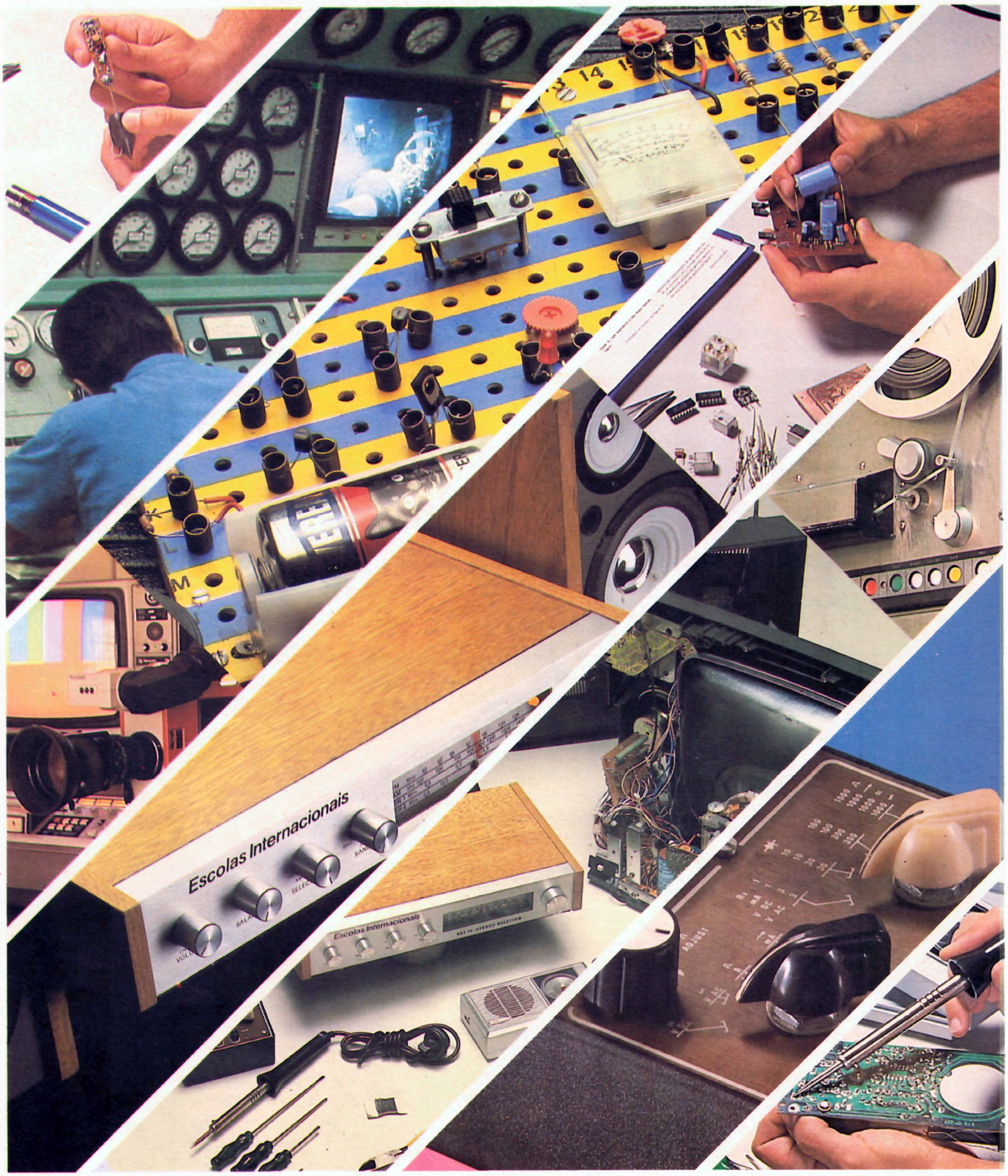
INDUTÂNCIA E INDUTORES REATÂNCIA INDUTIVA



Escolas Internacionais

Referência

016

Índice Geral

LIÇÃO Nº 8 – INDUTÂNCIA E INDUTORES – REATÂNCIA INDUTIVA

Introdução 9
1. Indução 9
2. Definição da indutância 12
3. Fatores que influem na indutância 12
4. Cálculo da indutância 12
5. Fatores de conversão da indutância 13
6. Indutância de bobinas com núcleo de ferro 13
7. Bobinas de uma camada, com núcleo de ar 14
8. Bobinas espiraladas, com núcleo de ar 15
9. Bobinas de muitas camadas, com núcleo de ar. 16
10. Reatância indutiva 17
11. Relações de fase nos circuitos indutivos 19
12. Impedância. 20
13. Impedância de circuitos indutivos 21
14. Influência da indutância no fator de potência 23
15. Combinações de indutâncias 23
16. Tipos de bobinas ou indutores 25
17. Bobinas de indutância variável 26
18. Cancelamento de indutâncias 27
19. Fator de mérito das bobinas 29
20. Constante de tempo de circuitos indutivos 30
21. Exercícios para recapitulação 32
Exame da lição nº 8. 33

Conteúdo didático programado e elaborado pela equipe técnico-pedagógica das Escolas Internacionais.

Copyright - International Textbook Company - ICS - International Correspondence Schools - Scranton, Pennsylvania - USA - Copyright - Direitos exclusivos no Brasil para ESCOLAS INTERNACIONAIS - São Paulo, SP - Brasil.

Reservados todos os direitos. Proibida a reprodução total ou parcial do texto e das ilustrações por qualquer forma ou meio, sem prévia autorização por escrito dos detentores do copyright. Edições ou reproduções não autorizadas estarão sujeitas às penalidades da Lei.

Escolas Internacionais

Impresso no parque gráfico das Escolas Internacionais do Brasil.

Introdução

Todos os condutores ou circuitos elétricos apresentam uma oposição a qualquer variação na corrente elétrica que os atravessa, por causa do fenômeno da auto-indução. Esta propriedade que é apresentada pelos condutores ou circuitos recebe o nome de indutância.

Nesta lição você irá estudar a indutância e o efeito que ela provoca sobre a corrente elétrica, que é o de retardar qualquer alteração na corrente.

Como as bobinas apresentam uma indutância muito maior que os condutores retos, esta lição apresenta em detalhes os vários tipos de bobinas, as várias formas de se combinar bobinas, e como se procede para calcular a indutância em cada tipo de bobina ou indutor.

Para os circuitos de corrente alternada, a oposição à passagem da corrente depende não só da indutância, mas também da freqüência da corrente. No capítulo referente à "Reatância Indutiva" você aprenderá como se determina esta oposição para diversos valores de indutância e correntes em variadas freqüências.

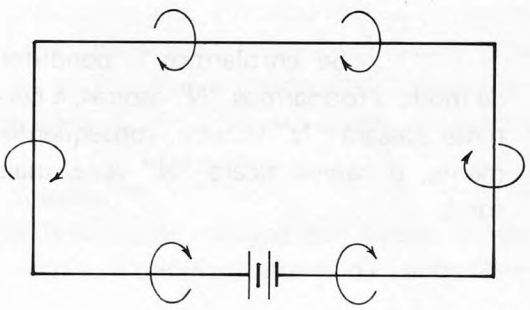
Finalmente, para os circuitos que apresentam resistores e indutores, você aprenderá como se determina a oposição total à passagem de uma corrente elétrica, ou seja, a impedância de um circuito.

Indutância e Indutores — Reatância Indutiva

1- Indução

Conforme você já estudou nas lições anteriores, toda vez que uma corrente elétrica atravessa um condutor, um campo magnético é produzido ao redor desse condutor.

A representação do campo magnético é feita graficamente através de linhas orientadas que recebem o nome de ***linhas de força.*** A figura 1 apresenta um circuito fechado, onde as linhas de força estão indicando a existência de um campo magnético ao redor do condutor.



A intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à corrente que atravessa o condutor.

Dizer que a intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à corrente que atravessa o condutor, significa que quanto maior a corrente, maior a intensidade do campo magnético.

A *intensidade de um campo magnético* é representada pelo *número de linhas de força* que envolvem o condutor. Quanto mais intenso o campo, maior o núme-

Direitos reservados

ro de linhas de força. É por essa razão que costuma-se dizer que os ***campos magnéticos fortes*** são constituídos de ***muitas linhas de força,*** enquanto que os ***campos magnéticos fracos*** são constituídos por ***poucas linhas de força.***

Teoricamente, o campo magnético se estende do condutor até o infinito. Na prática, porém, isso não acontece, pois o campo magnético se enfraquece à medida que se afasta do condutor. Então, a partir de um determinado ponto, a intensidade do campo é tão pequena que não apresentará efeitos que possam ser observados ou medidos.

Existem diversas maneiras de se fazer com que um campo magnético seja forte. A primeira delas consiste em ***aumentar a corrente*** que passa pelo condutor. Entretanto, essa não é a melhor maneira. Pode-se obter um resultado melhor, fazendo com que a corrente ***"passe de novo" pelo mesmo ponto.*** Isso faz com que este ponto apresente um ***campo mais forte.*** Veja a figura 2.

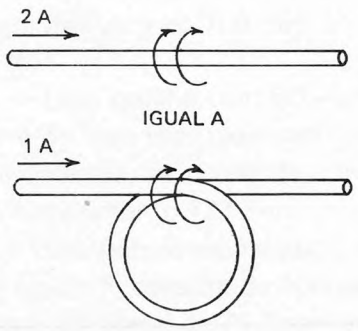


Fig. 2 — Para aumentar a intensidade do campo magnético, deve-se aumentar a corrente ou fazê-la passar mais vezes pelo mesmo ponto.

Se enrolarmos o condutor de modo a formarmos "N" espiras, a corrente passará "N" vezes e, conseqüentemente, o campo ficará "N" vezes mais forte.

Um outro modo de se aumentar a intensidade do campo magnético, consiste em enrolar as espiras do condutor sobre um ***material ferromagnético.*** Estes materiais conseguem ***concentrar as linhas de força magnética,*** aumentando-lhes, assim, ainda mais o efeito.

Toda vez que houver ***alteração no número de linhas de força magnética*** contidas no interior de uma espira, esta alteração causará (induzirá) uma ***força-eletromotriz*** (f.e.m.) na espira.

A f.e.m. causada pela alteração no número de linhas de força, pode ser estabelecida de três maneiras: a) indução eletromagnética; b) indução mútua; c) auto-indução.

1.1 – INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Indução eletromagnética é o nome que se dá ao fenômeno da produção de uma f.e.m. num condutor, quando houver um movimento relativo entre esse condutor e um campo magnético.

O ***gerador*** de corrente alternada (alternador) é o exemplo mais comum da indução eletromagnética. As espiras presas ao rotor são giradas dentro de um campo magnético. É desse modo que se gera a corrente alternada. A figura 3 apresenta o esquema de um gerador.

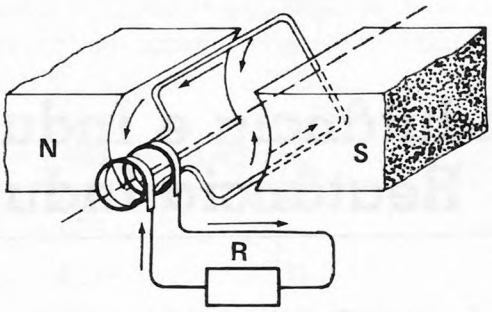


Fig. 3 — Esquema de um alternador

1.2 – INDUÇÃO MÚTUA

A alteração no número de linhas de força pode ser provocada sem movimento do campo ou do condutor.

Quando dois circuitos são percorridos por correntes variáveis, um circuito causa no outro uma f.e.m.. Este fenômeno recebe o nome de indução mútua.

