

14. НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

14.1. ДОБИВАЊЕ НА СИНУСОИДАЛНА СТРУЈА. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ

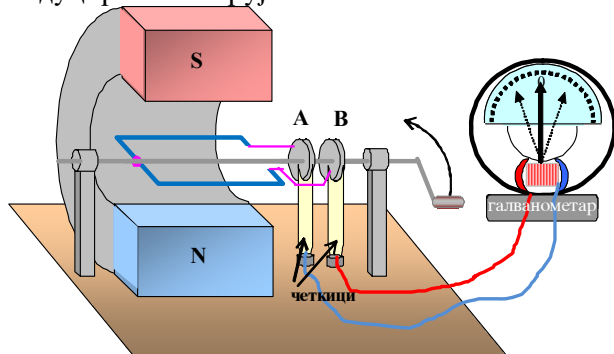
Електромагнетна индукција има голема примена во науката и техниката. Една од најважните е добивањето на наизменичната струја.

Струја што периодички се менува по големина и насока се нарекува променлива. Променлива струја или напон што временски се менува по законот на синусна функција ја викаме наизменична и таа нашла најголема примена во техниката.

14.1.1. Принцип на генератор на наизменичната струја

Извор на наизменичната ЕМС или струја претставува генератор. На сликата 13.19 е дадена принципна шема на генераторот за наизменична струја. Тој се состои од:

1. Индуктор (статор) кој претставува магнет и создава постојано магнетно поле;
2. Подвижна рамка-калем (ротор), т.е. дел што ротира со постојана аглова брзина во просторот во кој се наоѓа постојаното магнетно поле; и
3. Контактен дел со комплет на четкици преку кои се однесува индуцираната струја.



Сл. 14.1

Во принцип, треба да имаме рамка што ротира во постојано магнетно поле. Експериментот од сликата 14.1, покажува дека кога со рака ја ротираме рамката, галанометарот поврзан преку четкиците покажува постојано осцилирање на струјата. Инаку, кај генераторите во електраните ротацијата се добива преку турбини со многу голема агловата брзина. Опитот на сликата 14.1 го објаснува принципот на работа на генераторот.

Низ рамаката, поставена како на сликата, постои магнетен флуks Φ кој зависи од моменталната положба на рамката даден со:

$$\Phi = \vec{B} \vec{A} = BA \cos \alpha \quad (14.1)$$

каде што $\vec{B}$ е магнетната индукција на полето, а $\vec{A}$ вектор на површината на дадената рамка, а α е аголот меѓу векторите $\vec{B}$ и $\vec{A}$.

При ротацијата на рамката, се менува и магнетниот флукс, при што се менува аголот помеѓу нормалата на рамката и правецот и насоката на магнетната индукција, и тоа така што аголот при рамномерното вртливо движење се менува по законот $\alpha = \omega t + \alpha_0$. Ако при $t=0$, $\alpha_0=0$, тогаш флуксот се менува според релацијата:

$$\Phi = BA \cos \omega t \quad (14.2)$$

Оттука јасно се гледа дека тој е функција од времето t па според Фарадеевиот закон за електромагнетната индукција се индуцира ЕМС $\mathcal{E}_i$ дадена со:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(BA \cos \omega t)}{dt} = BA \omega \sin \omega t \quad (14.3)$$

Ако за $BA\omega$ се воведи $\mathcal{E}_0 = BA\omega$ величина што е константна и ја има максималната, т.е. амплитудната вредност на електромоторната сила $\mathcal{E}_0$, тогаш

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (14.4)$$

Фазата на ЕМС е ωt . ЕМС е осцилаторна функција од времето чиј што период на осцилирање е $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Ако рамката од роторот се замени со еден калем со N навивки, тогаш индуцираната електромоторна сила се мултиплицира за N ,

$$\mathcal{E}_0 = NBA\omega \quad (14.5)$$

Ако колото е затворено, тогаш индуцираната ЕМС е всушност еднаква на максималната потенцијална разлика (напонот V) меѓу двата краја нод изворот, па ќе биде:

$$V = V_0 \sin \omega t \quad ; \quad V_0 = NBA\omega \quad (14.6)$$

Од каде што се гледа дека напонот $V = V(t)$ е синусна функција од времето.

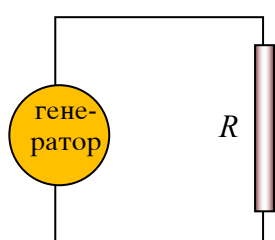
Кај современите генератори на наизменична струја со голема моќност индукторот е силен електромагнет и претставува ротор. “Рамката” е составена од голем број спроводни навивки, меѓусебно изолирани и намотани околу листови од легиран т. н. електротехнички челик. На тој начин, калемот во којшто се индуцира струјата е неподвижен дел на генераторот (статор).

Ако колото е затворено и во него е поврзан само еден отпорник, како на сликата 14.2, тогаш низ колото тече струја која е исто така синусоидална функција од времето:

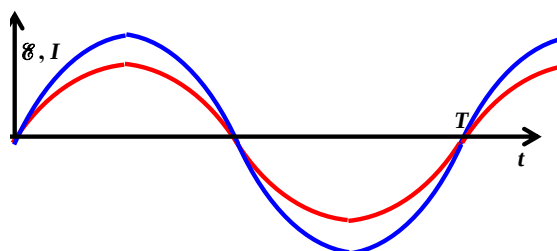
$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t \quad ; \quad I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (14.7)$$

Графичката зависност на јачината на струјата и на ЕМС (напонот) од времето се дадени на сликата 14.3.

Периодично променливата ЕМС создава во колото електрично поле коешто временски се менува на истиот начин. Инаку, промената на електричното поле во колото се пренесува со брзина еднаква на брзината на светлината c . Време τ е она време за кое полето ќе се пренесе од еден крај на колото до друг, на растојание l ќе биде дадено со:



Сл.14.2



Сл.14.3

$$\tau = \frac{l}{c} \quad (14.8)$$

Ако ова време е многу пократко од периодот на осцилирање на наизменичната струја T

$$\tau \ll T \quad (14.9)$$

тогаш ќе сметаме дека моменталната вредност на полето, односно на струјата е иста за секоја точка од целото коло. Струјата што го задоволува овој услов се вика **квазистационарна**.

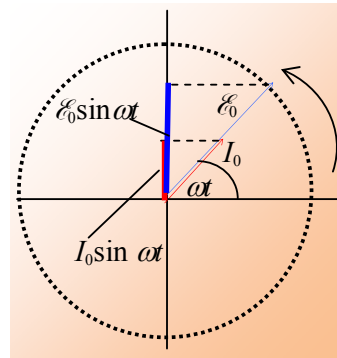
За да видиме која е фреквентната граница за која струјата може да се смета за квазистационарна, ќе земеме, на пример, дека должината на колото е, на пример, 3 m (гајтан од една столна ламба). Тогаш имајќи предвид дека $T=1/f$, условот (14.9) може да се запише како $f \ll c/l$; па ако се заменат вредностите за брзината на светлината $c=3 \cdot 10^8$ m/s и $l=3$ m, за фреквенцијата f ќе се добие

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{3} = 10^8 \text{ Hz} .$$

Значи, струјата се смета за квазистационарна ако фреквенцијата ѝ е помала од 100 Mz.

Во колата во кои е исполнет условот за квазистационарност може да се примени Омовиот закон и Кирхофовите правила.

Наизменичната струја како и другите величини кои се менуваат по синусен закон, може да се прикаже со помош на вектор $\vec{A}$, чијашто големина одговара на амплитудната вредност на физичката величина, а векторот ротира во XOY-рамнина, со аглова брзина ω во насока обратна на стрелките на часовникот. Проекцијата на овој вектор на ординатна оска се менува според синусен закон, аналогно на величината и ја одразува моменталната вредност на величината. Од друга страна, пак, аголот ја претставува фазата на величината. Ваков вектор се вика **фазор**. Фазорно претставување на јачината на струјата и ЕМС (напонот), во случај на коло во кое е вклучен само омски отпор, е прикажано на сликата 14.4.



Сл.14.4

Ако при $t=0$, постои некоја почетна фаза φ_0 тогаш равенката за јачината на струјата ќе гласи:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (14.10)$$

па и фазорот нема за започнува од агол нула, туку од агол φ_0 .

Фреквенцијата на временската промена на наизменичната струја се мери во херци. Во Европа генераторите произведуваат струја од 50 Hz, додека во САД и Јапонија 60 Hz.

Наизменичната струја се карактеризира со следниве физички параметри: моментна, ефективна, средна и максимална вредност на наизменичната струја. Од досега кажаното јасно е што се тоа максимална (амплитудна) вредност, како и моментната вредност (елонгација).

Од порано знаеме и како се дефинира ефективната вредност на јачината на наизменичната струја или напон. Сега, тргнувајќи од дефиницијата ќе ја пресметаме таа вредност.

Кога во колото на наизменичната струја е вклучен само омски отпор тогаш целокупната нејзина енергија се претвора во топлина. Имено, тогаш воопшто не е важна насоката на струјата, бидејќи струјата во обете насоки се претвора во топлина. Под *ефективна вредност на наизменичната струја* се подразбира јачината на онаа постојана струја која за исто време низ исто коло ослободува исто количество топлина како и наизменичната.

