serie (L_s, R_s) sau paralel (L_p, R_p). Deoarece în majoritatea cazurilor întâlnite în electronică se poate considera că mărimile L_s și L_p sunt aproximativ egale, inductanța se notează cu "L", iar R_s cu "r",

respectiv R_p cu "R". Înlocuind expresiile puterii active și reactive, dacă se consideră o schemă echivalentă serie, respectiv paralel, rezultă relația prin care se determină factorul de calitate:

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L}{r}; Q = \frac{R}{\omega_r \cdot L} \quad (4)$$

$$r = R_s \quad R = R_p$$

unde r reprezintă rezistența de pierderi serie, iar R rezistența de pierderi paralel (conform notațiilor de mai sus). Variația tipică a factorului de calitate cu frecvența este prezentată în figura 3(a) Forma graficului se poate explica prin faptul că odată cu creșterea frecvenței crește factorul de calitate pe baza relației 4, dar cresc și pierderile, evidențiate prin creșterea rezistenței serie r . Creșterea rezistenței este explicată prin efectul pelicular care are ca efect circulația curentului electric numai spre exteriorul unui conductor metalic, la frecvențe înalte. De multe ori la înaltă frecvență se utilizează conductoare argintate iar pe de altă parte se pot utiliza tuburi (țevi) în loc de conductoare masive. La inductoarele cu miez apare o creștere suplimentară a pierderilor datorate creșterii cu frecvența a pierderilor în miezul magnetic.

Ținând seama de cele prezentate se poate concluziona că la un inductor, pentru a putea fi utilizat în mod corespunzător, trebuie avute în vedere pe lângă inductanță și capacitatea parazită sau factorul de calitate.

Pentru măsurători asupra inductoarelor prin care se pot evidenția inductanța, factorul de calitate și capacitatea parazită, a fost utilizat în trecut un aparat relativ simplu numit Q-metru. Acesta, în esență, este un circuit electronic alcătuit dintr-o sursă de tensiune de frecvență variabilă ce alimentează inductorul conectat în serie cu un condensator variabil. În prezent Q-metrul a fost înlocuit cu analizoare de impedanță, aparate de măsură mult mai complexe.

Deoarece valoarea inductanței depinde de efectele de tip capacitiv, respectiv rezistiv (efecte parazite) prezente la orice tip de inductor, la o anumită frecvență inductorul este caracterizat de o inductanță aparentă L_a . Efectele parazite fiind mai mari la frecvențe înalte, în domeniul frecvențelor joase și în curent continuu valoarea inductanței (notată cu L_{ech}) se apropie de valoarea inductanței intrinseci (L). În general vom considera $L_{ech} \approx L$. Inductanța aparentă a inductorului în care se evidențiază prezența capacității parazite C_p , are expresia (5):

$$L_a = \frac{L_{ech}}{1 - \omega^2 \cdot L_{ech} \cdot C_p} \quad (5)$$

unde:

ω este pulsația la care se calculează L_a ;

L_{ech} - inductanța echivalentă (inductanța de J.F. și c.c., în condițiile în care se ține seama de pierderile ohmice și magnetice);

C_p - capacitatea parazită.

Variația tipică a inductanței aparente cu frecvența este prezentată în figura 3 (b)

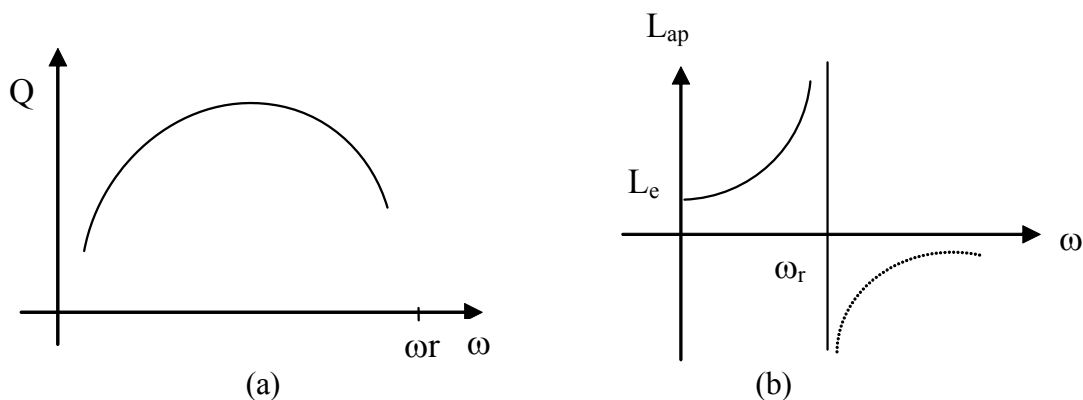


Fig. 3 Dependența de frecvență a factorului de calitate (a) și a inductanței aparente (b)

Dacă se depășește frecvența proprie de rezonanță inductanța aparentă devine negativă, adică

inductorul prezintă caracter predominant capacitiv. Domeniul de frecvențe în care inductorul trebuie utilizat trebuie să se afle la frecvențe suficient de mici față de frecvența proprie de rezonanță și dacă este posibil în zona în care Q prezintă o valoare maximă.