O ***transformador*** constitui o exemplo típico da indução mútua. Vamos analisar como se dá a indução mútua em um

Direitos reservados

transformador, quando ele é percorrido por uma corrente contínua e quando é percorrido por uma corrente alternada.

Basicamente, o transformador é constituído de ***dois enrolamentos,*** conforme está ilustrado na figura 4.

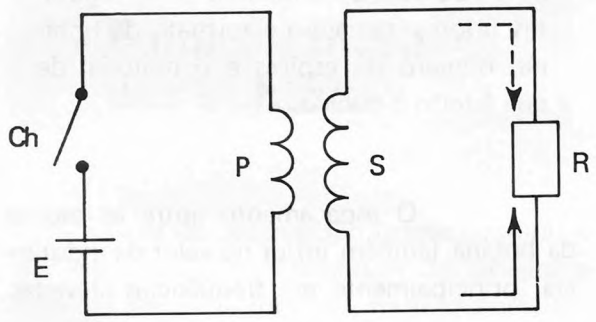


Fig. 4 — Circuito com transformador.

Vamos inicialmente analisar como se dá a indução mútua, quando a fonte fornece ***corrente contínua.***

Um dos enrolamentos, chamado de ***primário*** (P), é ligado a uma bateria (E) ou outra fonte de força-eletromotriz. Quando a chave (Ch) for fechada, a corrente começará a fluir através do primário, estabelecendo um campo magnético. Este é um campo que varia desde o zero até o seu valor máximo, no mesmo tempo que a corrente leva para ir do zero até seu valor máximo.

Estando dentro desse campo magnético produzido pelo primário, o enrolamento ***secundário*** (S) tem induzido em suas espiras uma f.e.m. que faz circular uma corrente através da resistência (R). Esta corrente flue no sentido indicado pela seta com um traço cheio, somente enquanto a corrente no primário estiver variando. Quando a corrente no primário atingir o seu valor máximo, ela não mais irá variar, pois a f.e.m. aplicada é constante. Desse modo, não havendo variação na intensidade da corrente, deixa de existir variação no campo magnético e, conseqüentemente, também deixa de existir a f.e.m. induzida no secundário. Assim, não passa mais corrente através da resistência (R).

A f.e.m. induzida no secundário tornará a aparecer quando a chave (Ch) for aberta. Nessa nova situação (chave aberta), a corrente do primário cai imediatamente para zero. Esta alteração na corrente provoca uma variação no campo magnético que envolve os dois enrolamentos do transformador. Esta variação no campo faz aparecer, por alguns momentos, uma f.e.m. no secundário. Então, uma corrente passará através da resistência (R). Só que esta corrente apresentará um sentido contrário daquela que passou pela resistência quando a chave foi fechada. Na figura 4, o sentido desta corrente está indicado por uma linha interrompida.

Desse modo, a f.e.m. induzida no secundário só aparece nos breves momentos em que a chave é fechada ou aberta.

Por outro lado, quando a corrente que passa pelo primário for uma ***corrente alternada,*** a f.e.m. induzida no secundário existirá o tempo todo. Desse modo, enquanto estiver passando corrente no primário, uma corrente alternada também estará passando através da resistência (R).

Isso acontece porque, em se tratando de uma corrente alternada, a intensidade da corrente varia o tempo todo e, conseqüentemente, o campo magnético também varia o tempo todo, provocando a f.e.m. induzida no secundário.

1.3 — AUTO-INDUÇÃO

Quando a corrente que passa por uma bobina for alterada, o campo magnético produzido por esta corrente também sofre uma variação. Esta alteração no número de linhas de força provoca o aparecimento de uma f.e.m. induzida, que por causa das suas características recebe o nome de ***força-contra-eletromotriz*** (f.c.e.m.).

A f.c.e.m. é causada pela variação no campo magnético do próprio condutor. Este fenômeno recebe o nome de auto-indução.

A força-contra-eletromotriz apresenta uma ***oposição a qualquer variação na corrente.*** Os efeitos da auto-indução são os seguintes:

a) opõe-se à passagem da corrente quando o circuito for fechado;

b) tende a prolongar a corrente quando o circuito for aberto;

c) tende a manter o mesmo valor da corrente, quando esta for forçada a variar (para mais ou para menos).

Direitos reservados

Mas, a corrente ***sempre sofrerá a mudança*** que lhe está sendo imposta. Só que esta mudança não é instantânea: é contrariada, durante algum tempo, pela f.e.m. auto-induzida (f.c.e.m.).

2 - Definição da indutância

Todos os condutores ou circuitos elétricos se opõem a qualquer variação em sua corrente, por causa do fenômeno da auto-indução. Esta propriedade apresentada pelos condutores e circuitos recebe o nome de ***indutância.***

A oposição apresentada pelos condutores e circuitos é tanto maior, quanto mais rápida for a alteração provocada. Porém, a corrente sempre sofrerá a mudança que lhe está sendo imposta.

Desse modo, ***o efeito da indutância é o de retardar qualquer alteração na corrente.*** Num circuito praticamente sem indutância, a alteração de sua corrente é imediata, enquanto que num circuito com grande indutância a mudança se realizará algum tempo depois.

Todo circuito apresenta indutância, num grau maior ou menor. A indutância pode estar distribuída ao longo do circuito ou concentrada em componentes (bobina, indutor ou transformador). Por exemplo: num pedaço reto de um condutor, a indutância está distribuída ao longo do seu comprimento, enquanto que uma ***bobina ou indutor apresenta a indutância de forma concentrada.***

O circuito completo, onde a indutância aparece numa ou noutra forma, chama-se circuito indutivo.

3 - Fatores que influem na indutância

O valor da indutância apresentada por um circuito depende de muitos fatores.

Mas, os principais fatores são: comprimento e disposição dos condutores. ***Os condutores retos apresentam indutâncias muito pequenas.*** As bobinas, ao contrário, têm indutâncias muito elevadas.

O valor da indutância de uma bobina é determinado pelos seguintes fatores: tamanho e formato da bobina, número de espiras e o material de que é feito o núcleo.

O espaçamento entre as espiras da bobina também influi no valor da indutância, principalmente em freqüências elevadas.

4 - Cálculo da indutância

Algumas das leis da indução eletromagnética foram descobertas pelo físico Joseph Henry. Então, em sua homenagem, foi dado o nome de ***henry (H)*** à unidade de medida da indutância.

Antigamente o henry era definido da seguinte forma: uma bobina de 1 espira tem uma indutância de 1 H, quando a corrente de 1 A (ampère) que a percorre produz no circuito magnético 100 milhões de linhas de força.

Modernamente, a definição oficial é a seguinte:

A indutância de um circuito é de ***1 H*** quando é induzida uma f.e.m. de 1 v por uma corrente que varia à razão de 1 A por segundo.

A fórmula que permite calcular a indutância de uma bobina é a seguinte:

$$L = \frac{1{,}26\ N^2\ \mu\ A}{10^7\ \ell} \qquad (8.1)$$

L = indutância em henry (H)
N = número de espiras
μ = permeabilidade do material do núcleo (lê-se "mi")
ℓ = comprimento da bobina em mm
A = área da espira em mm^2.

No caso de bobinas com núcleo de ferro, o valor exato da permeabilidade do material magnético é difícil de determinar, pois depende dos tratamentos aplicados ao material. Por isso, na prática, ***é melhor medir a indutância com um medidor apropriado.*** Entretanto, ***a fórmula é útil para determinar a ordem de grandeza da indutância da bobina.*** Fórmulas práticas para casos particulares serão dadas a seguir.

Muitas vezes o henry é muito grande para indicar o valor encontrado para a indutância. Usa-se, então, os seus submúltiplos:

1 milihenry (1 mH) = $\frac{1\ H}{10^3}$ = 0,001 H =

= 1×10^{-3} H.

1 microhenry (1 μ H) = $\frac{1\ H}{10^6}$ = 0,000 001 H=

= 1×10^{-6} H.

5 - Fatores de conversão da indutância

As seguintes fórmulas são empregadas para a conversão do valor de uma indutância:

1 000 x (valor em H) = valor em mH (8.2)

1 000 000 x (valor em H) = valor em μ H (8.3)

0,001 x (valor em mH) = valor em H (8.4)

1 000 x (valor em mH) = valor em μH (8.5)

0,001 x (valor em μH) = valor em mH (8.6)

0,000 001 x (valor em μH) = valor em H (8.7)

Exemplo 1

Converter 8 H para: a) milihenrys; b) microhenrys.

Solução

a) Aplicando-se a fórmula 8.2, tem-se:

1 000 x 8 = 8 000 mH

b) Aplicando-se a fórmula 8.3, tem-se:

1 000 000 x 8 = 8 000 000 μH

Exemplo 2

Converter 57 mH em: a) henrys; b) microhenrys.

Solução

a) Aplicando-se a fórmula 8.4, tem-se:

0,001 x 57 = 0,057 H

b) Aplicando-se a fórmula 8.5, tem-se:

1 000 x 57 = 57 000 μH

Exemplo 3

Converter 270 μH em: a) henrys; b) milihenrys.

Solução

a) Aplicando-se a fórmula 8.7, tem-se:

0,000 001 x 270 = 0,000 27 H

b) Aplicando-se a fórmula 8.6, tem-se:

0,001 x 270 = 0,27 mH

6 - Indutância de bobinas com núcleo de ferro

A indutância de bobinas com as espiras uniformemente distribuídas pode ser calculada com boa precisão. Entretanto, a indutância de bobinas com núcleo de ferro é difícil de calcular, pois a permeabilidade do caminho magnético varia muito conforme o tipo dos materiais combinados com o ferro.

Para se determinar a indutância de uma bobina com núcleo de ferro, é necessário levar em consideração a permeabilidade do material. Observe na fórmula 8.1 que a permeabilidade (μ) é um dos fatores que entram no cálculo da indutância (L).

Para as bobinas com núcleo de ar, existem fórmulas práticas que permitem calcular o valor da indutância. Estas fórmulas foram determinadas através da observação de

Direitos reservados

inúmeras experiências, e os resultados obtidos através dessas fórmulas são bem próximos dos valores reais, desde que sejam obedecidas as condições de aplicabilidade.

As fórmulas para se determinar a indutância de bobinas com núcleo de ar são apresentadas nos capítulos seguintes.

7 - Bobinas de uma camada, com núcleo de ar

As bobinas de uma camada, com núcleo de ar, são construídas com as espiras enroladas lado a lado, sobre um tubo de material não magnético. Este tubo pode ser de cerâmica, poliestireno, baquelite ou outro material não magnético.

Quando as espiras são colocadas muito próximas uma da outra, é necessário isolá-las para evitar "curtos". Normalmente, a isolação dos condutores que compõem as espiras é feita pintando-os com esmalte.



Cortesia da International Textbook Co.

Fig. 5 – Bobina de uma camada, com núcleo de ar.

O cálculo da indutância para este tipo de bobina é feito através da seguinte fórmula:

$$L = \frac{a^2 N^2}{25{,}4\,(9a + 10b)} \qquad (8.8)$$

L = indutância, em μH.
a = raio da bobina, em mm.
b = comprimento da bobina, em mm.
N = número de espiras da bobina.

As medições do comprimento e do raio da bobina devem ser feitas de acordo com a indicação apresentada na figura 6, onde temos uma vista em corte da bobina.