Ослободеното количество топлина од правата струја, е дадена со Џуловиот закон (5.30). Имено, за време од една периода таа ослободува топлина

$$\Delta W_T = I^2 R T \quad (14.11)$$

За истото време наизменичната струја ќе ослободи топлина:

$$\Delta W_T = \int_0^T I^2 R dt = R \int_0^T (I_0 \sin \omega t)^2 dt = I_0^2 R \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt \quad (14.12)$$

Тоа значи дека релациите (14.11) и (14.12) треба да се изедначат, со тоа што во релацијата (14.11) наместо I треба да стои I_{ef} . Па ќе биде:

$$I_{\text{ef}}^2 R T = I_0^2 R \left[\int_0^T \frac{1}{2} dt + \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt \right] \quad (14.13)$$

Со оглед на тоа, што вториот интеграл во средната заграда е еднаков на нула, а првиот дава $T/2$, по кратењето на равенството со RT , се добива дека:

$$I_{\text{ef}}^2 = \frac{I_0^2}{2} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{ef}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_0 \quad (14.14)$$

Од последново се гледа дека ефективната вредност на наизменичната струја е $\frac{1}{\sqrt{2}}$ пати помала од амплитудната вредност. Истото може да се покаже и да се запише и за електромоторната сила и напонот:

$$E_{\text{ef}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad ; \quad V_{\text{ef}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (14.15)$$

Во електротехниката обично кога се спомнува јачина на струја или напон се подразбираат токму ефективните вредности на овие величини. При мерењето на струјата или напонот на наизменичната струја сите инструменти (амперметри, волтметри, ватметри) ги мерат токму ефективните вредности на наизменичната струја, бидејќи принципот на работата на инструментите се базира врз механичкото или топлинското дејство на наизменичната струја.

Треба да се напомене дека ефективната вредност не е исто што и средната вредност на струјата или напонот. Средната вредност дефинирана обично во интервалот на $T/2$ (бидејќи е за цела периода таа е еднаква на нула), па е дадена со:

$$I_{\text{sr}} = \frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} I_0 \sin \omega t dt = \frac{4I_0}{T\omega} = \frac{2I_0}{\pi} = 0,637 I_0 \quad ; \quad I_{\text{sr}} = 0,90 I_{\text{ef}} \quad (14.16)$$

Средната вредност на наизменичната струја речиси воопшто не се користи во практични пресметки.

14.2. ЕЛЕКТРИЧНИ КОЛА НА НАИЗМЕНИЧНАТА СТРУЈА

Електричните кола на наизменичните струи според бројот на фазите може да бидат, **монофазни** и **повеќефазни**. Од полифазните струјни кола, во најширока употреба се **трифазните** кола.

Според волт-амперската карактеристика, колата може да бидат **линеарни** и **нелинеарни**. Во најопшт случај колата се **нелинеарни**. Тоа се должи на постоењето на нелинеарни елементи во колата кај кои струјата од напонот не зависи според линеарен закон. Пример за причина за нелинеарноста се следниве:

- промената на напонот во железните јадра на индуктивните калемии ја менува индуктивноста,
- со зголемување на напонот во кондензаторите се менува и поларизацијата на диелектриците,
- дури и отпорот на спроводниците со промената на напонот не е секогаш константен (тој се менува со температурата, кај полупроводниците опаѓа со температурата, исто и кај диелектриците, а кај металите расте со температурата.)

Сепак, колата во кои има само омски отпор, бидејќи се смета дека отпорниците се загреваат незначително, најчесто се сметаат за линеарни.

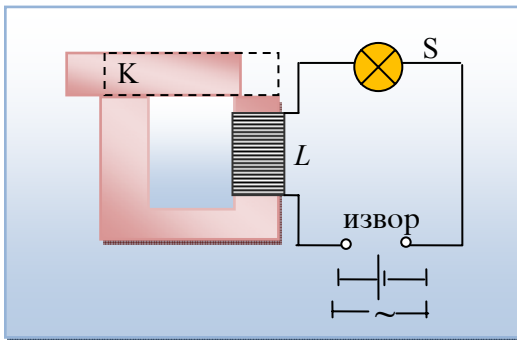
Електричните кола во кои електричниот отпор, индуктивноста и капацитетот (во кој и да било дел од колото) зависат од големината и насоката на напонот на тој дел се **нелинеарни кола**.

Како што беше кажано во претходното поглавје, сите променливи величини на наизменичните струи може да бидат прикажани со фазори - вектори кои ротираат. Таквото претставување се вика **метод на векторски дијаграм**. При тоа, како што веќе беше спомнато, големините на фазорите одговараат на амплитудните вредности на физичките величини. Условно се зема дека аглиите помеѓу векторите, во обратна насока од онаа на стрелките на часовникот одговараат на разликата во фазите меѓу соодветните величини. При тоа кој од векторите ќе се смета за **основен вектор**, т.е. вектор во однос на кој ќе се смета фазата на осцилирањето, зависи од условите во конкретната задача. Обично, за основен вектор се одбира *векторот на величината која е еднаква за сите делови во колото*: кај сериското поврзување на различните елементи тоа е јачината на струјата; кај паралелното поврзување како основен вектор се зема векторот на напонот.

Во колата со само омски отпор, кој често се вика **активен** отпор, јачина на струјата и напонот се во фаза (видете ја сликата 13.25), па така се нацртани и нивните фазори (сл. 13.26).

14.2.1. Индуктивен отпор

Низа елементи од колата со наизменична струја, како што се трансформатори, електромотори, придушници и слично, освен активен (омски) отпор имаат исто така и индуктивен отпор. Имено, променливата струја е причина за појавата на ЕМС на самоиндукцијата која се спротиставува на промените на јачината на струјата, поради кое и се јавува овој дополнителен отпор. Тоа го потврдува следниот експеримент.



Сл. 14.3

Експеримент

Еден калем е поврзан во струјно коло во кое може да биде вклучен извор на прав или на наизменичен напон (сл. 14.3). Калемот L е поставен на јадро од раставлив трансформатор, со помош на кој може да се менува индуктивитетот на калемот. Кога во колото е вклучен извор на прав напон светилката S

еднакво свети, независно од тоа дали калемот е вовлечен во јадрото или не, додека кога напонот е променлив, светилката помалку свети кога се зголемува индуктивитетот на калемот (при вовлекување во јадрото), а може и сосема да претстане да свети кога јадрото ќе го затвориме со железната котва K .

Ако како извор се употреби генератор чијашто фреквенција може да се менува ќе се покаже дека отпорот расте со фреквенцијата на наизменичната струја.

Ќе го разгледаме ова подробно. Објаснивме дека за сите квазистационарни струи важат Омовиот закон и Кирхофовите правила. Ние овде ќе го примениме Омовиот закон. Имено, кога низ калемот протекува наизменична струја, тогаш покрај приложениот напон V , во тој дел од колото се јавува и самоиндуцираната електромоторна сила, па тогаш Омовиот закон треба да се запише како:

$$I = \frac{V + \mathcal{E}_s}{R} = \frac{V - L \frac{dI}{dt}}{R} \Rightarrow V = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (14.17)$$

Имајќи предвид дека

$$I = I_0 \sin \omega t, \quad (14.18)$$

релацијата (14.17) $V = RI + L \frac{dI}{dt}$ поминува во:

$$V = RI_0 \sin \omega t + I_0 \omega L \cos \omega t = RI_0 \sin \omega t + I_0 \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (14.19)$$

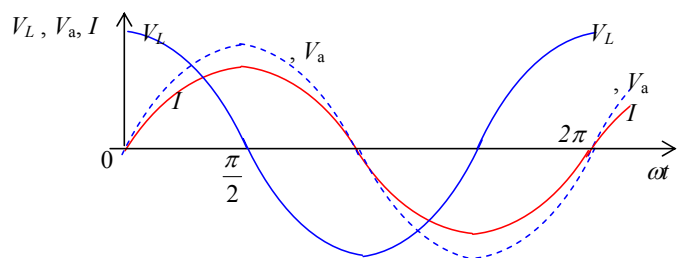
или

$$V = V_a + V_L$$

Од релацијава се гледа дека моменталната вредност на напонот се состои од две компоненти. Првата се должи на активниот омски отпор, и се вика **активна компонента на напонот**: $V_a = RI_0 \sin \omega t = V_0 \sin \omega t$, а втората е падот на напонот на индуктивниот отпор, која се вика **индуктивна компонентата на напонот** (V_L) еднаква на:

$$V_L = I_0 \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = V_{0L} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) ; \quad V_{0L} = I_0 \omega L \quad (14.20)$$

Активната компонента на напонот се совпаѓа по фаза со јачината на струјата, додека индуктивната ѝ претходи на струјата за $90^\circ (\pi/2)$.



Сл. 14.4

Заостанувањето на струјата I зад напонот за фаза $\pi/2$ се објаснува со фактот дека во калемот се појавува ЕМС на самоиндукцијата $\left(-L \frac{dI}{dt} \right)$ чия големина е пропорционална со брзината на промената на струјата. Значи, во моментот кога струјата има нулта вредност, нејзината промена $\left(\frac{dI}{dt} \right)$ има максимална големина, па според тоа и ЕМС на самоиндукцијата е максимална, додека во случајот кога струјата има максимална вредност, тогаш ЕМС на самоиндукцијата е еднаква на нула. Од досега кажаното може да се заклучи дека струјата ѝ претходи на ЕМС на самоиндукцијата за $90^\circ (\pi/2)$. Во однос на V_L јачината на струјата доцни во фазата за 90° (види сл. 14.4).