Capacitatea parazită a unui inductor poate fi estimată prin diverse relații de calcul, însă calculul exact este destul de dificil, fiind necesară rezolvarea ecuațiilor câmpului electromagnetic pe domenii cu geometrii complicate. De obicei se estimează efectele C_p prin măsurători și determinarea frecvenței proprii de rezonanță.

Pentru reducerea capacității parazite au fost realizate bobinaje speciale dintre care amintim bobinajul fagure, piramidal sau în galeți. [1].

În cadrul componentelor studiate în laborator se evidențiază în special efectul inductiv și inductanța utilă, în sensul că se studiază componente electronice la care acest efect este chiar cel predominant și este, evident, dorit. În practică, realizarea echipamentelor electronice duce de multe ori la situații în care diferite elemente constructive ale schemei pot prezenta un mai mult sau mai puțin pronunțat efect inductiv. De aceea, concluziile la care se va ajunge în înțelegerea problemelor legate de noțiunea de inductanță, vor fi utile și la aprecierea situațiilor unde acest efect este nedorit (parazit). Un exemplu de modificare a schemei electrice ca urmare a structurii reale (ce ia naștere datorită efectelor parazite de tip disipativ, inductiv și capacitiv) este cel prezentat în figura 4.

Situația prezentată apare datorită faptului că în proiectare elementele ce interconectează componentele în vederea alcătuirii unei scheme electrice se consideră ca fiind nule din punct de vedere disipativ, inductiv și capacitiv. În realitate, datorită efectelor fizice care intervin în funcționare, elementele de interconectare prezintă într-o anumită măsură fenomenele fizice în discuție. Inductanțele ce iau naștere modifică structura schemei electrice proiectate. Schemele electrice echivalente cuprind, în afară de inductanțe, rezistențele de pierderi prin conducție (ohmice) ale traseelor de cupru și capacitățile parazite ale acestora față de masă. Capacitatea parazită reprezintă o capacitate distribuită ce apare datorită vecinătății dintre două conductoare aflate la potențiale electrice diferite, traseele de cablaj imprimat în cazul de față. Acest fenomen înrăutățește și mai mult situația. Se obțin diverse structuri de filtrare ce pot duce la atenuări și distorsionări ale semnalelor utile transmise pe linie. Cum inductanța obținută involuntar prin realizarea traseului de cablaj poate conduce la o funcționare incorectă a echipamentului, este foarte important ca proiectantul să încerce, încă din faza elaborării structurilor de interconectare, să minimizeze efectele inductive ce apar.

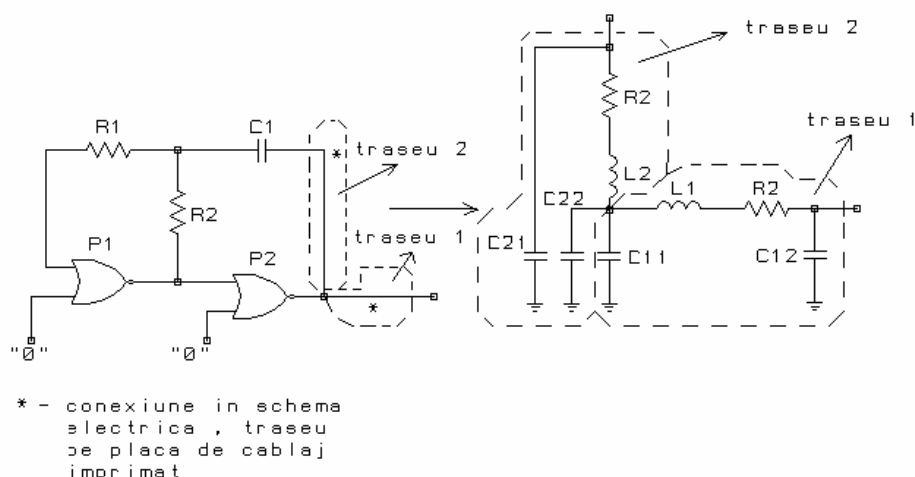


Fig. 4 Schema electrică echivalentă a unei porțiuni dintr-o structură de interconectare în conformitate cu elementele parazite care apar.

unde :

- L^* - este inductanța parazită a porțiunii * de traseu;
- R^* - rezistența parazită a porțiunii * de traseu;

C_* - capacitatea parazită (față de masă) a porțiunii * de traseu, reprezentată prin capacitățile echivalente la capetele traseului.