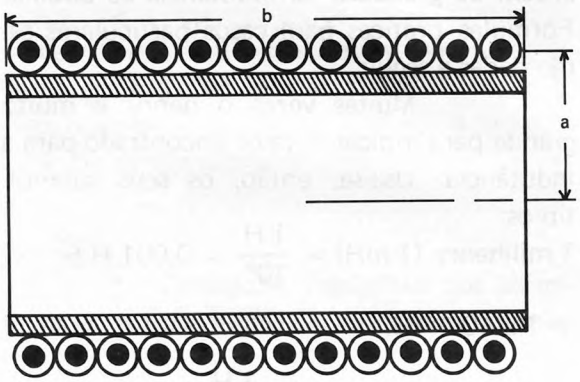


Fig. 6 – Vista em corte de uma bobina com as espiras enroladas helicoidalmente, numa só camada.

Se o comprimento da bobina for maior que o triplo do tamanho do raio ($b > 3a$), os resultados obtidos para a indutância através da fórmula 8.8 apresentam uma precisão muito boa (erro menor que 1%). Mas, mesmo que "b" apresente o mesmo valor que "a", a precisão será razoável.

Exemplo

Uma bobina apresenta 60 espiras de fio esmaltado nº 22, com duas capas de algodão, enroladas sobre um tubo isolante de 76,2 mm de diâmetro. O comprimento da bobina é de exatamente 152,4 mm. Determinar a indutância da bobina.

Solução

De acordo com a indicação da figura 6, o raio "a" é medido do centro do condutor que forma a espira, até o centro do tubo isolante. Isto é, ao raio do tubo deve ser acrescentado metade do diâmetro do condutor e mais as espessuras do esmalte e das 2 camadas de algodão que recobrem o fio. Entretanto, considerando-se as medidas neste caso, em que o fio apresenta um diâmetro menor que 1 mm (fio nº 22), e o tubo apresenta um diâmetro de 76,2 mm, pode-se desprezar as dimensões do fio e das camadas isolantes. O resultado não será influenciado, praticamente, por esta aproximação.

Desse modo, o raio "a" será metade do diâmetro do tubo:

$$a = \frac{76,2}{2} \qquad a = 38,1 \text{ mm}$$

Observe que o comprimento "b" é maior que o triplo do raio "a": 152,4 > 3 x x 38,1. Isso significa que a precisão será boa.

Aplicando-se a fórmula 8.8, determinaremos o valor da indutância.

$$L = \frac{a^2\ N^2}{25,4\ (9a + 10b)}$$

$$L = \frac{(38,1)^2 \times (60)^2}{25,4\ (9 \times 38,1 + 10 \times 152,4)}$$

$$L = \frac{38,1 \times 38,1 \times 60 \times 60}{25,4\ (342,9 + 1524)}$$

$$L = \frac{5\ 225\ 796}{47\ 419,26} \Rightarrow \underline{\underline{L = 110,2\ \mu H}}$$

8 - Bobinas espiraladas, com núcleo de ar

A indutância de uma bobina espiralada com núcleo de ar, como a mostrada na figura 7, pode ser calculada através da fórmula seguinte:

$$L = \frac{a^2\ N^2}{25,4\ (8a + 11c)} \qquad (8.9)$$

L = indutância, em μH.
N = número de espiras.
a = raio médio da bobina, em mm.
c = espessura do enrolamento em mm.

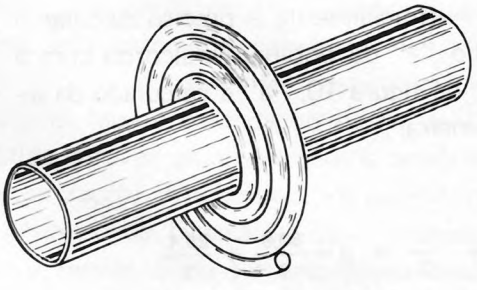


Fig. 7 — Bobina espiralada com núcleo de ar.

O raio médio "a" da bobina é determinado levando-se em consideração a espessura do enrolamento e o diâmetro do tubo isolante. Veja a figura 8.

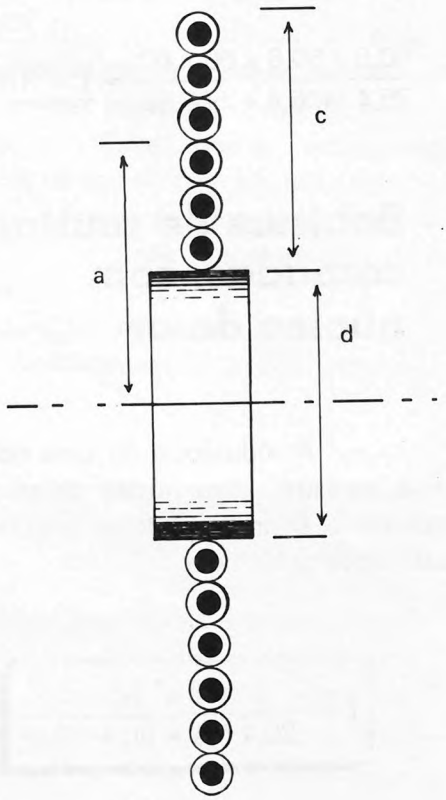


Fig. 8 — Vista em corte de uma bobina espiralada.

Como você pode verificar pela figura 8, o raio médio "a" é calculado da seguinte forma: $a = \frac{d}{2} + \frac{c}{2}$.

Exemplo

Uma bobina espiralada contém 60 espiras de fio esmaltado n° 22, com 2 capas de algodão, enroladas sobre um tubo com 50,8 mm. A espessura do enrolamento mede 50,8 mm. Qual o valor da indutância dessa bobina?

Solução

Primeiramente vamos determinar o valor do raio médio "a", a partir do valor da espessura das espiras e do diâmetro do tubo.

$$a = \frac{d}{2} + \frac{c}{2} \Rightarrow a = \frac{50,8}{2} + \frac{50,8}{2}$$

$$a = 50,8 \text{ mm.}$$

Em seguida, aplicando-se a fórmula 8.9, determinaremos o valor da indutância da bobina.

Direitos reservados

$$L = \frac{a^2\ N^2}{25,4\ (8a + 11c)}$$

$$L = \frac{(50,8)^2 \times (60)^2}{25,4\ (8 \times 50,8 + 11 \times 50,8)}$$

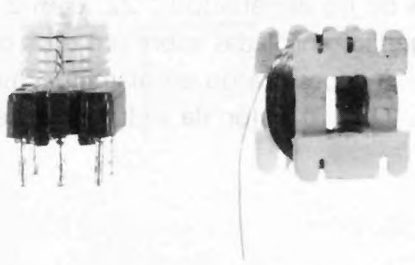
$$L = \frac{50,8 \times 50,8 \times 60 \times 60}{25,4\ (406,4 + 558,8)} \Rightarrow \underline{\underline{L = 378,9\ \mu H}}$$

9 - Bobinas de muitas camadas, com núcleo de ar

A indutância de uma bobina de muitas camadas, com núcleo de ar, como a mostrada na figura 9, pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$L = \frac{0,8\ a^2\ N^2}{25,4\ (6a + 9b + 10c)} \qquad (8.10)$$

L = indutância da bobina, em μH.
N = número de espiras.
a = raio médio da bobina, em mm.
b = comprimento da bobina, em mm.
c = espessura do enrolamento, em mm.



Cortesia da International Textbook Co.

Fig. 9 — Bobina de muitas camadas, com núcleo de ar.

Os valores do raio médio da bobina, comprimento da bobina e espessura do enrolamento, são determinados de acordo com a indicação na figura 10.

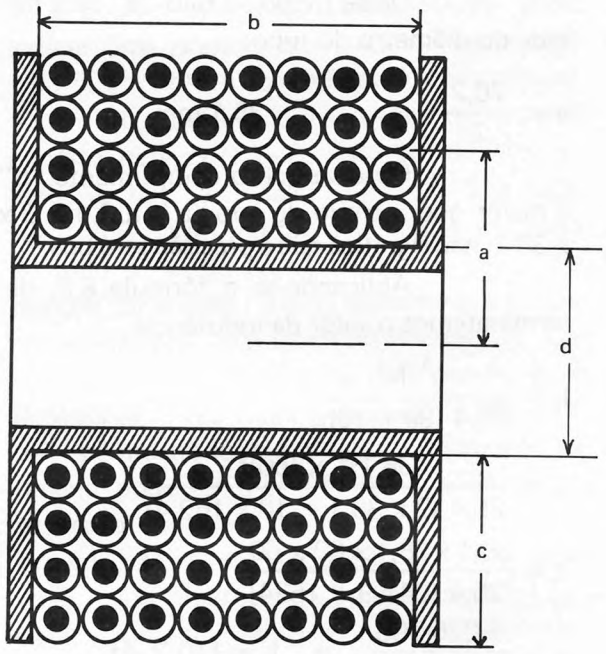


Fig. 10 — Vista em corte de uma bobina multi-camadas, com núcleo de ar.

A fórmula 8.10 permite obter bons resultados (erro menor que 1%), quando os valores de "6a", "9b" e "10c" forem próximos.

Exemplo

Uma bobina multi-camadas é enrolada sobre um tubo isolante com diâmetro de 50,8 mm. O fio usado é o fio de cobre esmaltado nº 22, com 2 camadas de algodão. O enrolamento é feito em 30 camadas de 30 espiras cada. O comprimento e a espessura das bobinas é de 25,4 mm. Calcular a indutância da bobina.

Solução

Inicialmente é preciso calcular o raio médio "a" da bobina. De acordo com a indicação da figura 10, "a" é calculado da seguinte maneira:

$$a = \frac{d}{2} + \frac{c}{2} \Rightarrow a = \frac{50,8}{2} + \frac{25,4}{2}$$

$$a = 25,4 + 12,7 \Rightarrow a = 38,1\ mm.$$

Direitos reservados

Como a bobina apresenta 30 camadas com 30 espiras cada camada, o número "N" de espiras será:

N = 30 camadas x 30 espiras ⇒ N = 900 espiras

O valor da indutância é calculado através da fórmula 8.10:

$$L = \frac{0{,}8\ a^2\ N^2}{25{,}4\ (6a + 9b + 10c)}$$

$$L = \frac{0{,}8 \times (38{,}1)^2 \times (900)^2}{25{,}4\ (6 \times 38{,}1 + 9 \times 25{,}4 + 10 \times 25{,}4)}$$

$$L = \frac{0{,}8 \times 38{,}1 \times 38{,}1 \times 900 \times 900}{25{,}4\ (228{,}6 + 228{,}6 + 254{,}0)}$$

$$L = 52\,071\ \mu H$$

Como o resultado obtido apresentou um número muito grande (maior que 1 000), deve-se fazer a conversão para milihenry, de acordo com a fórmula 8.6 e fazer a aproximação:

L = 0,001 x 52 071 μH ⇒ L = 52,1 mH

Este resultado apresenta uma precisão muito boa, pois os valores de "6a", "9b" e "10c" apresentam a mesma ordem de grandeza:

6a = 6 x 38,1 = 228,6
9b = 9 x 25,4 = 228,6
10c = 10 x 25,4 = 254,0

10 - Reatância indutiva

A oposição à passagem de uma corrente alternada provocada pela indutância de uma bobina, chama-se ***reatância indutiva*** da bobina.

A reatância indutiva é expressa em ***ohms*** (Ω). Além de limitar a corrente alternada no circuito, ***a reatância indutiva faz com que a corrente se atrase em relação à tensão.***

O cálculo da reatância indutiva de uma bobina é feito através da seguinte fórmula:

$$X_L = 2\pi f L \qquad (8.11)$$

X_L = reatância indutiva, em ohms.
π = 3,14 (letra grega, lê-se "pi").
f = freqüência da corrente, em hertz.
L = indutância da bobina, em henrys.