Од релациите 14.20 се гледа дека амплитудната вредност на индуктивната компонента на напонот е дадена со

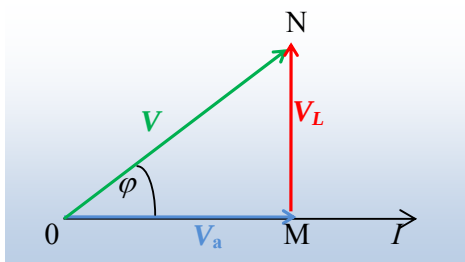
$$V_{0L} = I_0 \omega L \quad . \quad (14.21)$$

Оттука се добива

$$I_0 = \frac{V_{0L}}{\omega L} \quad (14.22)$$

од што се гледа дека улогата на отпор ја има величината ωL , која се нарекува **индуктивен отпор**, R_L . Бидејќи има димензии на отпор, се мери во оми. Според тоа, за индуктивниот отпор се добива релацијата:

$$R_L = \omega L \quad (14.23)$$



Сл. 14.5

На сликата 14.5 е даден векторскиот дијаграм на напонот составен од активната и индуктивната компонента на напонот, V_a и V_L . Активната компонента на напонот $V_a = IR$ се совпаѓа по насока и правец со насоката на фазорот на јачината на струјата I , кој претставува за овој случај основен вектор. Индуктивната компонента избрзува во фазата

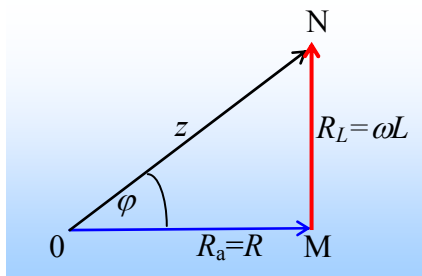
за 90° . Векторски збир на тие две компоненти го дава векторот на напонот V , кој со јачината на струјата, зафаќа агол φ што претставува фазна разлика помеѓу јачината на струјата и напонот. При сложување на овие два вектора се добива триаголник OMN, кој се нарекува **триаголник на напонот**. Од него следат следниве врски:

$$V_a = V \cos \varphi \quad ; \quad V_L = V \sin \varphi \quad ; \quad \tan \varphi = \frac{V_L}{V_a} \quad (14.24)$$

Од тој триаголник исто така следува:

$$V^2 = R^2 I^2 + (\omega L)^2 I^2 \quad ; \Rightarrow \quad I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{V}{z} \quad (14.25)$$

Последнава релација го дава Омовиот закон за ова коло. Во него со z е означен вкупниот отпор (**импеданција**) за даденото струјно коло еднаков на $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Ако сите напони се поделат со јачината на струјата, може да се добие **триаголник на отпорот** (сл. 14.6). Оттука



Сл.14.6

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (14.26)$$

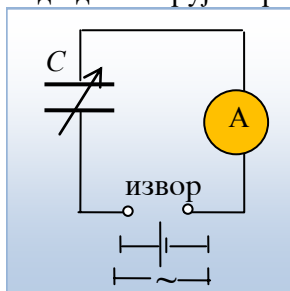
фазната разлика φ меѓу јачината на струјата и напонот е определена со односот помеѓу индуктивниот отпор и активниот омски отпор.

Отпор што е причина за создавањето на фазната разлика помеѓу јачината на струјата и напонот е наречен *реактивен отпор*. Следува дека

индуктивниот отпор е реактивен.

14.2.2. Капацитивен отпор

Ако составиме едно струјно коло од кондензатор и амперметар (сл. 14.7) и го вклучиме на извор на прав напон, ќе можеме да се убедиме дека струја нема да тече. Кондензаторот за постојаната права струја претставува бесконечен отпор. Меѓутоа, ако кондензаторот се вклучи на извор на наизменичен напон, ќе се забележи отклонување на амперметарот. Со зголемување на капацитетот на кондензаторот, ќе се види дека струјата расте.



Сл.14.7

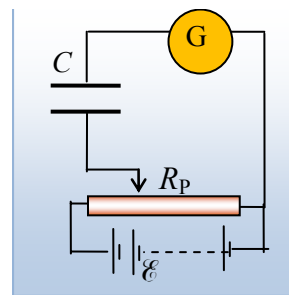
Струјата низ кондензаторот, за разлика од струјата низ спроводниците, која е резултат на спроводливоста, не е со иста природа. Нејзината големина зависи од брзината на промената на електричното поле што се создава помеѓу кондензаторските облоги, а пак тоа зависи од брзината со која доаѓа до промена на полнежот Q на самите облоги:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (14.27)$$

Таквата струја ќе тече како ако помеѓу облогите на кондензаторот има во вакуум така и ако има диелектрик. Оваа струја се нарекува **придвижна струја**. (Името е задржано од историски причини, не станува збор за никакви придвижувања).

Експеримент

Со експеримент скициран на сликата 13.32 може да се покаже дека во секој случај кога настанува промена на напонот на кондензаторските облоги, низ колото ќе тече струја. Ако таа промена на напонот ја правиме со тоа што го движиме лизгачот на потенциометарот R_p , сè дури доаѓа до промена на напонот ќе има и отклон на галванометарот. Доколку промената на напонот е побрза, и отклонот на галванометарот ќе биде поголем.



Сл.14.8

Ќе се вратиме повторно на релацијата (14.27). Ако на кондензаторските облоги се менува полнежот, тогаш со оглед на тоа што полнежот е $Q = CV$, се менува и напонот. Имено:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad ; \quad I = C \frac{dV}{dt} \quad (14.28)$$

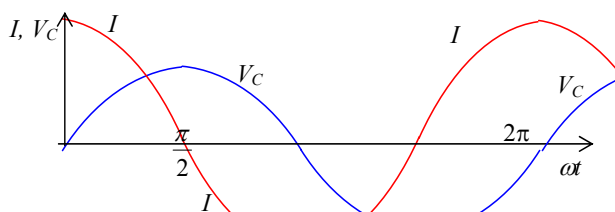
Ако е на облогите донесен напон кој се менува по синусен закон:

$$V_c = V_0 \sin \omega t \quad (14.29)$$

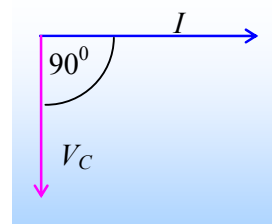
тогаш и јачината на струјата, дадена со 14.28, ќе се менува синусоидално:

$$I = C \frac{dV}{dt} = \omega C V_0 \cos \omega t = \omega C V_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (14.30)$$

Од последниве две релации се гледа дека променлива струја низ кондензатор прави да се појави фазна разлика помеѓу напонот и јачината на струјата. Таа фазна разлика, исто така, изнесува $90^\circ (\pi/2)$, со таа разлика што овде јачината на струјата избрзува пред напонот. Значи, капацитативниот напон задоцнува зад струјата за $\pi/2$.



Сл. 14.9



Сл. 14.10

Графиците на јачината на струјата и напонот за овој случај се дадени на сликата 14.9. На сл. 14.10 е даден соодветниот векторски дијаграм.

Фазната разлика меѓу напонот и јачината на струјата се објаснува на следниов начин. Кога напонот на кондензаторските облоги ја менува насоката, т.е. поминува низ нулата тогаш доаѓа до создавање на најголема придвижна струја. Имајќи ја предвид релацијата (14.30), излегува дека амплитудната вредност на струјата е:

$$I_0 = C\omega V_0 \quad ; \quad I_0 = \frac{V_0}{\frac{1}{\omega C}} \quad (14.31)$$

што укажува на тоа дека улогата на отпор во овој случај го игра $1/(\omega C)$, што се нарекува **капацитативен отпор** R_C . Оттука, капацитативниот отпор е еднаков на :

$$R_C = \frac{1}{\omega C} \quad (14.32)$$

Ако наместо обичен извор на наизменичната струја во експериментот опишан со сликата 14.8 се земе тон генератор-уред кој дава наизменична струја со можности за промена на нејзината фреквенција, може лесно да се покаже дека капацитативниот отпор е навистина обратно пропорционален со неговата фреквенција.

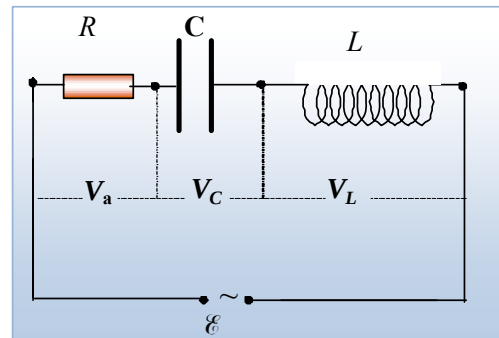
Со оглед на фактот што и капацитативниот отпор придонесува за создавање на фазна разлика меѓу напонот и јачината на струјата, констатираме дека и **капацитативниот отпор е реактивен**.

Ако во колото покрај капацитативниот отпор е вклучен и активен омски отпор, тогаш ќе постојат две компоненти на напонот, кои се фазно одместени, па вкупниот импеданција ќе биде еднаква на

$$z = \sqrt{R^2 + R_C^2} .$$

14.2.3. Електрично коло со серияска врска на различни видови отпори. Резонанција на напонот.