Situații similare (din punctul de vedere al efectului inductiv parazit) pot fi observate și în ceea ce privește unele componente: este cazul rezistoarelor cu peliculă de carbon sau metalică spiralizate, rezistoarelor bobinate, condensatoarelor stiroflex sau electrolitice cu aluminiu (vezi lucrările de laborator respective). Acestea prezintă un puternic caracter inductiv, fenomen de care trebuie să se țină seama în etapa de proiectare.

2.2 Parametrii inductoarelor

Inductorul, ca orice componentă pasivă este caracterizată de parametri generali, specifici tuturor componentelor pasive: inductanța nominală L_N , toleranța t , coeficientul de variație cu temperatura α_T , intervalul temperaturilor de utilizare $[\theta_m, \theta_M]$, puterea nominală P_N , toleranțele t_j .

Inductanța nominală, L_N - depinde de dimensiunile geometrice ale inductorului (bobinajului), dar și de prezența și tipul miezului magnetic pe care este construită bobina, miez ales în funcție de domeniul de frecvență al inductorului.

Pentru diferite domenii de frecvență, marile firme producătoare de componente oferă serii de valori nominale cu toleranțe cuprinse între $\pm 5\%$ și $\pm 20\%$, cu curenți nominali de la zeci de mA la câțiva amperi. Aceste bobine sunt construite pe tor de ferită (circuit magnetic închis) sau pe baghetă de ferită (circuit magnetic deschis). au dimensiuni reduse și sunt marcate în cod (eventual codul culorilor) sau în clar. Capsulele folosite sunt cu terminale pentru plantare (*through-hole*) sau în tehnologia SMD (*Surface Mounted Devices* - dispozitive cu montare pe suprafață). Pentru alte valori nominale și/sau alte domenii de frecvență, fabricanții de produse electronice își realizează inductoarele necesare la comandă („custom design”).

Pentru un inductor cu bobinaj cilindric cu aria secțiunii S și diametrul d , realizat pe un miez cu permeabilitatea relativă μ_r , cu spire pe un singur strat, cu lungimea $l \gg d$ (solenoid) se poate utiliza pentru calculul inductanței formula binecunoscută:

$$L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 S}{l} \quad (6)$$

Această relație, deși nu este foarte precisă în cazul altor variante de inductoare, cum ar fi cele cu $l \approx d$ sau cu mai multe straturi, permite evidențierea factorilor de care depinde inductanța.

Alți parametri ai inductoarelor sunt prezentați în continuare:

- Curentul nominal I_N reprezintă valoarea maximă efectivă a curentului sinusoidal ce poate străbate inductorul în regim de funcționare îndelungată.

Pentru unele tipuri de bobine este dată în catalog valoarea maximă a componentei continue a curentului, ce poate fi aplicată bobinei în regim de funcționare îndelungată.

- Frecvența proprie de rezonanță, f_R , este dată de relația:

$$f_R = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_N C_p}} \quad (7)$$

unde C_p reprezintă capacitatea parazită a inductorului; aceasta depinde de structura constructivă a bobinei, permitivitatea relativă a miezului și a elementelor izolante (straturi de lac, vopsea, carcasă de plastic, etc.); în schema echivalentă a inductorului apare în paralel cu inductanța.

În unele cataloagele de inductoare, pentru a indica acest parametru, se folosește acronimul SRF (*Self-Resonant Frequency*).

- Factorul de calitate al inductorului, Q , este egal cu raportul dintre puterea reactivă dezvoltată în inductor la frecvența de lucru și puterea activă disipată în acesta și este inversul tangentei unghiului de pierderi $\text{tg } \delta$:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\omega L I^2}{r_s I^2} = \frac{\omega L}{r_s} \quad (8)$$

unde $\omega = 2\pi f$, f = frecvența de lucru a bobinei;

L = inductanța bobinei la frecvența f ;

r_s = rezistența serie de pierderi a bobinei la frecvența f , determinată de pierderile prin conducție în conductorul din care este realizat bobinajul bobinei și de pierderile în materialul magnetic al miezului (pierderi prin magnetizare, prin histerezis, pierderi prin curenți turbionari sau curenți Foucault, etc.), de pierderile în materiale izolante (izolația conductorului, a carcasei, a elementului de protecție, a lacului impregnant, etc.), de pierderi în ecranul electromagnetic.

δ = complementul unghiului de defazaj între tensiunea și curentul care străbat bobina, numit unghi de pierderi.

În catalog este specificată valoarea acestui factor (valoarea minimă garantată - Q_{\min} sau valoarea Q la o anumită frecvență sau este dată caracteristica de variație a factorului de calitate în funcție de frecvență). Din punct de vedere al utilizării în electronică, la realizarea circuitelor oscilante sau a filtrelor, un inductor cu un factor de calitate mare oferă circuitului o caracteristică amplitudine-frecvență mai ascuțită decât un inductor cu un factor de calitate redus. Se spune că respectivul circuit este mai selectiv cu un inductor cu Q mare, adică poate favoriza (selecta) în mod substanțial anumite frecvențe față de același circuit realizat cu un Q mic.