Você já aprendeu pelas lições anteriores, que a ***corrente alternada*** tem o seu valor alterado a todo instante. A variação da direção e da intensidade de uma corrente alternada pode ser representada por uma ***curva senoidal.*** Veja a figura 11, onde estão representadas as ondas de duas corrente alternadas (I_1 e I_2).

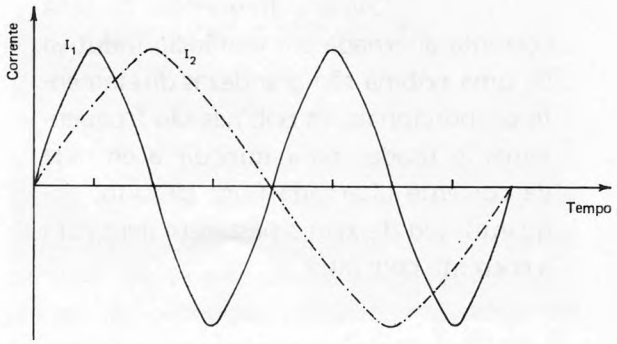


Fig. 11 — Correntes alternadas com freqüências diferentes.

Observe na figura 11, que para a corrente I_1 estão representados dois ciclos completos, enquanto que para a corrente I_2 está representado apenas um ciclo completo. Então, para um ***mesmo intervalo de tempo,*** a corrente I_1 realizou dois ciclos, enquanto que a corrente I_2 realizou apenas um ciclo completo. Numa situação deste tipo, dizemos que as correntes I_1 e I_2 apresentam freqüências diferentes.

Freqüência de uma corrente alternada é o número de ciclos realizados pela onda, em cada segundo. Um ciclo por segundo corresponde a 1 ***hertz,*** que é a unidade de medida da freqüência.

Desse modo, se o tempo gasto pela corrente I_2 para realizar o seu ciclo completo for de 1 segundo, a sua freqüência é de 1 hertz. Logo, a freqüência da corrente I_1 é de 2 hertz, pois realiza dois ciclos completos no mesmo intervalo de tempo.

A maioria das correntes alternadas que alimentam as residências, apresentam uma freqüência de 60 hertz (60 ciclos por segundo).

Examinando a fórmula 8.11, verificamos que ***a freqüência da corrente alternada e a reatância indutiva da bobina são grandezas diretamente proporcionais.*** Isto é, quando a freqüência aumenta, a reatância indutiva também aumenta; quando a freqüência diminui, a reatância indutiva também diminui.

Como a freqüência de uma corrente alternada e a reatância indutiva de uma bobina são grandezas diretamente proporcionais, as bobinas são freqüentemente usadas para impedir a entrada da corrente alternada num circuito, enquanto que deixam a passagem livre para a corrente contínua.

Através da fórmula 8.11 podemos concluir, também, que ***a reatância indutiva e a indutância da bobina são grandezas diretamente proporcionais.*** Então, para uma determinada freqüência, a reatância indutiva de uma bobina com grande valor de indutância é maior do que a reatância indutiva de outra bobina com valor menor de indutância.

Os exemplos a seguir servirão para mostrar como varia a reatância indutiva, em função da freqüência e da indutância.

Exemplo 1

Determinar as reatâncias indutivas de uma bobina de 1 henry, nas seguintes freqüências:
a) 60 Hz; b) 120 Hz; c) 400 Hz; d) 1 kHz.

Solução

Para determinarmos o valor da reatância indutiva, iremos aplicar, em todos os casos, a fórmula 8.11: $X_L = 2 \pi f L$.

a) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 60 \times 1$

$X_L = 376{,}8\ \Omega = 377\ \Omega$

b) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 120 \times 1$

$X_L = 753{,}6\ \Omega = 754\ \Omega$

c) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 400 \times 1$

$X_L = 2\,512\ \Omega = 2{,}51 \times 10^3\ \Omega$ ou $2{,}51\ k\Omega$

d) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 1\,000 \times 1$

$X_L = 6\,280\ \Omega = 6{,}28 \times 10^3\ \Omega$ ou $6{,}28\ k\Omega$

Exemplo 2

Determinar as reatâncias indutivas das seguintes bobinas, na freqüência de 500 Hz:
a) 250 μH; b) 50 mH; c) 0,75 H; d) 3,5 H.

Solução

Para determinarmos o valor da reatância indutiva, iremos aplicar, em todos os casos, a fórmula 8.11: $X_L = 2 \pi f L$.

a) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 500 \times 0{,}000\,25$

$X_L = 0{,}785\ \Omega = 785\ m\Omega$

b) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 500 \times 0{,}05$

$X_L = 157\ \Omega$

c) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 500 \times 0{,}75$

$X_L = 2\,355\ \Omega = 2{,}36 \times 10^3\ \Omega = 2{,}36\ k\Omega$

d) $X_L = 2 \times 3{,}14 \times 500 \times 3{,}5$

$X_L = 10\,990\ \Omega = 1{,}10 \times 10^4\ \Omega = 11{,}0\ k\Omega$

Quando a reatância indutiva e a freqüência forem conhecidas, pode-se ***calcular a indutância,*** rearrumando a fórmula 8.11 da seguinte maneira:

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} \qquad (8.12)$$

Para uma determinada freqüência, existe uma proporcionalidade direta entre a reatância indutiva e a indutância de uma bobina. Por outro lado, ***a indutância é inversamente proporcional à freqüência.*** Então, a indutância que uma bobina deve ter para produzir um dado valor de reatância indutiva, é maior em freqüências baixas do que em freqüências altas. Veja o exemplo seguinte.

Exemplo 3

Determinar a indutância que uma bobina deve ter, para apresentar uma reatância indutiva de 1 kΩ, nas seguintes freqüências: a) 60 Hz; b) 120 Hz; c) 400 Hz; d) 1 kHz.

Direitos reservados

Solução

Para determinarmos o valor da indutância que a bobina deve apresentar, iremos aplicar, em todos os casos, a fórmula 8.12:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

a) $L = \dfrac{1\,000}{2 \times 3{,}14 \times 60} \Rightarrow \underline{\underline{L = 2{,}65\ H}}$

b) $L = \dfrac{1\,000}{2 \times 3{,}14 \times 120} \Rightarrow \underline{\underline{L = 1{,}33\ H}}$

c) $L = \dfrac{1\,000}{2 \times 3{,}14 \times 400}$

$\underline{\underline{L = 0{,}398\ H \text{ ou } 398\ mH}}$

d) $L = \dfrac{1\,000}{2 \times 3{,}14 \times 1\,000}$

$\underline{\underline{L = 0{,}159\ H \text{ ou } 159\ mH}}$

Da mesma forma como foi feito para a indutância, a fórmula 8.11 pode ser rearranjada para se ***calcular a freqüência,*** onde um dado valor de indutância produz um determinado valor de reatância indutiva. A fórmula que permite calcular a freqüência é a seguinte:

$$\boxed{f = \frac{X_L}{2\pi L}} \qquad 8.13$$

É óbvio que as relações entre a freqüência e a reatância indutiva ou a indutância, continuam exatamente as mesmas, ou seja, ***a freqüência é diretamente proporcional à reatância indutiva, e inversamente proporcional à indutância.*** Assim, um determinado valor de reatância indutiva pode ser produzido por uma bobina de baixa indutância trabalhando em alta freqüência, ou, este mesmo valor pode ser conseguido através de uma bobina de alta indutância trabalhando em baixa freqüência. Veja o exemplo seguinte.

Exemplo 4

Determinar as freqüências em que uma reatância indutiva de 2 kΩ será produzida pelas seguintes bobinas:
a) 300 μH; b) 75 mH; c) 450 mH; d) 7 H.

Solução

Para determinarmos o valor da freqüência que as correntes devem apresentar, iremos aplicar, em todos os casos, a fórmula 8.13:

$$f = \frac{X_L}{2\pi L}$$

a) $f = \dfrac{2\,000}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}000\,3}$

$\underline{\underline{f = 1\,061\,571\ Hz \text{ ou } 1{,}06\ MHz.}}$

b) $f = \dfrac{2\,000}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}075}$

$\underline{\underline{f = 4\,246\ Hz \text{ ou } 4{,}25\ kHz}}$

c) $f = \dfrac{2\,000}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}45}$

$\underline{\underline{f = 707{,}7\ Hz = 708\ Hz}}$

d) $f = \dfrac{2\,000}{2 \times 3{,}14 \times 7}$

$\underline{\underline{f = 45{,}5\ Hz}}$

11 - Relações de fase nos circuitos indutivos

Neste capítulo nós vamos analisar as relações de fase entre a tensão aplicada (f.e.m.), a força-contra-eletromotriz (f.c.e.m. – a tensão induzida pelo campo magnético) e a corrente alternada resultante, num circuito indutivo.

Inicialmente vamos considerar um circuito indutivo que apresenta somente reatância indutiva e nenhuma resistência.

Num ***circuito puramente indutivo*** (sem resistências), a ***corrente*** se encontra ***atrasada de 90°*** em relação à ***tensão aplicada*** (f.e.m.). Esta corrente alternada provoca o aparecimento de um campo magnético, cuja variação acompanha a variação da corrente. As mudanças que ocorrem nesse campo magnético produzem, por auto-indução, uma força-

Direitos reservados

contra-eletromotriz (f.c.e.m.). A ***f.c.e.m.*** produzida, num circuito puramente indutivo, apresenta-se ***90° atrasada*** em relação à ***corrente*** ou ao fluxo magnético, e ***180° atrasada*** em relação à ***tensão aplicada*** (f.e.m.). Veja a representação destas relações na figura 12.

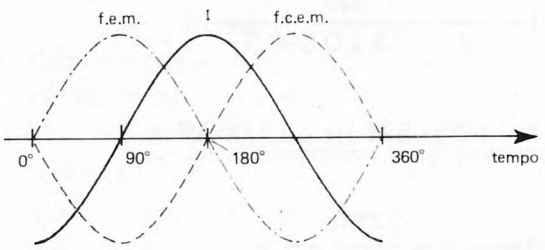


Fig. 12 — Curvas mostrando as relações de fase num circuito indutivo.

Observe na figura 12 que a ***f.e.m. e a f.c.e.m. estão em completa oposição,*** por causa do atraso de 180°. Conseqüentemente, no caso teórico de não haver resistência no circuito, ***a corrente é limitada só pela reatância indutiva*** e está atrasada de 90° em relação à tensão aplicada.

Num circuito puramente indutivo, nenhuma potência será perdida, pois a potência só pode ser dissipada em resistências. Numa bobina sem resistência, toda a energia é armazenada em forma de campo magnético e devolvida inteiramente ao circuito.

Na prática, todos os circuitos apresentam uma resistência, por menor que seja. Por isso, o atraso na corrente não será exatamente de 90°. Da mesma forma, a f.e.m. e a f.c.e.m. também não estarão exatamente em oposição. Esta pequena diferença entre a f.e.m. e a f.c.e.m. fará com que circule corrente pelo circuito.

Como toda bobina apresenta uma resistência, a corrente que circula pela bobina terá uma perda de potência. Esta potência perdida ou dissipada pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = R \times I^2 \qquad (8.14)$$

P = potência dissipada.
R = resistência do fio da bobina.
I = corrente que circula pela bobina.

Quanto maior a resistência da bobina, menor será o atraso entre a tensão aplicada e a corrente. Da mesma forma, também será menor o atraso entre a f.c.e.m. e a corrente.

Assim, o ângulo de defasagem entre a f.e.m. e a corrente pode variar desde 0°, num circuito puramente resistivo, até praticamente 90°, num circuito com resistência desprezível.