Да разгледаме струјно коло во кое се вклучени сите три вида отпори (слика 14.11). Во овој случај јачината на струјата низ сите три видови отпори е еднаква и нека е дадена со:



Сл. 14.11

$$I = I_0 \sin \omega t \quad (14.33)$$

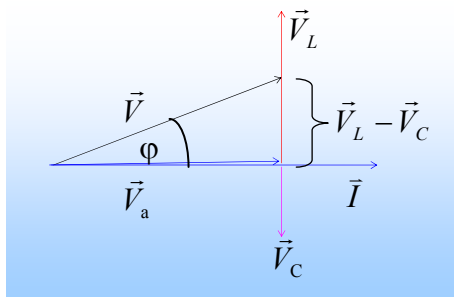
Падовите на напоните на одделните отпори на колото се:

$$V_a = IR \quad ; \quad V_C = IR_C = \frac{I}{\omega C} \quad \text{и} \quad V_L = IR_L = I\omega L \quad (14.34)$$

Напонот, донесен на краевите на трите елементи на колото е еднаков е на **збирот на падовите на напоните во векторска форма**, заради

постоењето на фазната разлика меѓу V_L и V_C во однос на V_a , така што може да се запише:

$$\vec{V} = \vec{V}_a + \vec{V}_C + \vec{V}_L \quad (14.35)$$



Сл.14.12

(Внимание: напоните се скалари, но овде доаѓа предвид само собирање на нивните фазори кои претставуваат векторски величини во векторскиот дијаграм). На сликата 14.12 е даден векторскиот дијаграм (триаголникот на напонот) за ова коло. За основен вектор е земен фазорот на јачината на струјата, бидејќи е таа иста за сите делови на колото. Се

гледа дека V_L е поголемо од V_C , што не мора секогаш да биде случај.

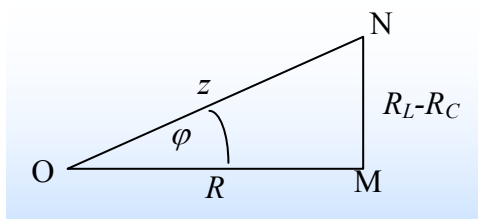
Од Питагорината теорема применета на триаголникот на напонот се добива:

$$V^2 = V_a^2 + (V_L - V_C)^2 = R^2 I^2 + I^2 \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2$$

Или, за струјата се добива

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} = \frac{V}{z} \quad (14.36)$$

Овој израз претставува **Омов закон за наизменична струја**, каде што именителот е z (импеданцијата) и е еднаква на :



Сл.14.13

$$z = \sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2} \quad (14.37)$$

На сликата 14.13. е даден триаголникот на отпорот, од каде и се добива релацијата за импеданцијата.

Во случај кога капацитативниот отпор е поголем од индуктивниот, тогаш фазната разлика помеѓу струјата и напонот φ е негативна. Од сликата се гледа дека за фазната разлика важат релациите:

$$\cos \varphi = \frac{R}{z} \quad ; \quad \sin \varphi = \frac{R_L - R_C}{z} \quad ; \quad \tan \varphi = \frac{R_L - R_C}{R} \quad (14.38)$$

Ако постои можност да се менува индуктивниот и капацитативниот отпор, и успееме да подесиме, тие да бидат еднакви, тогаш:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} . \quad (14.39)$$

Значи, реактивниот отпор ќе биде еднаков на нула, а напонот и јачината на струјата се со иста фаза. Тогаш според релацијата (14.36) низ колото ќе потече максимална струја. Појавата ја викаме **резонанција на напонот**.

Експеримент

Појавата резонанција на напонот може да се демонстрира така, што во коло како на сликата 14.1 се вклучени кондензатор со променлив капацитет, а индуктивитетот на калемот го менуваме со вовлекување или вадење на калемот во јадрото на еден раставливиот кондензатор. Ако наместо отпорник во колото е вклучена светилка, во услови кога реактивните отпори ќе се изедначат, светилката ќе свети максимално.

Ако во коло на наизменична струја се вклучени повеќе омски отпори, повеќе капацитативни, и повеќе индуктивни отпори, тогаш отпорите од секој вид треба посебно да се соберат па потоа да се употреби релацијата за Омов закон за наизменичната струја.

14.2.4. Коло со паралелна врска на отпорите. Резонанција на струјата

Да разгледаме едно коло со паралелно поврзани кондензатор и калем, како на сликата 14.14.

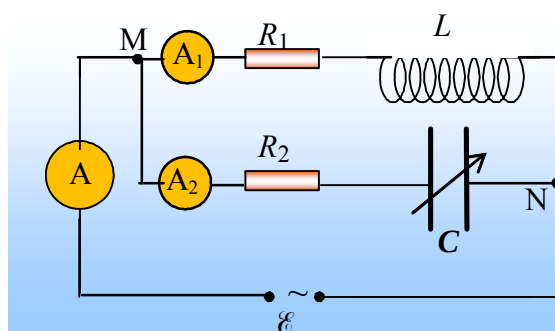
При ваквата врска, помеѓу точките М и N постои иста потенцијална разлика, којашто е еднаква за двете гранки. Но, во секоја од гранките тече различна струја што се регистрира на амперметрите, т.е

$$I_1 = \frac{V}{z_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{V}{z_2} . \quad (14.40)$$

Соодветните импеданции се дадени со:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2} \quad ; \quad z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (14.41)$$

Јачината на струјата во неразгранетиот дел, што ја мери амперметарот А не е еднаква на обичната сума на струите во одделните гранки 1 и 2, бидејќи меѓу струите постојат фазни разлики, предизвикани со потоењето на реактивните отпори во двете гранки. Со помош на векторскиот дијаграм, јачи-



Сл. 14.14

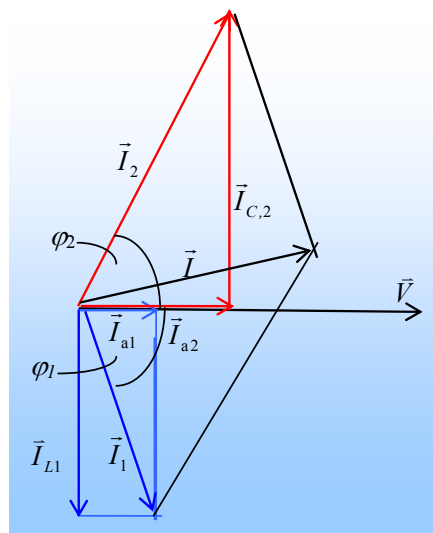
ната на струјата во неразгранатиот дел е векторска сума од јачините на струите во одделните гранки (види слика 14.14). За сликата да биде појасна векторите на струјата кои се однесуваат на првата гранка се нацртани со сино, а векторите на втората гранка со црвено, додека струјата во неразгранатиот дел и напонот се нацртани со црни линии.

Фазната разлика во одделните гранки може да се определи според, нам веќе, познатите релации:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} \quad ; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2} \quad \text{или}$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{R_L}{R_1} \quad ; \quad \tan \varphi_2 = \frac{R_C}{R_2} \quad (14.42)$$

При цртањето на векторскиот дијаграм (сл. 14.15) во овој случај, како основен вектор се одбира векторот на напонот, бидејќи тој е за двете гранки еднаков. Векторот на јачината на струјата го добиваме со векторско собирање на јачините на струите во двете гранки:



Сл.14.15

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \quad (14.43)$$

Во овој случај, исто така може да се постигне услов за резонанција. Имено, ако претпоставиме дека омските отпори во двете гранки се еднакви, односно $R_1=R_2$ и уште ако се подесат реактивните отпори во двете гранки да се еднакви :

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (14.44)$$

тогаш во двете гранки течат струи се исто фазно поместување, т.е. фазите φ_1 и φ_2 се еднакви но спротивни по насока. Ако згора на тоа е исполнет и условот $R_1=R_2$ и нивните големини се толку мали што може да се занемарат, тогаш $\varphi_1 \cong (\pi/2)$ а $\varphi_2 \cong -(\pi/2)$, се постигнува дека меѓу струите во двете гранки I_1 и I_2 постои фазна разлика π , тие стануваат противфазни. Тогаш струјата што тече по неразгранатиот дел ќе стане еднаква на нула, т.е.

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 = 0$$

Ако постојат активни отпори, а притоа е исполнет условот (14.44), тогаш и струјата во неразгранатиот дел ќе биде еднаква на збирот од активните компоненти, и тогаш тече минималната можна струја за даденото струјно коло. Појавата на минимално можната струја, поточно појавата на изедначување на индуктивната компонента на струјата од едната гранка со капацитативната од другата се нарекува **резонанција на струјата**.

14.3. МОЌНОСТ ВО КОЛО НА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

Во секое реално коло на наизменична струја разликуваме две различни моќности, и тоа

- **моментална моќност на струјата и**
- **средна моќност на наизменичната струја.**

Моменталната моќност е моќноста во даден момент од времето. Таа е определена со производот од моменталната вредност на јачината на струјата и моменталната вредност на напонот.

Ако фазната разлика меѓу напонот и струјата е φ , тогаш моменталните вредности на напонот и струјата се

$$V = V_0 \sin \omega t \quad \text{и} \quad I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (14.45)$$

па моменталната моќност е дадена со:

$$P(t) = I \cdot V = I_0 V_0 \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \frac{I_0 V_0}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

$$P(t) = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos \varphi - I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (14.46)$$

Како што се гледа, моменталната вредност на моќноста се состои од две компоненти. Првата е константна и не зависи од времето. Таа компонента се вика **активна моќност**.

Во релацијата 14.46 е искористена тригонометриската релација $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}; \text{ кога за } \frac{\alpha + \beta}{2} = \omega t - \varphi, \text{ а } \frac{\alpha - \beta}{2} = \omega t$

Втората компонента на моменталната моќност се менува со двојна фреквенција и може да биде како позитивна така и негативна.