- Rezistența în curent continuu, R_{cc} este rezistența bobinei măsurată la frecvență zero și este determinată în principal de rezistența firului conductorului din care este realizată bobina;

- Tensiunea nominală, U_N la bornele inductorului, este determinată de rigiditatea dielectrică a materialelor utilizate, de izolația conductorului de bobinaj și de modul de bobinare care determină distanțele relative dintre spire.

2.3. Structura constructivă a inductoarelor

Structura constructivă depinde de tipul inductorului fiind în general compusă din:

- bobinaj,
- miez magnetic,
- suport izolant (carcasă),
- zone de contactare și terminale,
- element de protecție,
- ecran electromagnetic.

Anumite elemente pot lipsi din structura constructivă sau un element poate îndeplini două funcții, de exemplu se pot realiza bobinaje direct pe suportul izolant care poate fi un miez de ferită, acesta fiind din punct de vedere electric un izolator sau se poate utiliza un material ceramic pentru inductanțe de valori mici.

Două exemple de inductoare realizate pe miezuri circular, respectiv pe miez toroidal sunt prezentate în figura 5.

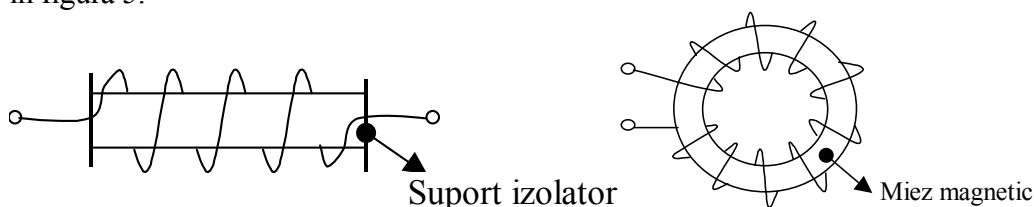


Fig. 5 Inductor circular și toroidal

În prezent marea majoritate a inductoarelor utilizate sunt realizate cu miez magnetic din ferită. Ferita este un material magnetic de tip metalo-ceramic cu permeabilitate relativă mare și

pierderi la înaltă frecvență mai mici decât ale materialelor feromagnetice. Ca și acestea din urmă, feritele au un caracter neliniar și prezintă fenomenele de saturație și histerezis. Au însă inducția de saturație mult mai mică și de asemenea un domeniu mai redus de temperatură. Miezurile de ferită pot fi realizate sub diverse forme: tip bară, tip E+I, E+I planare, tip oală, toroidal, etc. În general la aceste miezuri se precizează factorul de inductanță A_L (nH/spiră) iar inductanța rezultă $L=A_L \cdot n^2$, cu n numărul de spire.

Se utilizează foarte rar bobine cu aer numai pentru frecvențe foarte mari sau acolo unde prezența miezului poate introduce distorsiuni datorită caracterului neliniar al materialelor magnetice, cum este cazul la anumite aplicații de audiofrecvență (filtre pentru incinte acustice).

Inductoare montate pe suprafață sunt utilizate în general în aplicații unde se cere o mare densitate de echipare. În multe aplicații de înaltă frecvență, inductoarele montate pe suprafață oferă performanțe superioare celor THT. Inductoarele SMD cel mai des utilizate în prezent sunt de tip clasic, cu fir bobinat. Există o variantă de frecvență înaltă la care se utilizează un conductor bobinat pe un miez nemagnetic figura 6 (a).

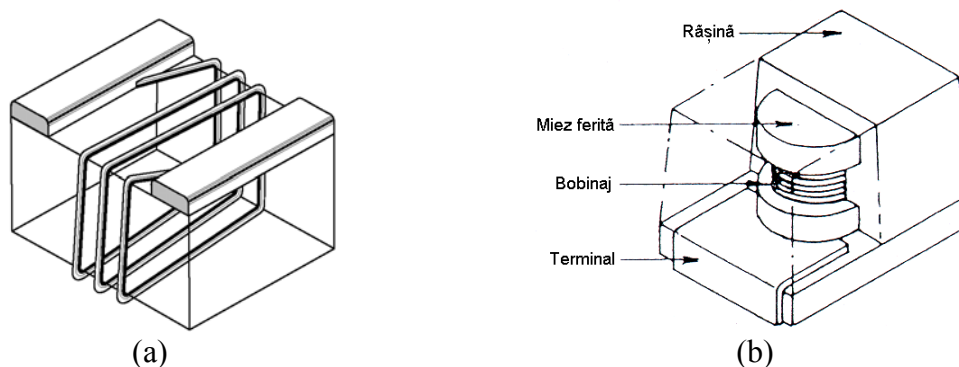


Fig. 6 Structura inductoarelor SMD de tip bobinat (a) cu miez nemagnetic, (b) cu miez magnetic

Alt tip de inductor bobinat pentru frecvențe medii și joase utilizează un miez de ferită, ansamblul fiind apoi mulat în rășină, componenta fiind similară condensatoarelor cu tantal, vezi figura 6(b).