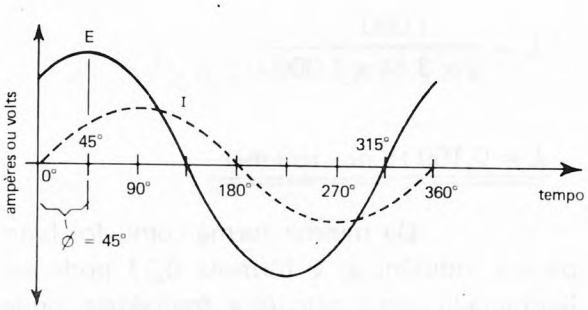


Fig. 13 — Ondas da tensão e corrente em um circuito com reatância indutiva igual à resistência.

12 - Impedância

A impedância de um circuito é a soma de todas as oposições à passagem da corrente alternada.

As oposições à passagem de uma corrente alternada podem ser provocadas por ***resistências, reatâncias indutivas, reatâncias capacitivas e efeito peculiar.*** As três primeiras têm influências distintas em praticamente todos os circuitos de corrente alternada. Quanto ao efeito peculiar, este só é considerável em circuitos que apresentem freqüências muito altas e em condutores sólidos e grandes.

A relação entre a tensão, corren-

te e impedância num circuito de corrente alternada, é semelhante à Lei de Ohm. Assim, as fórmulas que permitem calcular estas três grandezas são as seguintes:

$$I = \frac{E}{Z} \qquad (8.15)$$

$$E = I \times Z \qquad (8.16)$$

$$Z = \frac{E}{I} \qquad (8.17)$$

Z = impedância, em ohms.
E = tensão, em volts.
I = corrente, em ampères.

Observe que estas fórmulas ficam iguais às da Lei de Ohm se trocar Z (impedância) por R (resistência).

13 - Impedância de circuitos indutivos

Num circuito onde a resistência R e a reatância indutiva X_L estejam em série, a impedância é calculada através da seguinte fórmula:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \qquad (8.18)$$

Z = impedância, em ohms.
R = resistência, em ohms.
X_L = reatância indutiva, em ohms.

Esta fórmula que permite calcular a impedância de um circuito, está baseada na relação entre os lados de um triângulo retângulo.

Como você já viu nos pré-requisitos de Matemática, um triângulo retângulo apresenta um ângulo reto, ou seja, um ângulo de 90°. Os outros dois ângulos são agudos (menores que 90°). O lado oposto ao ângulo de 90° é chamado de hipotenusa, e o seu comprimento é determinado da seguinte forma: $a = \sqrt{b^2 + c^2}$. Observe que esta fórmula é igual a aquela usada para determinar a impedância de um circuito.

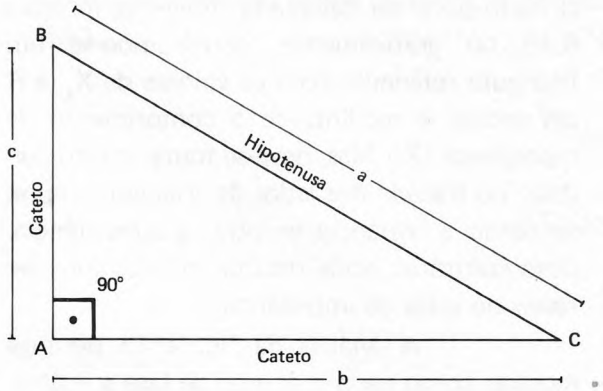
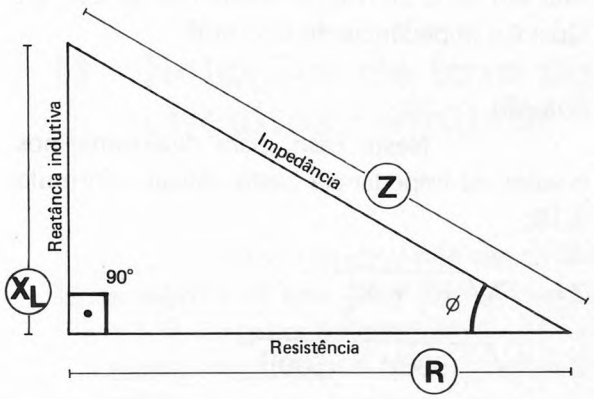


Fig. 14 – Triângulo retângulo.

Desse modo, a ***impedância (Z)*** pode ser entendida como sendo a ***hipotenusa,*** e a ***reatância indutiva (X_L)*** e a ***resistência (R)*** como os respectivos ***catetos*** de um triângulo retângulo.

Este tipo de semelhança que se estabelece entre os valores de Z, X_L e R, e os lados de um triângulo retângulo, está baseada no fato de que ***as oposições à corrente alternada,*** realizadas pela resistência e pela reatância indutiva, ***estão defasadas de 90°.***



90° = defasagem entre a oposição de R e a de X_L.

ø = atraso da corrente em relação à f.e.m. ou atraso da f.c.e.m. em relação à corrente.

Fig. 15 – Triângulo retângulo mostrando as relações entre a impedância, resistência e reatância indutiva.

Outro ângulo de interesse nesse triângulo retângulo, é o ângulo agudo ϕ entre o lado que representa a impedância (Z) e a resistência (R). ***O ângulo ϕ representa o atraso da corrente em relação à tensão aplicada***

Direitos reservados

(f.e.m.), ou o atraso entre a tensão auto-induzida (f.c.e.m.) e a corrente.

Desse modo, a impedância de um circuito pode ser calculada através da fórmula 8.18 ou graficamente, construindo-se um triângulo retângulo com os valores de X_L e R em escala, e medindo-se o comprimento da hipotenusa (Z). Mas, deve-se tomar muito cuidado no traçado dos lados do triângulo, representando a reatância indutiva e a resistência. Caso contrário, pode resultar desvios consideráveis no valor da impedância.

A análise da figura 15 permite mostrar como varia o ângulo de fase ϕ — atraso da corrente em relação à f.e.m. ou atraso da f.c.e.m. em relação à corrente alternada.

Se o ***valor da resistência for muito pequeno em relação ao valor da reatância indutiva,*** o ângulo ϕ tenderá a 90°. Isto é, ***a defasagem entre a corrente e a tensão aplicada tende para 90°.***

Por outro lado, se o ***valor da resistência for muito grande em relação ao valor da reatância indutiva,*** o ângulo ϕ tenderá para zero. Ou seja, ***a defasagem entre a corrente e a f.e.m. tenderá para 0°.***

Vamos agora ver como se determina a impedância de um circuito, através dos exemplos que se seguem.

Exemplo 1

Uma reatância indutiva de 500 Ω está em série com uma resistência de 500 Ω. Qual é a impedância do circuito?

Solução

Neste caso, para determinarmos o valor da impedância basta aplicar a fórmula 8.18:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{(500)^2 + (500)^2}$$

$$Z = \sqrt{250\,000 + 250\,000}$$

$$Z = \sqrt{500\,000} \Rightarrow \underline{\underline{Z = 707\ \Omega}}$$

Exemplo 2

Uma bobina de 20 H tem uma resistência de 400 Ω. Qual a sua impedância quando usada num circuito C.A. de 60 Hz?

Solução

Para determinarmos a impedância, é necessário antes determinarmos a reatância da bobina na freqüência de 60 Hz, empregando a fórmula 8.11.

$$X_L = 2\pi f L \Rightarrow X_L = 2 \times 3{,}14 \times 60 \times 20$$

$$X_L = 7\,536\ \Omega = 7{,}54 \times 10^3\ \Omega$$

Em seguida deve-se aplicar a fórmula 8.18.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{400^2 + 7\,536^2}$$

$$Z = \sqrt{(400)^2 + (7{,}54 \times 10^3)^2}$$

$$Z = \sqrt{(0{,}4 \times 10^3)^2 + (7{,}54 \times 10^3)^2}$$

$$Z = \sqrt{0{,}16 \times 10^6 + 56{,}85 \times 10^6}$$

$$Z = \sqrt{57{,}01 \times 10^6}$$

$$\underline{\underline{Z = 7{,}55 \times 10^3\ \Omega = 7{,}55\ k\Omega}}$$

Exemplo 3

Um indutor de 5 H tem uma resistência de 60 Ω, e está ligado em série com uma resistência de 3 000 Ω. Qual é a impedância do circuito na freqüência de 120 Hz?

Solução

Em primeiro lugar deve-se calcular a reatância indutiva do indutor, através da fórmula 8.11.

$$X_L = 2\pi f L \Rightarrow X_L = 2 \times 3{,}14 \times 120 \times 5$$

$$X_L = 3\,768\ \Omega = 3{,}77 \times 10^3$$

Como o indutor está em série com o resistor, segue-se que a resistência do indutor está em série com a resistência do resistor. Desse modo, a resistência total é dada pela soma:

$$R = 60 + 3\,000 \Rightarrow R = 3\,060\ \Omega = 3{,}06 \times 10^3\ \Omega$$

Finalmente, aplicando-se a fórmula da impedância, teremos a resposta para o problema.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{3\,060^2 + 3\,768^2}$$

$$Z = \sqrt{(3{,}06 \times 10^3)^2 + (3{,}77 \times 10^3)^2}$$

$$Z = \sqrt{9{,}36 \times 10^6 + 14{,}21 \times 10^6}$$

$$Z = \sqrt{23{,}57 \times 10^6}$$

$$Z = 4{,}85 \times 10^3\ \Omega = 4{,}85\ k\Omega$$

14 - Influência da indutância no fator de potência

No capítulo anterior você viu que o valor da reatância indutiva interfere na defasagem entre a corrente alternada e a f.e.m., ou defasagem da f.c.e.m. e a corrente.

Para um ***valor maior de*** X_L (reatância indutiva) o ***ângulo*** ϕ (defasagem) ***será maior;*** da mesma forma, para um ***valor menor de*** X_L, o ***ângulo*** ϕ também será ***menor.*** Veja novamente a figura 15.

Mas, você também viu na lição nº 7 que, para se determinar a potência de um circuito C.A. é necessário levar em consideração a defasagem entre a corrente alternada e a tensão aplicada. Para isso, a fórmula que permite o cálculo da potência real de um circuito C.A. apresenta um fator, chamado fator de potência, cujo valor é o cosseno do ângulo de defasagem: $FP = \cos \phi$.

Desse modo, podemos dizer que a ***reatância indutiva interfere na potência de um circuito através do fator de potência.*** Mas, como o valor da reatância indutiva depende da ***indutância (L),*** podemos também afirmar que a indutância interfere na potência do circuito através do fator de potência.

Quanto maior a indutância presente num circuito, maior o ângulo de fase (ϕ), isto é, maior a defasagem e, conseqüentemente, menor o fator de potência. Em outras palavras, quanto maior a indutância, menor a potência real do circuito.

É por essa razão que, em instalações onde existam grande número de motores e transformadores, é preciso tomar cuidado com o fator de potência. Pois estes equipamentos apresentam grandes indutâncias e, com um grande valor para a indutância, o fator de potência poderá diminuir além do tolerável. Quando isso acontece, é necessário colocar capacitores em paralelo com a linha, com a finalidade de corrigir o fator de potência. Você verá como isso é feito em lições seguintes.

15 - Combinações de indutâncias

Quando você estudou os circuitos de corrente contínua, você aprendeu que os ***resistores*** podem ser ligados em série ou em paralelo. Para os resistores ligados em série ou em paralelo, pode-se calcular uma resistência equivalente ou resistência total. No caso de resistores ligados em série, a resistência total é a soma de todas as resistências.

Em se tratando de ***indutores,*** isto é, ***componentes que apresentam indutância,*** estes também podem ser ***ligados em série ou em paralelo.*** Da mesma forma como foi feito para os resistores, pode-se determinar a indutância total para os indutores. Aliás, a determinação da indutância total é feita de maneira semelhante à resistência total.