Осцилирањето на моќноста во колото треба да се разбере на следниов начин. Во колото кое содржи индуктивен отпор, првата четвртина од периодот T кога струјата се зголемува, магнетното поле расте и дел од енергијата на изворот се претвора во енергија на магнетното поле во колото. Во моментот $t=T/4$ енергијата на магнетното поле U_m ја има својата максимална вредност:

$$U_m = \frac{LI_0^2}{2} \quad (14.47)$$

Ваквата насока на преносот на енергијата се смета за позитивна, па моменталната моќност што ја карактеризира брзината на преносот на енергијата, ќе биде позитивна.

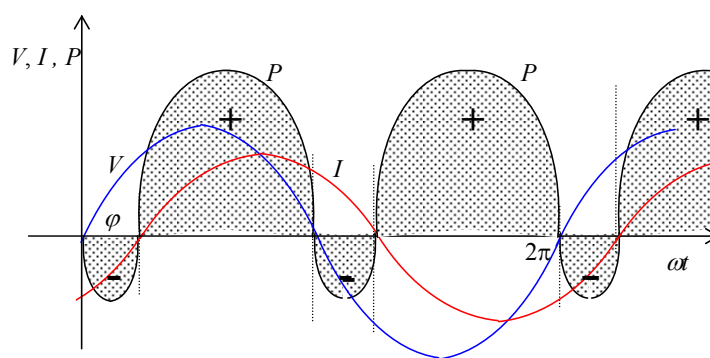
Во втората четвртина на периодот, кога струјата паѓа од максималната вредност на нула, енергијата на магнетното поле од колото се враќа на изворот, што се смета за негативна насока на преносот на енергијата, па одтаму и негативна моментална моќност. Тоа значи дека за време на една половина од периодата на струјата, енергијата извршува цел циклус на претворби, т.е. цела осцилација, што одговара на двојната фреквенција на моменталната моќност.

Сосема аналоган процес настанува ако во колото е вклучен капацитативен отпор, само што тогаш, енергијата на изворот за време од $(1/4) T$ се троши за создавање на максимална енергија на електрично поле :

$$U_e = \frac{CV_0^2}{2}.$$

Од кажаното може да се заклучи дека втората компонента на моќноста зависи од реактивниот отпор во колото, и затоа се вика **реактивна моќност**. Реактивната моќност ја карактеризира брзината на размена на енергијата помеѓу изворот на ЕМС и променливото магнетно или електрично поле. Активната моќност, пак, ја определува брзината на преобразбата на електричната енергија во други видови енергии (внатрешна-топлинска, светлинска, механичка или хемиска).

Графичката зависност на моменталната моќност при постоење на реактивен отпор е дадена на сликата 14.16.

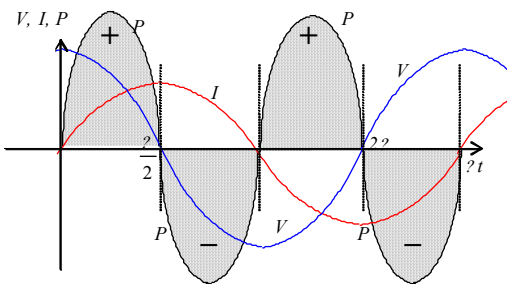


Сл. 14.16.. Моќност во реално коло со активен и реактивен отпор

Од равенката (14.46) како и од сликата 14.16 може да се види дека колку е помала фазната разлика помеѓу напонот и струјата, т.е. колку е помал реактивниот отпор, толку е помала реактивната моќност.

Во нереален идеален случај кога во колото постои само реактивен отпор, на пример, само индуктивен, тогаш $\varphi=90^\circ$, па равенката (14.46) поминува во

$$P(t) = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos(2\omega t + 90^\circ) \quad (14.48)$$



Сл. 14.17. Моќност во коло со само реактивен отпор (идеализиран случај)

па зависноста на моменталната моќност е дадена со сликата 14.17.

На графикот се гледа дека колку има позитивна моќност, толку е и негативна, па следува дека севкупно не постои моќност која би можела да биде искористена.

Ако меѓу напонот и струјата не постои фазна разлика, значи не постои реактивен отпор, тогаш

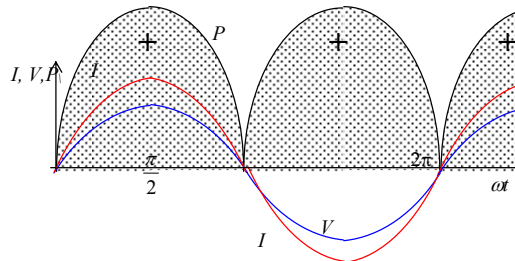
моќноста ќе биде дадена со кривата на сликата 14.18. Таму е $\varphi = 0$, па моќноста е секогаш позитивна, што може и аналитички да се покаже ако во релацијата (14.46) се замени $\varphi=0$.

$$P(t) = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} (1 - \cos 2\omega t)$$

или

$$P(t) = \frac{I_0 V_0}{2} (1 - \cos \omega t); \text{ односно}$$

$$P(t) = I_0 V_0 \sin^2 \omega t \quad (14.49)$$



Сл. 14.18. Моќност во коло без реактивен отпор.

14.3.1. Средна моќност на наизменичната струја

Преку изразот за моменталната моќност на наизменичната струја (релација 14.46) може да се пресмета средната моќност, и тоа за еден период од осцилирање на струјата :

$$P_{\text{sr}} = \frac{\int_0^T P dt}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_0 V_0}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt = \frac{I_0 V_0}{2} \cos \varphi$$

$$\text{или } P_{\text{sr}} = I_{\text{ef}} V_{\text{ef}} \cos \varphi \quad (14.50)$$

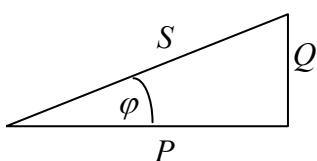
Гледаме дека средната моќност за еден период е еднаква на активната моќност.

Активната моќност се мери во вати, како и други поголеми единици од ват, мегават, гигават и сл. Затоа, во понатамошниот текст под моќност на наизменичната вредност ќе ја подразбираме оваа, активна моќност. Како што се гледа оваа моќност освен од големините на напонот и јачината на струјата зависи уште од фазната разлика помеѓу напонот и јачината на струјата, поточно од косинусот на аголот φ .

Во електротехниката, по аналогија на правата струја се воведува и поим на вкупна (максимална) моќност S на наизменичната струја, еднаква на производот од ефективните вредности на напонот и јачината на струјата:

$$S S = V_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \quad (14.51)$$

Притоа, најчесто индексите не се пишуваат, па излегува дека $S=V \cdot I$. За разлика од активната моќност, оваа моќност се мери во единицата волт-ампер (VA).



Сл.14.19

Коефициентот на моќноста ($\cos \varphi$)

покажува кој дел од вкупната моќност е активен. Колку е во колото поголем реактивниот отпор, толку е $\cos \varphi$ помал и помала е активната моќност. Зголемување на реактивниот отпор значи зголемување на реактивната моќност Q . Тоа значи во

векторски дијаграм на моќноста (сл.14.19), втората компонента на моќноста е реактивната моќност дадена со

$$Q = V_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \sin \varphi \quad (14.52)$$

Од дијаграмот е јасно дека $S^2 = P^2 + Q^2$. Реактивната моќност се мери со единицата **вар** (var).

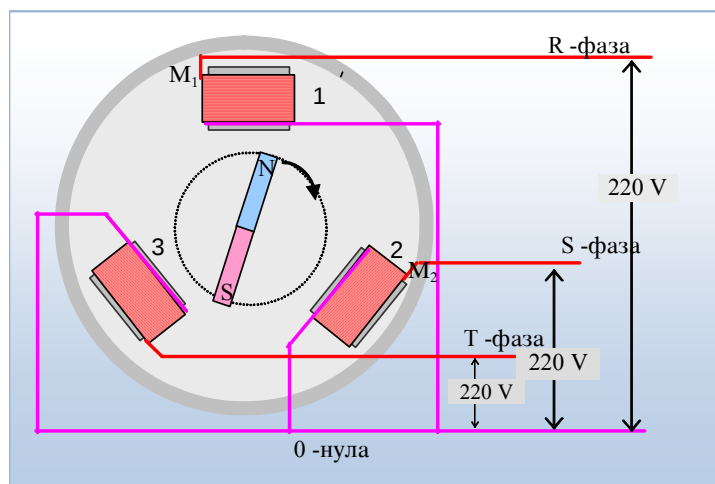
За мерење на активната моќност постојат инструменти ватметри. Вкупната моќност се мери како производ од измерената струја и напон кај наизменичната струја. Коефициентот на моќноста ($\cos \varphi$) е од големо практично значење, кај сите електрични машини и уреди (посебно кај електромоторите) и се тежнее тој да има поголема вредност, со што се зголемува коефициентот на полезно дејство на машините.

14.4. ТРИФАЗНИ СТРУИ

Полифазните струи во науката и техниката се воведени од Никола Тесла (1856-1943). Во техниката од најголемо значење се трифазните

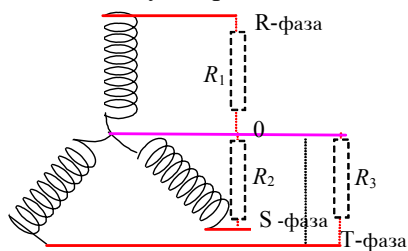
струи. Познато е дека со користење на ротација на рамка во магнетно поле во неа се индуцира синусоидална струја. На тој принцип работи генераторот на еднофазна наизменична струја.

Генерирањето на трифазната струја е прикажано на сликата 14.20.