Majoritatea inductoarelor utilizate în lucrarea de laborator sunt așa-zise șocuri de înaltă frecvență. Un inductor de tip șoc se numește așa deoarece are rolul de a opri curenții de înaltă frecvență și a permite trecerea curentului continuu sau a curenților alternativi cu frecvență mai joasă. Inductorul (bobina) șoc se conectează în serie cu circuitul electronic și efectul de șoc (blocare) este datorat impedanței mai mari prezentate de aceasta la frecvențe mari.

3. Desfășurarea lucrării:

3.1. Identificarea parametrilor inductoarelor

Se trece la completarea tabelului 4 din Anexa 1. Pentru inductoarele L1-L15 prezentate în figura 7 se determină parametrii marcați și alți parametri ce caracterizează inductoarele respective cu ajutorul foilor de catalog. Toate datele, atât cele măsurate, cât și cele determinate se trec într-un tabel de forma celui prezentat în Anexa 1. Placa de laborator este prezentată în figura 7.

Mod de lucru:

a) Se identifică inductoarele după codul din tabelul 1 și apoi pe baza foilor de catalog se identifică parametrii care se trec în tabelul 4. Pentru L1-L5 se studiază și marcajul în codul culorilor, cod similar cu cel de la lucrarea rezistoare.

b) Se măsoară inductanța și factorul de calitate. La acest punct toate măsurătorile se fac cu puntea RLC la **frecvența de 1kHz**.

Inductoarele L1-L13 au toate un punct comun de masă conectat la bornele GND, celălalt terminal fiind conectat la bornele Ln, cu n numărul de ordine respectiv. Pentru inductoarele L14 și L15 inductanța se măsoară între bornele GH și I, pentru a nu include în circuit și rezistența șunt Rs.

În referat se calculează t_m toleranța rezultată în urma măsurării, cu relația: $t_{calc} = \frac{L_m - L_N}{L_N}$.

cu L_m , valoarea inductanței măsurate, L_N inductanța nominală.

Se calculează rezistența echivalentă de pierderi serie pe baza relației $R_{serie} = \frac{\omega L}{Q}$.

OBS. Anumiți producători precizează frecvența la care este măsurată inductanța nominală. Uneori această frecvență poate fi aceeași la care este precizat factorul de calitate Q.