Quando dois ou mais indutores estão ligados em série, a indutância total é igual à soma das indutâncias de cada um dos indutores.

Assim, para um conjunto de bobinas ligadas em ***série,*** a ***indutância total*** pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + ... + L_n \qquad (8.19)$$

A figura 16 apresenta três bobinas (indutores) ligados em série.

Direitos reservados

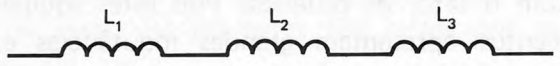


Fig. 16 — Bobinas ligadas em série.

Exemplo 1

Se as bobinas da figura 16 apresentarem, respectivamente, indutâncias de 200 mH, 300 mH e 600 mH, a indutância total será:

$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$

$L_{eq} = 200 + 300 + 600$

$L_{eq} = 1\,100$ mH ou 1,10 H

Se os indutores estiverem ligados em ***paralelo,*** a determinação da indutância total é feita de modo semelhante à resistência total para resistores ligados em paralelo.

O inverso da indutância equivalente é igual à soma dos inversos de cada indutância, quando os indutores estão ligados em paralelo.

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \qquad (8.20)$$

A fórmula 8.20 pode ser transformada para a fórmula seguinte:

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}} \qquad (8.21)$$

No caso de apenas duas bobinas L_1 e L_2 ligadas em paralelo, a indutância total pode ser determinada através da seguinte fórmula:

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \qquad (8.22)$$

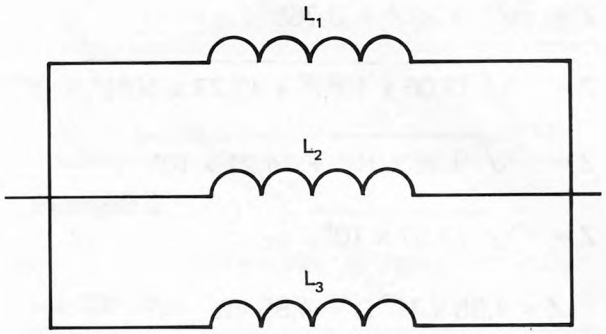


Fig. 17 — Indutores ligados em paralelo.

Exemplo 2

Para as bobinas da figura 17, considere os seguintes valores de indutância: $L_1 = 200$ mH; $L_2 = 300$ mH; $L_3 = 600$ mH. Determinar a indutância equivalente.

Solução

Aplicando-se a fórmula 8.21, teremos:

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}}$$

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{200} + \frac{1}{300} + \frac{1}{600}}$$

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{3+2+1}{600}} \Rightarrow L_{eq} = \frac{1}{\frac{6}{600}}$$

$$L_{eq} = \frac{600}{6} \Rightarrow L_{eq} = 100 \text{ mH}$$

É importante ressaltar que estas fórmulas só se aplicam se as bobinas consideradas forem totalmente independentes, isto é, ***sem indução mútua*** entre elas. Quando houver indução mútua entre parte ou entre todas as bobinas, cada caso deve ser considerado separadamente. Isto porque ***a indução mútua tanto pode aumentar como diminuir a indutância total*** do circuito.

Outra observação é que, tal como nos resistores, a combinação em série aumenta

o valor da indutância total, enquanto a combinação em paralelo diminui a indutância equivalente. No primeiro exemplo, 1 100 mH é maior do que a indutância de qualquer uma das indutâncias individuais, pois a combinação efetuada foi em série. No segundo exemplo, 100 mH é menor do que qualquer uma das indutâncias individuais, pois a combinação foi feita em paralelo.

16 - Tipos de bobinas ou indutores

Há muitos tipos de bobina ou indutor. Muitas bobinas apresentam núcleo de material magnético, enquanto que outras têm núcleo de ar.

Antigamente, a maioria das bobinas utilizadas nos receptores de rádio e televisão eram com núcleo de ar, e precisavam ser grandes para atingir os valores necessários de indutância.

A necessidade de se ajustar a indutância fez com que fosse descoberto o uso de ***núcleos de pó de ferro.*** Inicialmente as partículas de pó de ferro foram reunidas e prensadas junto com um aglutinante (uma espécie de cola), que mantinha as partículas de ferro na posição, mas evitava o contato entre si. Essa isolação era necessária para reduzir as perdas pelas "correntes de Foucault", principalmente nas altas freqüências.

Entretanto, a utilização desses núcleos foi limitada por dois fatores: a) o aumento da indutância não era muito grande, devido à pouca quantidade de partículas de ferro em relação ao aglutinante (partículas demais provocavam "curto" entre si); b) o uso em altas freqüências era prejudicado pelo tamanho das partículas (não se conseguia partículas suficientemente pequenas).

Atualmente, existe uma cerâmica especial, que é baseada no óxido de ferro e obtida através de prensagem e aquecimento (sinterização). Alterando a sua composição ou o processo de fabricação, essa cerâmica, chamada ***ferrite,*** pode ser empregada desde freqüências baixas (freqüências de áudio) até freqüências elevadas como a faixa de VHF.

As ***bobinas com núcleo de ferrite,*** usadas em rádios e televisores, recebem diversos nomes, de acordo com a sua aplicação: bobina de antena, transformador de RF, transformador de FI, bobina osciladora, indutores de RF, etc.

Quando se precisa de ***bobinas com indutâncias maiores, usa-se núcleos com lâminas de ligas especiais,*** como ferro-silício, permalloy, etc. Estas bobinas também recebem nomes de acordo com sua utilização: reator de filtro, transformador de acoplamento, transformador de linha, transformador de potência, etc.

Com relação à construção, as bobinas se classificam em 2 grupos: ***indutores*** e ***transformadores.***

Chama-se indutor quando a bobina é constituída de um único enrolamento com 2 terminais — começo e fim. Chama-se transformador quando é constituída por 2 ou mais enrolamentos com indução mútua entre si, ou por um enrolamento com uma ou mais derivações.

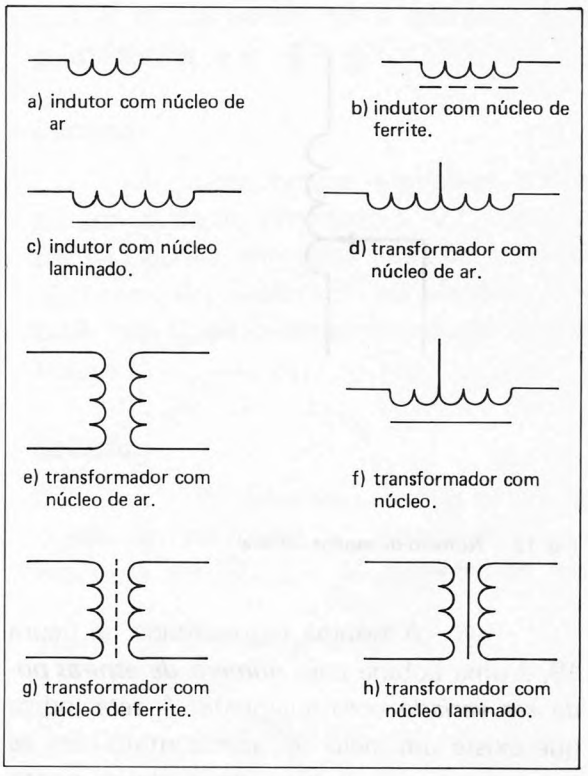


Fig. 18 — Símbolos esquemáticos de bobinas com indutâncias fixas.

A figura 18 apresentou os símbolos para os diversos tipos de bobinas com indutâncias fixas. Alguns autores fazem distinção no símbolo que representa bobinas que usam núcleo de ***ferrite*** das que usam núcleo ***laminado*** (liga de ferro ou outro material magnético).

Então, usa-se ***linhas tracejadas*** para representar os núcleos de ferrite e ***linhas cheias*** para representar núcleos laminados.

17 - Bobinas de indutância variável

Quando a indutância de uma bobina não puder ser ajustada para se obter diversos valores, ela é conhecida como bobina de indutância fixa.

Bobinas de indutância variável são aquelas que podem ser ajustadas para se obter diversos valores de indutância, de maneira contínua ou por degraus.

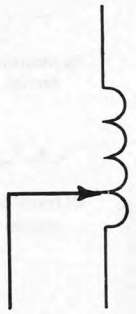


Fig. 19 — Número de espiras variável.

A bobina representada na figura 19, é uma bobina cujo ***número de espiras pode ser variado*** continuamente. A ***seta*** indica que existe um meio de fazer contato com os enrolamentos da bobina em qualquer ponto intermediário, e não somente nas extremidades. Uma das extremidades deste tipo de bobina é fixada permanentemente ao circuito onde a bobina está sendo usada. A seta pode indicar uma ***presilha*** que pode ser deslocada para fazer contato com a bobina, em qualquer ponto intermediário do enrolamento; ou um ***contato deslizante*** que pode ser movido ao longo da bobina, tocando uma espira de cada vez; ou ainda um ***cursor*** que desliza ao longo de todo o fio do enrolamento. Na prática, ***a posição do contato móvel determina a fração da bobina realmente usada no circuito.***

O símbolo de uma ***bobina com derivações,*** selecionáveis através de um ***seletor,*** está mostrado na figura 20. O conjunto da bobina pode ter qualquer número de contatos, cada um ligado a uma derivação do enrolamento. Mudando a posição da chave seletora, muda a parcela da bobina usada no circuito. Conseqüentemente, a indutância utilizada no circuito pode ser escolhida.

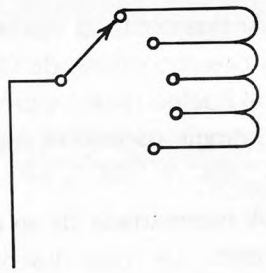


Fig. 20 — Bobina com derivações.

O símbolo esquemático de uma bobina com ***núcleo ajustável*** está mostrado na figura 21.



Fig. 21 — Bobina com núcleo ajustável.

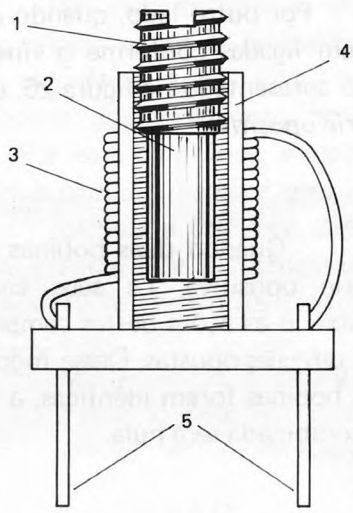


Fig. 22 — Bobina com núcleo de ferrite ajustável.

A figura 22 mostra uma bobina antiga, com ***núcleo de ferrite.*** O parafuso (1) é girado para mover o núcleo de ferrite (2) para dentro ou para fora do enrolamento (3). O enrolamento é feito sobre um corpo ou fôrma (4), com terminais de solda (5). ***Quando o núcleo estiver centrado em relação ao enrolamento, tem-se a máxima indutância;*** quando o núcleo for puxado para fora, deixando apenas uma pontinha dentro do enrolamento, a indutância é reduzida.

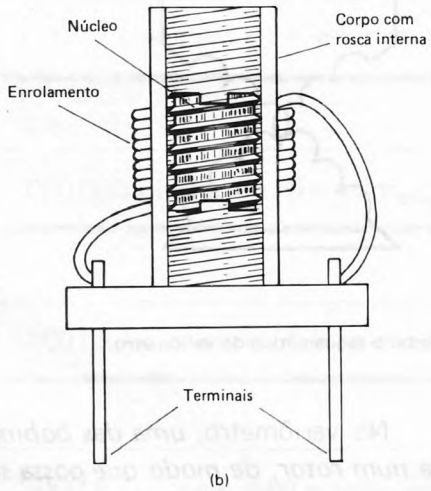


Fig. 23 — Bobina com rosca no próprio núcleo.