Сл. 14.20

Генераторот за трифазна струја се состои, исто како и генераторот на монофазната струја, од статор и ротор. Статорот има три калемени чии оски се поставени под агол од 120° една во однос на друга. По еден крај, од секој од трите калемени на статорот ја пренесува струјата до потрошувачот. Другите краеве се поврзани меѓусебно во еден спроводник, кој обично се вика **нулти** спроводник. Поврзувањето во нултиот спроводник овозможува бројот на спроводниците, кои при пренос до потрошувачите од секој калем би бил $3 \times 2 = 6$, да се сведе на 4. Намалувањето на бројот на спроводниците од 6, на 4, се прави, како што е покажано на сликата 14.20, кое шематски се прикажува со т. н. “свезда” спојот прикажан на сликата 14.21.



Сл.14.21. Свезда спој на калемите

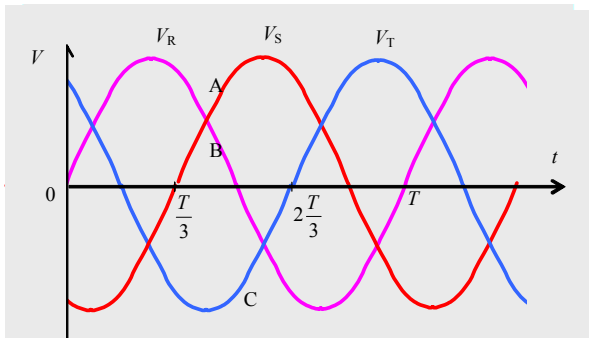
пол на електромагнетот прво поминува покрај првиот калем (1), па по истекот на време потребно да се направи $1/3$ завртување, поминува покрај вториот (2), додека по време од $2/3$ од времето потребно за едно

Помеѓу калемите на статорот се наоѓа роторот, кој обично е електромагнет, што се напојува со извор на постојана струја, така што игра иста улога како да е таму поставен постојан магнет (За подобро разбирање, на сликата е нацртан постојан магнет) .

При вртење на роторот, секој

завртување, поминува покрај калемот (3). Ако времето што е потребно да се направи едно завртување е период T , тогаш во секој од калемите ќе се индуцира ЕМС со задоцнување од $1/3 T$, во однос на претходниот калем. Фазите обично се означуваат како R, S и T.

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad ; \quad \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad ; \quad \mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (14.54)$$



Сл. 14.22

При натамошното вртење на роторот, ова постојано се повторува. Тоа значи дека индуцираниот напон во калемите може да се претстави со графикот што е даден на сликата 14.22.

Добиените напони во сите три калемии се еднакви, само што во исто време не се постигнуваат

максималните струи, ниту нултите вредности. Тие напони во нашата градска мрежа изнесуваат 220 V. Да видиме колкав е напонот меѓу фазите, значи, меѓу спроводниците R и S или R и T или S и T. Овој напон е *меѓуфазен напон*. Тој е еднаков на разлика на потенцијалот на пример, меѓу M_1 и M_2 (сл. 14.20)

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{12} &= \mathcal{E}_0 \sin \omega t - \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = \mathcal{E}_0 \left[\sin \omega t - \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\ &= 2\mathcal{E}_0 \sin \frac{\pi}{3} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) = 2\mathcal{E}_0 \sin 60^\circ \cos \left(\omega t - 60^\circ \right) = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t + 30^\circ \right) \end{aligned}$$

или меѓу фазниот напон е :

$$\mathcal{E}_{12} = \sqrt{3} \mathcal{E}_0 \sin \left(\omega t + 30^\circ \right) \quad . \quad (14.55)$$

Ако ефективната вредност на напонот во градска мрежа меѓу нулата и било кој од фазите е 220 V, помеѓу фазите е 380 V. Тоа значи при соединување на генераторот во “свезда” врска, може да се добијат два вида напони со амплитудни вредности $\mathcal{E}_0$ и $\mathcal{E}_0 \sqrt{3}$.

Ако мрежата е оптоварена со потрошувачи R_1 , R_2 и R_3 и тоа така што $R_1 = R_2 = R_3$ (симетрично оптоварување), во тој случај низ сите фази R, S, и T ќе тече иста струја, а низ нултиот спроводник нема да тече струја. Дека е тоа така, може да се покаже ако ги собереме моменталните вредности напоните на секоја фаза во кој било момент t

(слика 14.22). Индуцираните напони се синусоидални и дадени со релациите (14.54) нив им одговараат соодветни струи:

$$I_R = I_0 \sin \omega t \quad ; \quad I_S = I_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad ; \quad I_T = I_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) .$$

Ако се соберат овие струи што имаат иста максимална големина на струјата I_0 ќе се добие:

$$I = I_R + I_S + I_T = I_0 \sin \omega t + I_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + I_0 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) .$$

Од тригонометриските закони следува дека:

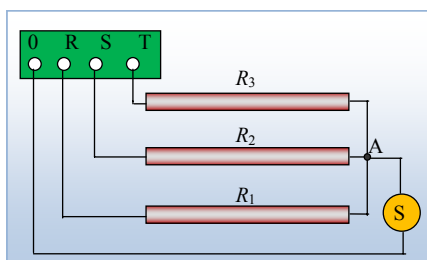
$$\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = 2 \sin \left(\omega t - \pi \right) \cos \frac{\pi}{3} = -\sin \omega t ;$$

па тогаш следува дека вкупната струја $I=0$.

Во услови на симетрично или приближно симетрично оптоварување, низ нултиот спроводник нема да тече струја. Дури и ако тече таа е незначителна. Меѓутоа, ако трите фази не се еднакво оптоварени, значи I_0 ќе биде различно, па низ нултиот спроводник може да тече значителна струја.

Експеримент

Демонстрација на нееднакво оптоварување на трите фази се прави со три отпорника со голема моќност врзани во градска мрежа као на сликата 14.23. Помеѓу заедничката точка А и нулата се поврзува некој регистратор за струја, на пример свонче S (или светилка или амперметар).



Сл. 14.23

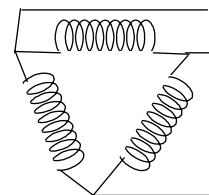
Ако сите потрошувачи, овде отпорници, се со еднаков отпор (еднакво оптоварување), низ колото на нултиот спроводник нема да тече струја. Меѓутоа, ако едниот отпор е различен од другите два, тогаш свончето ќе засвони, што укажува дека низ нултиот спроводник тече струја.

Покрај “свезда” спојот, во електротехниката се користи и **триаголен спој** (сл. 14.24). Кај таквото поврзување

се добива само меѓуфазен напон од 380 V.

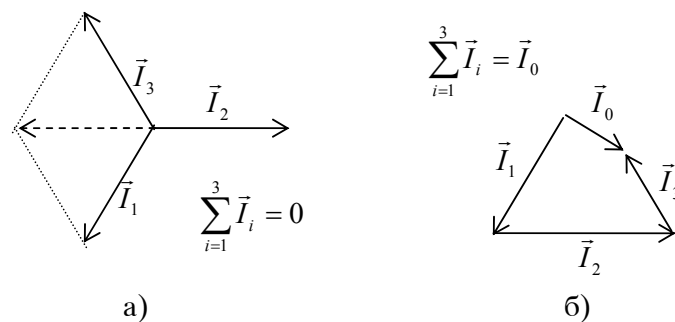
Предноста на ова врзување е во намалениот број спроводници (два), како и фактот дека при несиметрично оптоварување не се нарушува симетричноста на меѓуфазните напони.

Трифазните струи може да се претстават и преку векторски дијаграм. На сликата 14.25а е



Сл.14.24. Триаголен спој

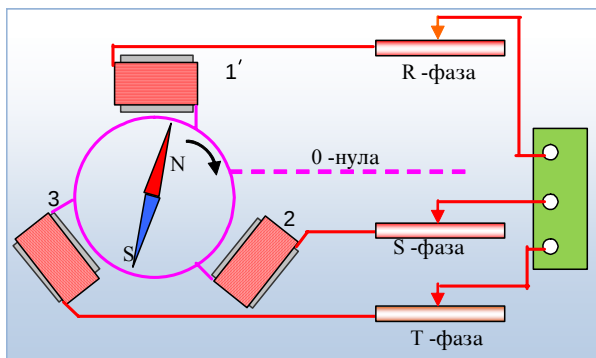
даден векторски дијаграм на струите при симетрично оптоварување. Сликата 14.25б се однесува на случајот која амплитудните вредности на струите се различни па нивниот векторски збир ја дава струјата низ нултиот спроводник I_0 .



Сл. 14.25

Трифазните струи имаат многу предности. Така, со ротација на еден ротор се добиваат три напони кои што можат одделно да се користат. При пренос на електричната енергија на големи растојанија, наместо 6 спроводници, што би биле потребни кај 3 монофазни генератори, доволни се 4, од кои нултиот најчесто е нешто потенок. Тој кај далноводите се одбегнува, со помош на триаголна врска.

Најголема предност на трифазните струи е можноста да се добие вртливо магнетно поле, со кое може да се добие ротационо движење (мотор).



Сл.14.26

Шема на експеримент со кој се покажува вртливото магнетно поле е дадена на сликата 14.26. Тука, три калем се поставени под агол од 120° и истите се поврзани со трите фази на градската мрежа. Во секоја врска е поставен и по еден отпорник. Отпорниците се еднакви, па вклучениот

отпор е, исто така, еднаков. Во секој од трите калемии струјата не постигнува максимум во исто време, туку фазно задоцнува во однос на претходниот. Така, северниот магнетен пол во калемот со S- фаза ќе се воспостави по $(1/3)T$ по воспоставувањето во R-фазниот калем, а во T-калемот уште подоцна, по време од $(2/3)T$. На тој начин се создава

вртливо магнетно поле. Ако како ротор употребиме магнетна игла, таа ќе почне да ротира. Значи, на овој начин сме добиле механичка енергија со помош на електрична трифазна струја. Ова всушност претставува принципна градба на мотор на наизменична струја.