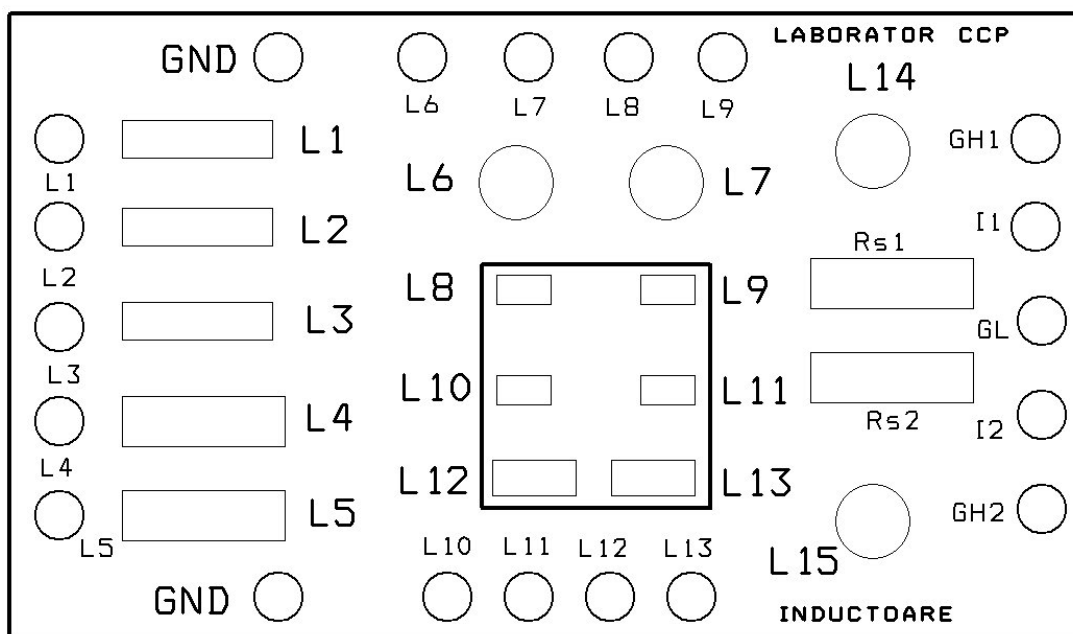


Fig. 7 Desenul plăcii pentru studiul inductoarelor

Tabelul 1 Lista și codul componentelor

Nr. ref.	Articol	Cod	Producător
L1	Inductor fix miniatură axial 3x10mm	EC24-100k	CTC Coils
L2	Inductor fix miniatură axial 3x10mm	EC24-221K	CTC Coils
L3	Inductor fix miniatură axial 3x10mm	EC24-102K	CTC Coils
L4	Inductor fix miniatură axial 5x14mm	EC46-222J	CTC Coils
L5	Inductor fix miniatură axial 5x14mm	EC46-103J	CTC Coils
L6	Inductor fix cu miez ferită, radial 7,5x11mm	CH6080101K	CTC Coils
L7	Inductor fix cu miez ferită, radial 7,5x11mm	CH6080102K	CTC Coils
L8	Inductor SMD mărime 1210, mulat în rășină	IMC1210U001	Vishay
L9	Inductor SMD mărime 1210, mulat în rășină	IMC1210U004,7	Vishay
L10	Inductor SMD mărime 1210, miez ceramică	B82412 (SIMID1210-01)	EPCOS
L11	Inductor SMD mărime 1210, miez ferită	B82412 (SIMID1210-01)	EPCOS
L12	Inductor SMD mulat în rășină	SMCM453232-470K	CTC Coils
L13	Inductor SMD mulat în rășină	SMCM453232-102K	CTC Coils
L14	Inductor fix cu miez ferită, radial 7,5x11mm	CH6080333K	CTC Coils
L15	Inductor fix cu miez ferită, radial 7,5x11mm	CH6080104K	CTC Coils

3.2 Dependența factorului de calitate de frecvență

Se determină inductanța și factorul de calitate la diverse frecvențe permise de puntea RLC utilizată. Se vor utiliza inductoarele L3, L5, L7, L9, L13, L14, L15

Tabelul 2 Variația inductanței și a factorului de calitate cu frecvența

f(kHz)		L3	L5	L7	L9	L13	L14	L15
0.1	L (mH)							
	Q							
0.12	L (mH)							
	Q							
1	L(mH)							
	Q							
10	L(mH)							
	Q							
100	L(mH)							
	Q							
200	L(mH)							
	Q							

Se vor comenta rezultatele.

3.3. Comportarea inductoarelor în curent alternativ

Pentru aceasta se dorește afișarea pe ecranul osciloscopului a tensiunii aplicate la bornele inductorului de la generatorul de semna și simultan a curentului prin inductor. De fapt se va măsura căderea de tensiune pe rezistența șunt R_s , care este proporțională cu curentul prin inductor, vezi figura 8. Așadar pe ecran vor fi vizualizate două semnale sinusoidale corespunzătoare tensiunii și curentului prin circuit.

Tensiunea generatorului se alege la maxim 20 V_vv. (vârf-vârf)

Se va crește progresiv frecvența. Curentul prin circuit va scădea cu frecvența deoarece $I=U/\omega L$. Este necesară modificarea amplificării pe verticală a osciloscopului pentru a avea valori comparabile cu nivelul tensiunii și a putea aprecia defazajul dinte cele două semnale. Pentru o citire mai precisă se pot activa cursoarele osciloscopului.

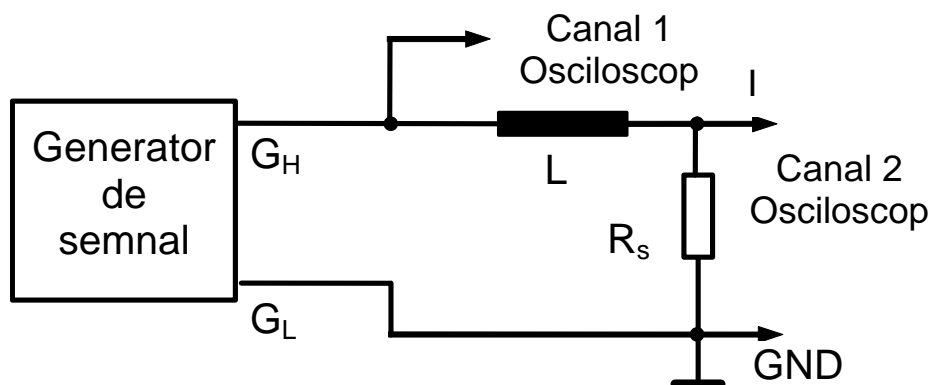


Fig.8 Montaj pentru vizualizarea tensiunii și curentului prin inductor.

În domeniul frecvențelor joase, curentul este defazat în urma tensiunii. Odată cu apropierea de frecvența proprie de rezonanță defazajul dintre tensiune și curent se va reduce și se va observa, după depășirea frecvenței proprii de rezonanță cum curentul va trece înaintea tensiunii, adică inductorul va prezenta un caracter capacitiv. La rezonanță curentul are o valoare foarte mică, dar odată depășită frecvența proprie de rezonanță curentul începe să crească din nou. Ecranul osciloscopului este prezentat în figura 9.