Uma bobina com núcleo ajustável, com rosca no próprio núcleo, é mostrada na figura 23. Este tipo de bobina é mais moderno que a anterior. Neste caso, para se poder girar o núcleo, este possui fendas em suas extremidades, ou furo sextavado que atravessa todo o núcleo. Em algumas aplicações o núcleo pode ser metálico, como alumínio ou latão. ***O alumínio e o latão são usados em freqüências bastante altas,*** como a parte superior do VHF e a faixa de UHF, ***onde o núcleo de ferrite não funciona muito bem. Os núcleos metálicos, entretanto, têm efeitos opostos aos núcleos de ferrite:*** a indutância é mínima quando o núcleo estiver centrado em relação ao enrolamento, e máxima quando o núcleo estiver praticamente fora do enrolamento.

O símbolo mostrado na figura 24 é um símbolo geral, sem especificação de como a indutância é variada.

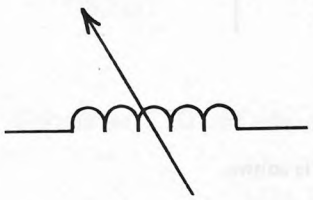


Fig. 24 — Símbolo de indutância variável.

Em certas aplicações a variação das indutâncias é conseguida pela deformação física das espiras, aproximando-as ou afastando-as.

Juntando-se as espiras da bobina, a indutância aumenta; separando-se as espiras da bobina, a indutância diminui.

18 - Cancelamento de indutâncias

Quando duas bobinas estiverem enroladas no mesmo núcleo, ou acopladas magneticamente de alguma forma, diz-se que

elas estão em ***série aditiva.***

A figura 25 apresenta o símbolo esquemático para duas bobinas ligadas em série aditiva.

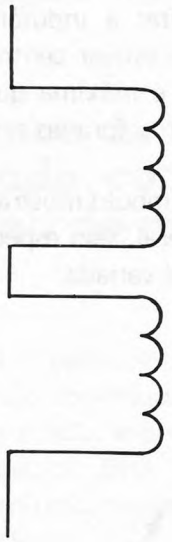


Fig. 25 — Série aditiva.

Numa série aditiva, a indutância total pode ser determinada, aproximadamente, considerando todas as espiras das duas bobinas, como se fosse uma única bobina. Ou pode ser determinada somando as indutâncias de cada bobina.

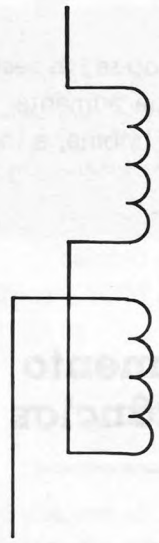


Fig. 26 — Série apositiva.

Por outro lado, quando duas bobinas forem ligadas conforme o símbolo esquemático apresentado na figura 26, elas estarão em ***série opositiva.***

Quando duas bobinas estão em série opositiva, os seus campos magnéticos e as ações destes campos estão em direções opostas. Desse modo, se as duas bobinas forem idênticas, a indutância combinada será nula.

Existe um dispositivo que permite variar o tipo de ligação entre duas bobinas.

O variômetro é um dispositivo que permite que a ligação entre duas bobinas seja do tipo série aditiva, série opositiva, ou uma combinação aditiva-opositiva.

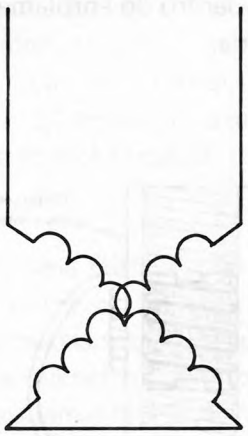


Fig. 27 — Símbolo esquemático do variômetro.

No variômetro, ***uma das bobinas é enrolada num rotor, de modo que possa ser girada dentro da outra.*** Girando-se o rotor, altera-se a posição relativa entre as duas bobinas, variando o acoplamento magnético entre elas. Quando o rotor for posicionado de modo que as duas bobinas estejam em ***série aditiva,*** a ***indutância total será máxima.*** Por outro lado, quando o rotor for posicionado de modo que os ***campos magnéticos*** das duas bobinas estejam em ***direções opostas, a indutância total será mínima.*** Em qualquer ***ponto intermediário, a indutância terá um valor entre o máximo e o***

mínimo. O valor, neste último caso, será determinado pelo grau de oposição entre os campos das duas bobinas.

Os variômetros foram muito usados nos receptores construídos no início da "era do rádio". Hoje em dia é muito difícil de ser encontrado.

19 - Fator de mérito das bobinas

As bobinas são usadas em muitas das aplicações com a finalidade de fornecer a máxima reatância indutiva, na freqüência em que estiver atuando.

Existe um fator que indica o desempenho de uma bobina, chamado fator de mérito, fator "Q", ou simplesmente o "Q" das bobinas.

O fator de mérito (Q) indica a qualidade de uma bobina, isto é, o quão bem ela executa a sua tarefa.

Se a bobina tiver um ***alto "Q", suas perdas serão pequenas.*** O "Q" de uma bobina varia com a freqüência, porque não só a reatância indutiva, mas as perdas também variam com a freqüência.

O fator de mérito "Q" de uma bobina pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$Q = \frac{X_L}{R} \qquad (8.23)$$

Q = fator de mérito da bobina.
X_L = reatância indutiva da bobina, em ohms, na freqüência especificada.
R = resistência (em corrente contínua) da bobina, em ohms.

Observe que o ***"Q"*** é um ***número puro,*** isto é, não apresenta unidades. Isso se deve ao fato de que tanto a reatância indutiva quanto a resistência são medidas em ohms, e uma está sendo dividida pela outra. O fator "Q" de uma bobina é simplesmente uma relação entre a reatância indutiva e a resistência e, por isso, é uma grandeza adimensional — sem dimensões.

Exemplo 1

Qual é o "Q" de uma bobina que tem uma reatância indutiva de 1 000 Ω em uma dada freqüência, se a sua resistência C.C. for: a) 25 Ω; b) 100 Ω; c) 250 Ω?

Solução

A solução é obtida para os três casos, aplicando-se a fórmula 8.23.

a) $Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{1\,000\ \Omega}{25\ \Omega} \Rightarrow \underline{Q = 40}$

b) $Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{1\,000\ \Omega}{100\ \Omega} \Rightarrow \underline{Q = 10}$

c) $Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{1\,000\ \Omega}{250\ \Omega} \Rightarrow \underline{Q = 4}$

Exemplo 2

Qual é o "Q" de uma bobina com indutância de 550 mH e uma resistência de 55 Ω, nas seguintes freqüências: a) 60 Hz; b) 100 Hz; c) 350 Hz?

Solução

a) Inicialmente deve-se fazer a conversão de mH para henrys (H), aplicando-se a fórmula 8.4, pois será preciso calcular a reatância indutiva:

0,001 x (valor em mH) = valor em H
0,001 x 550 mH = 0,55 H

Em seguida, devemos aplicar a fórmula 8.11, para determinarmos o valor da reatância indutiva na freqüência de 60 Hz.

$X_L = 2\,\pi\,f\,L \Rightarrow X_L = 2 \times 3{,}14 \times 60 \times 0{,}55$

$X_L = 207{,}2\ \Omega$

Agora é só determinar o fator de mérito através da fórmula 8.23:

$$Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{207{,}2\ \Omega}{55\ \Omega} \Rightarrow \underline{Q = 3{,}8}$$

b) Como no item anterior já foi feita a conversão de mH para H, podemos determinar a reatância indutiva para a freqüência de 100 Hz:

$X_L = 2\,\pi\,f\,L \Rightarrow X_L = 2 \times 3{,}14 \times 100 \times 0{,}55$

$X_L = 345{,}4\ \Omega$

Desse modo, o fator de mérito da bobina na freqüência de 100 Hz será:

$$Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{345,4}{55} \Rightarrow \underline{\underline{Q = 6,3}}$$

c) Para a freqüência de 350 Hz, a reatância indutiva da bobina será:

$X_L = 2 \pi f L \Rightarrow X_L = 2 \times 3,14 \times 350 \times 0,55$

$X_L = 1\,209\ \Omega$

O fator de mérito na freqüência de 350 Hz será:

$$Q = \frac{X_L}{R} \Rightarrow Q = \frac{1\,209}{55} \Rightarrow \underline{\underline{Q = 22}}$$

20 - Constante de tempo de circuitos indutivos

Quando uma corrente contínua for aplicada a uma bobina, decorre um certo ***intervalo de tempo*** até que a corrente atinja o seu ***valor máximo,*** por causa da ***indutância da bobina.***

No circuito mostrado na figura 28, o fechamento da chave (Ch) provoca o fluxo de corrente contínua fornecida pela bateria (E), através do resistor (R) e da bobina (L).

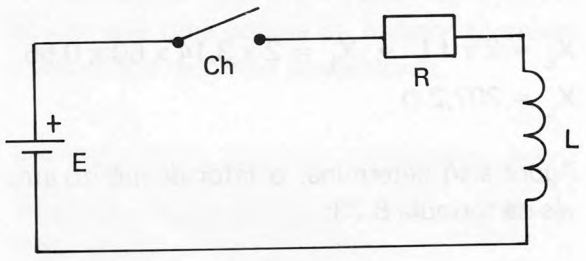


Fig. 28 – Circuito LR.

Se a bobina não estiver no circuito, a corrente atingirá instantaneamente o seu valor máximo. Mas, como este circuito da figura 28 apresenta uma bobina, existirá o efeito da ***auto-indução*** da bobina ***que não permite que a corrente atinja instantaneamente o seu valor máximo.*** No início a corrente cresce rapidamente. Porém, devido à indutância da bobina, a corrente sofre uma oposição ao seu crescimento, o que faz com que demore um certo tempo para que a corrente atinja o seu valor máximo.

O valor máximo que a corrente apresentará é determinado pela resistência total do circuito e pela f.e.m. fornecida pela bateria.

O tempo necessário para que uma corrente atinja 63% do seu valor final é definido como "constante de tempo".

A constante de tempo pode ser calculada através da relação entre a indutância da bobina e a resistência total do circuito.

$$T = \frac{L}{R} \qquad (8.24)$$

T = tempo, em segundos (intervalo de uma constante de tempo).
L = indutância da bobina, em H.
R = resistência total do circuito, em ohms.

Observe que para se determinar a constante de tempo (T), é necessário conhecer a resistência total do circuito. A resistência total engloba tanto a ***resistência do resistor,*** como a ***resistência C.C. da própria bobina.***

Um circuito que apresente resistores e indutores é chamado circuito LR.

Quando a ***chave*** (Ch) ***for aberta,*** será necessário, também, o intervalo de uma ***constante de tempo*** (T) para que a corrente da bobina ***caia para 37% do seu valor máximo,*** como aconteceu para atingir 63% do valor máximo quando a chave foi fechada.

O gráfico da figura 29 apresenta as curvas da variação da corrente num circuito LR. A curva "a" indica a variação da corrente quando a chave é fechada, e a curva "b" indica a variação da corrente quando a chave é aberta.

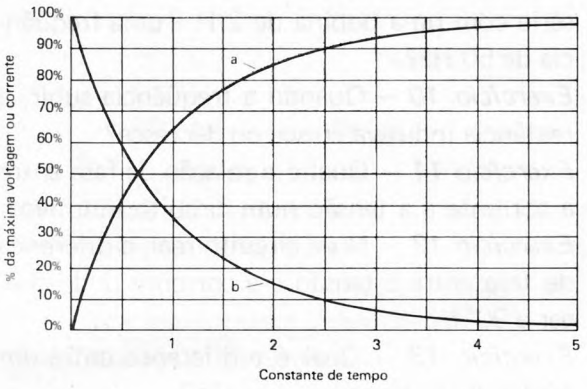


Fig. 29 — Curvas da constante de tempo para um circuito LR.