Вртливото магнетно поле може да предизвика и ротација на еден метален диск којшто ќе се најде во просторот меѓу трите калема. Тоа е демонстрација чие што објаснение е исто како и кај таканареченото Теслино јајце (самиот Тесла го нарекол Колумбово јајце) (сл. 14.27)



Сл.14.27

Во просторот помеѓу трите калеми поставени под агол од 120° , како на сликата 14.27, Тесла поставил метално јајце. Кога ќе се пушти струја низ калемите, со оглед на тоа што максимумите на струјата во секој од калемите се постигнува со задоцнување од $T/3$, се создава магнетното поле кое е ротирачко. Ротацијата на магнетното поле е причина во металното јајце да се

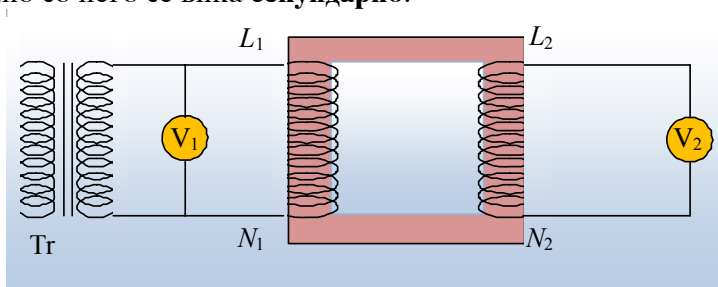
индуцираат вртложни Фукоови струи кои, според Ленцовото правило, имаат таква насока што нивното магнетно поле се спротиставува на причината поради која доаѓа до нивното создавање, па поради тоа јајцето ќе започне да ротира и при таа ротација ќе се исправи како што се гледа на сликата. Така, со помош на трифазната струја се добива механичка енергија, што всушност претставува основен принцип на работа на индукциониот (асинхронен) мотор, којшто Тесла го има изумено уште во 1882 година, а кој денес најчесто се среќава во индустријата, (се смета дека околу 90% од сите мотори се базираат на Теслиниот асинхрон мотор). Овој тип мотори може да се сретне и во уредите во домаќинствата, па дури и кај компјутерите (ротација на компакт диските).

Треба да се напомене дека сè до Теслините изуми променливата наизменична струја се сметало дека е некорисна. Дури ниту изумот на трансформаторот со кој се покажало дека струјата може да се трансформира од струја со низок напон и релативно голема јачина, во струја со висок напон но мала јачина, не ја покажале предноста на наизменичната струја.

14.5. ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформаторот е уред со чија помош може да се менува напонот на наизменичната струја, при иста фреквенција. Конструиран бил од Јаболчков (Яблочков) во 1876 година, а независно од него и од Ганлард (Ganlard) во 1880 година.

На сликата 14.28 е дадена шемата на функционирањето на трансформаторот. Тоа се два калема, електрично изолирани навлечни на исто железно јадро и поврзани во две кола. Колото кое е поврзано со изворот обично го викаме **примарно**, а другото кое е индуктивно поврзано со него се вика **секундарно**.



Сл.14.28. Принцип на работа на трансформатор

Ако сметаме дека омскиот отпор во примарното коло е мал и може да се занемари, тогаш ЕМС $\mathcal{E}_1$ која дејствува во примарот е бројно еднаква, но спротивна по знак на ЕМС на самоиндукцијата

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_{si} \quad (14.56)$$

Во секоја навивка на примарниот калем се создава ЕМС на самоиндукцијата која е еднаква на $-\frac{d\Phi}{dt}$, а во N_1 навивки на примарот ќе се индуцира електромоторна сила:

$$\mathcal{E}_{si} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (14.57)$$

па ако ова се внесе во (14.56) за ЕМС на примарот се добива:

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (14.58)$$

Бидејќи истиот магнетен флуks го понижува и секундарниот калем, тогаш во секоја навивка на овој калем ќе се јави ЕМС на индукцијата, па во целиот секундарен калем кој се состои од N_2 навивки ќе се јави ЕМС $\mathcal{E}_2$ дадена со:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (14.59)$$

Ако последниве две равенки се поделат ќе се добие:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = -\frac{N_1}{N_2} \quad (14.60)$$

Значи трансформаторот ја менува ЕМС, согласно односот на бројот на навивките во примарот и секундарот. Знакот минус укажува дека електромоторните сили се противфазни, што се потврдува и експериментално. На волтметрите на сликата 14.28 може да се прочита

колкави се напоните во примарното и во секундарното коло. Така ќе се убедиме дека нивниот однос е еднаков на односот на бројот на навивките.

Кај трансформаторот при отворено секундарно коло индуктивитетот на примарот е голем, тоа значи дека е голем и индуктивниот отпор R_L па струјата во примарот е слаба. Таа се вика *сѝруја на ѝразен од*. При затворање на секундарното коло, се создава магнетно поле кое според правилото на Ленц се спротиставува на промените на магнетното поле во примарот (значи го компензира тоа поле). Тоа доведува до намалување на индуктивниот отпор во примарот и до пораст на јачината на струјата I_1 . На тој начин, моќноста на секундарот има влијание врз моќноста на примарот.

Општата теорија на трансформаторот, особено ако се води сметка за улогата на хистерезисот кој се јавува во јадрото, е доста сложена. Загубите на енергијата, пораду загревање, вршење на работа при магнетизација и демагнетизација (хистерезисни губитоци) поради Фукоовите струи што се создаваат во јадрото, кај модерните трансформатори се релативно мали, најмногу 2%. Загубите поради Фукоовите струи се намалуваат така што јадрата на трансформаторот се прават од тенки железни лимови кои потоа се лепат. Така се намалува масивноста на спроводникот и не можат да се индуцираат силни вртложни струи. За ваквите трансформатори може да се смета дека моќноста на примарот е еднаква со моќноста на секундарот :

$$\mathcal{E}_1 I_1 = \mathcal{E}_2 I_2 \quad \text{или} \quad V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (14.61)$$

Значи, при трансформација на напонот (V), кај трансформаторот се менува и струјата. Односот помеѓу јачината на струјата во примарот I_1 и струјата во секундарот I_2 е обратно пропорционална, со односот на соодветните ЕМС, односно напони, или:

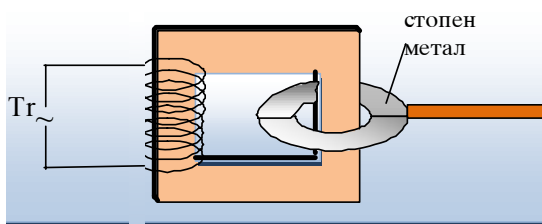
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (14.622)$$

Токму овој факт е од големо значење за предноста на наизменичната струја во однос на еднонасочната непроменлива струја. Струјата при течење го загрева спроводникот низ којшто тече. При тоа според Џуловиот закон ослободената топлина е $\Delta W_{\text{topl}} = I^2 R \Delta t$, каде што, R е отпорот на спроводникот, а Δt е времетраењето на течењето. Како што се гледа од релацијава, топлината што всушност се губи како енергија е пропорционална со квадратот на јачината на струјата. Затоа, ако струјата се трансформира во струја со висок напон, а мала јачина, при преносот на електричната енергија губитоците се многу помали.

Трансформација на јачината на струјата со трансформаторите е важен и од други аспекти. Меѓу другото, тој е искористен кај некои уреди, како што е уредот за заварување.

Експеримент

Да го демонстрираме тоа со опитот даден на сликата 14.29.



Сл. 14.29.

Примарот на раставливиот трансформатор се поврзува со извор на наизменична струја (реглер трансформатор). Како секундар на трансформаторот е поставена само една метална обвојна катичка во којашто е поставено малку калај. Бидејќи во секундарното коло се индуцира многу јака струја ($N_2 = 1$, а на пример $N_1 = 500$) таа ќе го загрее спроводникот и металот ќе се стопи.

Трансформацијата на струја со понизок напон, а појака струја се прави во близина на потрошувачите, а кај некои уреди за кои е потребна многу јака струја на напојување, постојат вградени трансформатори.

Коефициентот на полезно дејство на трансформаторот е многу голем. Тој се дефинира како однос меѓу моќноста на секундарот и моќноста на примарот:

$$\eta = \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} \leq 1 \quad (14.63)$$

Овој однос зависи од оптоварувањето на трансформаторот, а секогаш е број помал од единица.

Кај некои трансформатори, секундарот е изведен како дел од примариот калем. Тоа се т.н. автотрансформатори.

Постојат и многу други уреди кај кои е искористена појавата електромагнетна индукција. Така на пример таков уред е индукторот. И кај него постои примар и секундар. Промената на флуksот во примарот се прави со постојано вклучување и прекинување на струјата, поради што во секундарот на индукторот кој има многу голем број навивки се индуцира високонапонска струја. Струјата е речиси еднонасочна, пулсирачка.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. Колкав е периодот на осцилирање на наизменичната струја на градската мрежа кај нас, а колкав е во САД?
2. Кои се основни предности на повеќефазните (трифазните) струи во однос на монофазните?
3. Кои величини се менуваат со помош на трансформаторот?
4. Во автомобилите се користат уредите популарно наречени "бобини". Кај нив во примарното коло е вклучен акумулатор (12 V) но и специјален електромагнетен прекинувач кој овозможува постојано прекинување на струјата. Колкав треба да биде бројот на навивките во секундарниот калем за да се добие напон од најмалку 12 000 V. Овој напон, инаку, овозможува искрење на "свеќичките" и палење на бензинските пари во моторот?