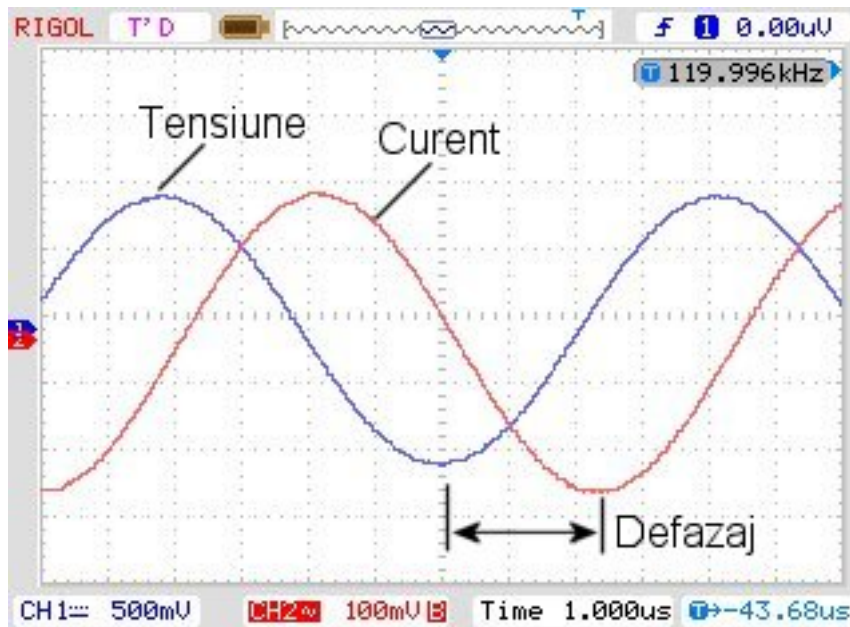


Fig.9 Ecranul osciloscopului cu tensiunea și curentul inductorului afișate

Se va nota valoarea frecvenței proprii de rezonanță pentru cele două inductoare. Cunoșcând inductanța la joasă frecvență se poate determina capacitatea parazită cu relația (2).

O altă metodă de a determina capacitatea parazită, dacă nu dispunem de puntea RLC pentru a măsura L_{ech} este de a realiza măsurători ale dependenței inductanței aparente de frecvență. Se măsoară astfel căderea de tensiune U_I ce corespunde curentului prin inductor la diferite frecvențe. Curentul este determinat din valoarea rezistenței șunt $R_{s1}=R_{s2}=10k\Omega$. Inductanța aparentă se calculează cu relația $L_a=U_G/\omega I$, cu U_G tensiunea generatorului (tot în unități vârf-vârf). Frecvențele se aleg corespunzător unei scale logaritmice. În vecinătatea frecvenței de rezonanță se vor alege mai multe puncte de măsură.

Tabelul 3 Comportarea în funcție de frecvență

f(kHz)	U_I [Vv]	$I=U_I/R_s$ [mA]	$L_a=U_G/\omega I$ [mH]	
1				f1=..... f2=..... Cp=.....
2				
5				
10				
20				
50				
100				
.....				
fpr				

Se va trasa graficul $L_a(f)$ care trebuie să fie de forma celui din figura 3b. Se aleg două frecvențe în regiunea crescătoare a graficului, în vecinătatea frecvenței de rezonanță. Capacitatea parazită se determină cu relația:

$$C_p = \frac{L_{a2} - L_{a1}}{L_{a1}L_{a2}(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (9)$$

Se va completa tabelul 3 pentru cele două inductoare L14 și L15.

4. Întrebări, concluzii, prelucrări de date (suplimentar față de punctul 3)

4.1 Pe baza foilor de catalog și a plăcii de laborator prezentați comparativ tipurile de inductoare. Se vor prezenta principalele elemente distinctive, structura constructivă, principalele caracteristici, parametrii mai importanți, domeniul de aplicație.

4.2. Având în vedere rezultatele obținute la punctul 3.1 (tabelul 4) realizați comparația inductoarelor din punctul de vedere al parametrilor incluși în tabel. Comentați eventualele diferențe între factorii de calitate mășurați și cei dați în catalog.

4.3. Comentați diferențele dintre valoarea rezistenței de curent continuu și a celei echivalente serie la frecvența de lucru (1kHz).

4.4. În foile de catalog nu este precizată explicit puterea nominală. Cum se poate estima capacitatea de disipare a puterii (în curent continuu) pe baza datelor din tabelul 4? Calculați puterea disipată pentru inductoarele L1-L15. Comentați rezultatele.

4.5. Cum explicați diferențele existente între factorii de calitate mășurați la punctul 3.2? Comentați pentru fiecare tip de inductor. De ce sunt diferiți factorii de calitate ai inductoarelor cu aceeași inductanță nominală L3, L7 și L13?