A curva ***"a"*** mostra o ***crescimento da corrente*** quando a chave for fechada. A curva ***"b"*** mostra a ***queda da corrente*** quando a chave for aberta. Os intervalos de tempo assinalados no eixo horizontal são múltiplos da constante de tempo (T).

Observe que após decorrer um intervalo de tempo equivalente a uma constante de tempo (T), a corrente atingirá 63% na subida ou 37% na descida, do seu valor máximo.

Em um determinado circuito, o tempo de uma constante de tempo é sempre igual, desde que se mantenha os valores da indutância e da resistência.

Exemplo 1

Determinar os seguintes valores, para o circuito da figura 30: a) constante de tempo (T); b) valor máximo da corrente que passará pelo circuito; c) valor da corrente que estará passando no tempo equivalente a uma constante de tempo.

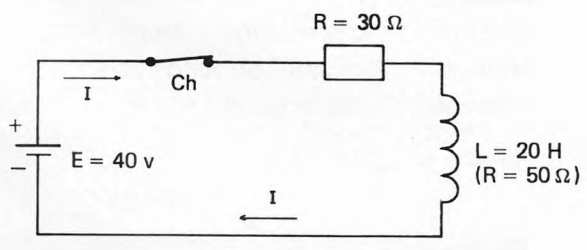


Fig. 30 — Circuito LR.

Solução

a) Para determinarmos o valor da constante de tempo (T), temos que considerar que a resistência total do circuito é a soma da resistência da bobina com a resistência do resistor ligado em série. Assim, aplicando-se a fórmula 8.24 teremos:

$$T = \frac{L}{R} \Rightarrow T = \frac{20}{50 + 30} \Rightarrow \underline{\underline{T = 0{,}25 \text{ seg}}}$$

b) O valor máximo da corrente que passará pelo circuito é dado pela Lei de Ohm:

$$I_{max} = \frac{E}{R} \Rightarrow I_{max} = \frac{40}{50 + 30} \Rightarrow \underline{\underline{I = 0{,}5 \text{ A}}}$$

c) A corrente que estará passando 0,25 segundos após o fechamento da chave "Ch" é 63% da corrente máxima. O cálculo pode ser feito através de uma "regra de três" simples:

Corrente	*Porcentagem*
0,5	100%
I	63%

$$I = \frac{63 \times 0{,}5}{100} \Rightarrow \underline{\underline{I = 0{,}315 \text{ A}}}$$

Exemplo 2

Suponha que no circuito da figura 30, a bobina apresente uma indutância de 8 H e uma resistência interna de 20Ω; o resistor tenha uma resistência de 20 Ω; e a bateria forneça uma tensão de 10 volts. a) qual a corrente máxima que passará pelo circuito? ; b) qual o tempo, em segundos, do intervalo de uma constante de tempo? ; c) depois da chave ser aberta, que corrente estará passando pela bobina, no final de uma constante de tempo?

Solução

a) A corrente máxima que circulará pelo circuito é calculada através da Lei de Ohm:

$$I_{max} = \frac{E}{R} \Rightarrow I_{max} = \frac{10}{20 + 20}$$

$$I_{max} = \frac{10}{40} \Rightarrow \underline{\underline{I_{max} = 0{,}25 \text{ A}}}$$

b) A constante de tempo é calculada através da fórmula 8.24:

$$T = \frac{L}{R} \Rightarrow T = \frac{8}{20 + 20} \Rightarrow \underline{\underline{T = 0{,}2 \text{ seg.}}}$$

Direitos reservados

c) A corrente que estará passando 0,2 segundos após a chave ser aberta, será 37% do valor máximo:

Corrente	*Porcentagem*
0,25	100%
I	37%

$$I = \frac{37 \times 0{,}25}{100} \Rightarrow \underline{\underline{I = 0{,}0925\ A = 92{,}5\ mA}}$$

21 - Exercícios para recapitulação

Exercício 1 — A operação dos transformadores está baseada em que princípios?

Exercício 2 — É possível aos terminais dos componentes apresentar somente resistência?

Exercício 3 — Qual é a unidade básica da indutância?

Exercício 4 — Converter para henrys e microhenrys os seguintes valores: 700 mH, 55 mH, 9 mH e 0,23 mH.

Exercício 5 — Uma bobina com 50 espiras e núcleo de ar é do tipo mostrado na figura 5. Qual a sua indutância, se o raio da bobina é 50,8 mm e o comprimento 127 mm?

Exercício 6 — Uma bobina espiralada, como a mostrada na figura 7, consiste de 100 espiras enroladas sobre um corpo de 76,2 mm de diâmetro. A espessura da bobina é de 25,4 mm. Qual é a sua indutância?

Exercício 7 — Uma bobina multi-camadas, como a ilustrada na figura 9, consiste de 20 camadas de 20 espiras cada. O diâmetro do tubo sobre o qual está enrolado a bobina é de 58,4 mm. As dimensões da bobina são: comprimento e espessura de 17,8 mm. Determinar a sua indutância.

Exercício 8 — Qual é a reatância indutiva de uma bobina de 2 H a um potencial aplicado de 50 Hz?

Exercício 9 — Qual é a impedância de um circuito contendo um resistor de 400 Ω em série com uma bobina de 2 H a uma freqüência de 50 Hz?

Exercício 10 — Quando a freqüência subir, a reatância indutiva cresce ou decresce?

Exercício 11 — Qual é a relação de fase entre a corrente e a tensão num circuito indutivo?

Exercício 12 — Num circuito real, a diferença de fase entre a tensão e a corrente pode chegar a 90°?

Exercício 13 — Qual é a diferença entre um núcleo de ferrite e um de latão?

Exercício 14 — Qual é o "Q" de uma bobina que tem uma indutância de 0,5 H e uma resistência C.C. de 20 Ω quando for aplicada à bobina uma tensão de 60 Hz?

Exercício 15 — Qual a constante de tempo da bobina descrita na questão anterior?

Respostas:

1) Indutância mútua.
2) Não, todos os terminais de componentes e fios de ligações possuem indutâncias distribuídas.
3) O henry (H).
4) Valores convertidos para henry: 0,7 H, 0,055 H, 0,009 H e 0,00023 H. Valores convertidos para microhenry: 700 000 μH, 55 000 μH, 9 000 μH e 230 μH.
5) L = 147 μH.
6) L = 1 483 μH = 1,48 mH.
7) L = 12 906 μH = 12,9 mH.
8) X_L = 628 Ω.
9) Z = 745 Ω.
10) A reatância indutiva cresce também.
11) A corrente está atrasada em relação à tensão.
12) Não, pois sempre há resistências, no circuito e na própria bobina.
13) O ferrite é um material ferromagnético. Sua introdução aumenta a indutância. O latão é um material paramagnético. Sua introdução diminui a indutância.
14) Q = 9,42.
15) T = 0,025 segundos.

Direitos reservados

Exame

INDUTÂNCIA E INDUTORES
REATÂNCIA INDUTIVA
REFERÊNCIA 016

Observações Para o Aluno

- Antes de responder as questões você deverá ter feito um estudo minucioso e completo desta lição.
- Agora, leia cada questão até compreender bem o que se pede.
- Cada questão apresenta várias soluções. Apenas uma solução é correta.
- Em cada questão indique a solução que você julgar correta e, a seguir, transcreva, com atenção, as suas respostas para a Folha de Respostas, anexa.

1. Qual dos seguintes dispositivos funciona baseado no princípio da indução mútua?
   a) Transformador. b) Eletro-ímã. c) Capacitor. d) Reator.

2. O fator de mérito (Q) de uma bobina com indutância de 300 mH e uma resistência de 21 Ω, na freqüência de 60 Hz é:
   a) 0,014. b) 5,39. c) 14,29. d) 5 390.

3. A reatância indutiva é diretamente proporcional a:
   a) indutância e capacitância.
   b) freqüência e corrente.
   c) indutância e freqüência.
   d) ao núcleo de ferro.

4. Quatro bobinas com indutâncias de 100, 200, 400 e 800 mH estão ligadas em paralelo. Qual a indutância equivalente?
   a) 2,67 μH. b) 375 mH. c) 53,3 mH. d) 1 500 mH.

5. Qual a bobina que apresenta a maior indutância?
   a) um fio de ferro esticado.
   b) uma bobina com núcleo de latão.
   c) um fio de cobre esticado.
   d) uma bobina com núcleo de ferro.

6. Uma f.e.m. pode ser induzida num condutor das seguintes maneiras:
   a) indução eletromagnética, indução mútua e auto-indução.
   b) contato, indução magnética e auto-indução.
   c) por transformação, contato e indução eletromagnética.
   d) indução magnética, indução mútua e auto-indução.

7. A indutância é o resultado da:
   a) indução eletromagnética.
   b) auto-indução.
   c) indução mútua.
   d) magnetismo do próprio material.

8. O efeito da indutância sobre a corrente é:
   a) acelerar a sua variação.
   b) retardar a sua variação.
   c) nenhuma.
   d) aumentar a sua intensidade.

9. A indutância de um condutor depende:
   a) do diâmetro e do comprimento.
   b) do formato e do material.
   c) do formato e do comprimento.
   d) do comprimento e do material.

10. Colocando-se um núcleo de ferro numa bobina:
    a) nada acontece.
    b) sua resistência aumenta.
    c) sua indutância aumenta.
    d) sua indutância diminui.

11. Quando se tem indutância num circuito:
    a) a corrente e a tensão continuam em fase.
    b) a corrente se adianta em relação à tensão.
    c) a tensão se atrasa em relação à corrente.
    d) a corrente se atrasa em relação à tensão.

12. Impedância de um circuito é:
    a) a soma de todas as oposições à passagem da corrente alternada.
    b) a soma de todas as oposições à passagem da corrente contínua.
    c) o efeito da indutância no circuito.
    d) o efeito da indutância sobre a corrente alternada.

13. Quando a indutância predomina num circuito, o seu fator de potência é:
    a) muito grande. b) próximo de 1. c) próximo de zero. d) negativo.

14. Quando se liga em paralelo duas indutâncias:
    a) a indutância total é menor que a menor das indutâncias.
    b) a indutância total é maior que a maior das indutâncias.
    c) a indutância total é a média das indutâncias.
    d) a indutância total não tem relação com as indutâncias.

15. Quando se liga duas bobinas em série, a indutância total é:
    a) diferença das indutâncias parciais.
    b) média das indutâncias das bobinas.
    c) soma das indutâncias das bobinas.
    d) calculada por meio de fórmulas especiais, conforme o tipo das bobinas.

16. O fator de mérito das bobinas:
    a) depende só da maneira de enrolar a bobina.
    b) depende só da qualidade do material da bobina.
    c) indica a relação entre a indutância e a permeabilidade.
    d) indica a qualidade das bobinas.

17. Aplicando-se uma corrente contínua num circuito LR:
    a) a corrente atinge imediatamente o seu valor final.
    b) a corrente só atinge o valor final dentro de um tempo determinado.
    c) a corrente só começa a passar depois de decorrido uma constante de tempo.
    d) o valor final da corrente depende da indutância.

18. A impedância de um circuito com R = 20 Ω e L = 20 mH, na freqüência de 1 kHz é:
    a) 127,2 Ω b) 125,6 Ω c) 40 Ω d) 20 000 Ω