4.6. Din ce cauză frecvența proprie de rezonanță a inductoarelor L14 și L15 este diferită? Ce factori determină capacitatea parazită a inductoarelor?

4.7. Dacă la punctul 3.3 se aleg din graficul inductanței aparente pentru determinarea capacității parazite două frecvențe aflate în domeniul frecvențelor mici ce se obține?

4.8. În apropierea frecvenței de rezonanță inductanța aparentă are o valoare ridicată, aparent un lucru favorabil. De ce totuși se evită în funcționare apropierea de frecvență proprie de rezonanță?

5. Întrebări:

1. Cum depinde inductanța de elementele constructive ale inductorului: lungimea de bobinare, secțiunea bobinajului, numărul de spire, carcasa, miez magnetic, element de protecție, ecran, etc.

2. În ce condiții efectul secundar capacitiv prezent la un inductor influențează mai puțin funcționarea acestuia? Ce soluții există pentru micșorarea acestui efect nedorit.

3. În ce măsură carcasa pe care se realizează bobinarea (suportul de bobinare) influențează parametrii inductorului? Precizați care dintre ei.

4. Pentru ce frecvențe inductorul funcționează ca un condensator (datorită efectului capacitiv preponderent)? De ce?

5. De ce parametri constructivi sau de material depinde rezistența de curent continuu R_{cc} . Dar curentul nominal?

6. Un inductor liniar foarte scurt, practic un terminal al unei componente are inductanță?

7. Care este motivul pentru care în domeniul frecvențelor înalte se utilizează de regulă componente cu terminale pentru montarea pe suprafață (SMD) și nu cu terminale pentru inserție?

8. De ce inductanțele care iau naștere în mod nedorit (inductanțe parazite) nu trebuie trecute cu vederea în analiza circuitelor electronice ?

9. Un miez din alamă ce efect are asupra inductanței?

10. Capacitatea parazită a unei bobine depinde de:

- 1) izolația conductorului de bobinaj.
- 2) forma bobinei.
- 3) distanța dintre spirele bobinei.
- 4) suportul de bobinare.

11. Schema electrică echivalentă a unui inductor:

- 1) este un montaj de laborator.
- 2) este un circuit de măsură prezentat în cataloage.
- 3) reprezintă o încercare a fabricanților de inductoare de a minimiza efectele parazite ce apar în înaltă frecvență.
- 4) reprezintă o schemă electrică echivalentă ce modelează un inductor real.

12. Inductorul:

- 1) tinde asimptotic spre inductorul ideal odată cu creșterea frecvenței.
- 2) se îndepărtează de inductorul ideal odată cu creșterea frecvenței.
- 3) se manifestă în funcționare doar ca element disipativ de energie.
- 4) are flux de scăpări, pierderi ohmice și pierderi magnetice.

13. Inductanța aparentă paralel:

- 1) poate fi identificată în c.c. cu inductanța echivalentă.
- 2) ia valori extrem de mari în modul în apropierea frecvenței proprii de rezonanță a inductorului.
- 3) este negativă pentru frecvențe mai mari decât frecvența proprie de rezonanță.
- 4) are o valoare fixă ce poate fi obținută măsurând inductorul cu orice punte de JF.

Conținutul referatului: Referatul de laborator va conține toate tabelele completate cu măsurătorile efectuate în cadrul laboratorului precum și rezultatele calculelor solicitate în lucrare. Se vor trasa pe hârtie milimetrică graficele corespunzătoare variației inductanței aparente în gama de frecvență. În plus, referatul va trebui să cuprindă observații personale, concluzii și răspunsuri la întrebări.

Bibliografie

1. Cătuneanu V. ș.a., Tehnologie electronică, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1984.
2. Svasta P. ș.a., Componente pasive, Rezistoare, Cavaliotti, 2007.
3. Svasta P. ș.a., Tehnologie electronică, Componente pasive (îndrumar de laborator) editura UPB 1990.
3. Svasta P. ș.a., Componente electronice pasive - probleme, editura UPB, 2005.
4. *** Inductoare, diverse cataloage.
5. Svasta P. ș.a., Componente electronice pasive - Întrebări și răspunsuri, editura UPB, 1996.
6. www.cetti.ro

Tab. 4 Parametrii inductoarelor

Nr. crt.	Nume ref.	L_N [mH] *	t [%]	Q	f_Q [MHz]*	T_m [°C]	T_M [°C]	Frecvența proprie de rezonanță [MHz] *	I_N [mA]	Rcc [Ω]	L măș. [mH] *	Q măș	t calc. [%]	Rserie calc. [Ω]
1.	L1													
2.	L2													
3.	L3													
4.	L4													
5.	L5													
6.	L6													
7.	L7													
8.	L8													
9.	L9													
10.	L10													
11.	L11													
12.	L12													
13.	L13													
14.	L14													
15.	L15													

* Se vor utiliza unități de măsură adecvate fiecărei componente