Пример задачи

5. Ротор на генератор на наизменична струја со фреквенција 60 Hz се врти во магнетно поле со индукција $B = 0,15$ T. Колку навивки треба да има калемот со плоштина на пресекот на секоја навивка $A = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ за амплитудната вредност на електромоторната сила да изнесува $\mathcal{E}_0 = 170$ V.

Решение:

Амплитудната вредност на ЕМС е:

$$\mathcal{E}_0 = NBA\omega$$

Одтука

$$N = \frac{E_0}{BA \cdot 2\pi f} = \frac{170}{0,15 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2\pi \cdot 60} = 150 \text{ навивки.}$$

6. Волтметарот покажува ефективна вредност на напонот од $V = 100$ V. а) Колкава е неговата максимална вредност? б) Колкава е средната вредност на напонот?

Решение:

а)

$$V_{\text{ef}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad ; \quad V_0 = V_{\text{ef}} \sqrt{2} = 141,42 \text{ V}$$

б)

$$V_{\text{sr}} = 0,90 \cdot V_{\text{ef}} \approx 127,27 \text{ V.}$$

- 7) За колку е поголем индуктивниот отпор на некој калем во САД отколку во Европа?

Решение:

$$R_L = \omega L = 2\pi f L$$

во САД: $R_{L,1} = 2\pi f L = 2\pi \cdot 60 \cdot L$ а во Европа $R_{L,2} = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot L$.

Односот:

$$\frac{R_{L,1}}{R_{L,2}} = \frac{2\pi \cdot 60 \cdot L}{2\pi \cdot 50 \cdot L} = 1,2$$

8) Индуктивен калем со индуктивитет 10 H и отпорник со омски отпор $R = 1000 \text{ }\Omega$ врзани се во серија на напон $V = 220 \text{ V}$ и фреквенција 50 Hz . Колкава струја поминува низ колото? Колкава е фазната разлика помеѓу напонот и струјата?

Решение:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{220}{\sqrt{10^4 + 10^2 \cdot 3,14^2 \cdot 100^2}} = 0,067 \text{ A}$$
$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad \varphi = 72^\circ 20' \sim 1,26 \text{ rad.}$$

9) Кондензатор со капацитет $1 \text{ }\mu\text{F}$ и отпорник со отпор $100 \text{ }\Omega$ се врзани со извор со напон $V = 20 \text{ V}$ и фреквенција 50 Hz . Колкава струја тече низ ова коло?

Решение:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{20}{\sqrt{10^4 + \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} \approx 0,17 \text{ A.}$$

10. Индуктивен калем со индуктивитет $L = 0,2 \text{ H}$ и омски отпор $R = 13,5 \text{ }\Omega$ е врзан во серија со кондензатор со капацитет $C = 20 \text{ }\mu\text{F}$. Ако напонот на мрежата е 220 V , а фреквенцијата 50 Hz да се определи: а) Колкава струја тече низ колото; б) Колкава е фазната разлика меѓу струјата и напонот?

Решение:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{13,5^2 + \left(314 \cdot 0,2 - \frac{10^6}{314 \cdot 20}\right)^2}} \approx 2,25 \text{ A}$$
$$\tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = -7,18. \text{ Бидејќи } \tan(-\varphi) = -\tan \varphi \quad \varphi \sim -82^\circ$$

11. При вклучување на калем во коло со постојана струја со напон

$V_p=12\text{ V}$ амперметарот покажувал струја со јачина $I = 4\text{ A}$. Ако истиот калем се вклучи во коло со наизменична струја со иста големина на напонот и фреквенција 50 Hz , струјата е $I_n=2,41\text{ A}$. Да се определи а) индуктивитет на калемот; б) фазната разлика меѓу напонот и струјата; в) да се нацрта векторскиот дијаграм за овој случај г) Колкав капацитет треба да се вклучи во ова коло за да настане резонанција на напонот, и во овој случај да се нацрта векторскиот дијаграм.

Решение

а) Бидејќи при постојана струја не постои друг отпор освен омскиот, тогаш:

$$R = \frac{V_p}{I_p} = \frac{12}{4} = 3\ \Omega$$

Кај наизменичната струја импеданцијата е:

$$z = \frac{V_n}{I_n} = \frac{12}{2,4} = 5\ \Omega, \text{ а бидејќи}$$

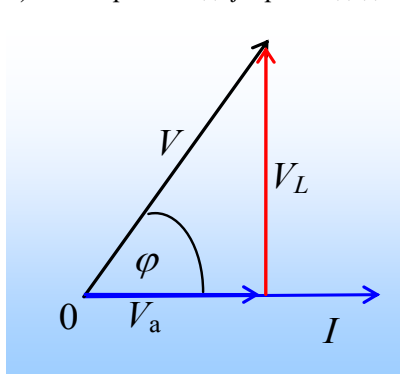
$$z = \sqrt{R^2 + R_L^2} \Rightarrow R_L = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{25 - 9} = 4\ \Omega.$$

$$L = \frac{R_L}{2\pi f} = \frac{4}{314} = 12,7\text{ mH}$$

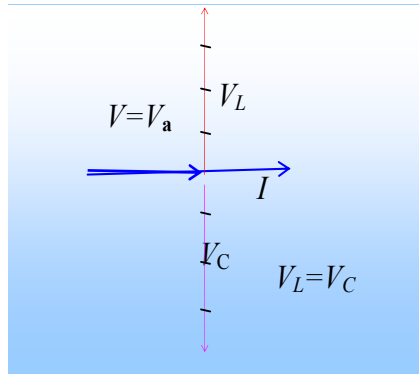
б) Фазната разлика φ :

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} = \frac{4}{3} = 1,33 \quad \varphi \approx 53^\circ,$$

в) Векторскиот дијаграм е даден на сликата 14.30а.



Сл. 14.30а



Сл.14.30б

г) $\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega^2 L} \approx 0,8\text{ mF}$. Во овој случај поради еднаквоста на реактивните отпори еднакви се и напоните $V_C=V_L$, па е $V=V_a$ што е прикажано на сликата 14.30б.

12. Во струјно коло со напон $V=220\text{ V}$ и фреквенција $f=50\text{ Hz}$ во серија се вклучени кондензатор со капацитет $C=40\text{ }\mu\text{F}$, активен отпорник со отпор $R=80\text{ }\Omega$ и калем со индуктивитет $L=446\text{ mH}$. Да се определи импеданцијата z на струјното коло, јачината на струјата I , активната компонента на напонот V_a , индуктивната компонента V_L и капацитативната компонента на напонот V_C .

Решение:

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{80^2 + \left(314 \cdot 0,446 - \frac{10^6}{314 \cdot 40}\right)^2} \approx 100\text{ }\Omega$$

а струјата: $I = \frac{V}{z} = \frac{220}{100} = 2,2\text{ A}.$

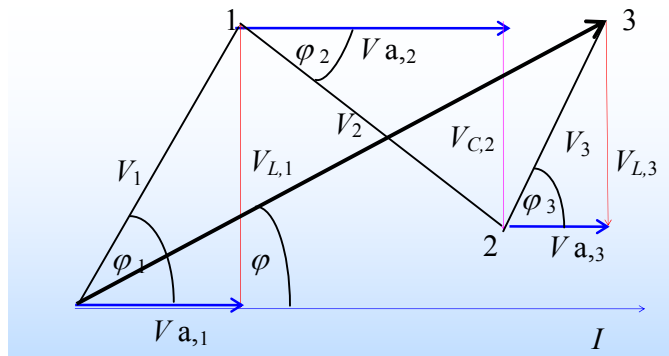
Напоните на одделните делови се:

$$V_a = RI = 80 \cdot 2,2 = 176\text{ V}; \quad V_L = \omega LI = 314 \cdot 0,446 \cdot 2,2 = 308\text{ V}$$

$$\text{Фазната разлика } \cos \varphi = \frac{R}{z} = \frac{80}{100} = 0,8 \Rightarrow \varphi = 37^\circ$$

13. Во коло со напон $V = 220\text{ V}$ во серија се вклучени три приемници кои имаат активен и реактивен отпор со голедини: $R_1 = 10\text{ }\Omega$, $R_2 = 24\text{ }\Omega$, $R_3 = 6\text{ }\Omega$; $R_{L,1}=20\text{ }\Omega$; $R_{C,2}=18\text{ }\Omega$; $R_{L,3}=16,5\text{ }\Omega$. Определете ја струјата во колото, фазната разлика на секој од приемниците во целото коло. Нацртајте го векторскиот дијаграм.

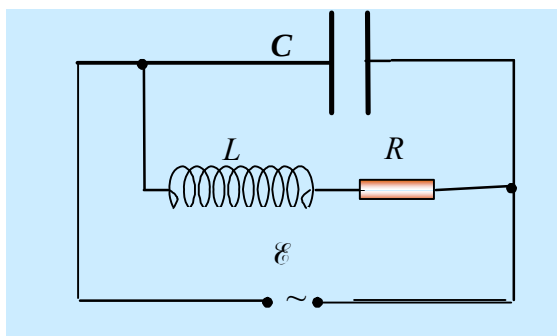
Одговор: $I=5\text{ A}$; $\varphi_1=63^\circ 50'$, $\varphi_2=-36^\circ 50'$; $\varphi_3=70^\circ$; $\varphi=25^\circ 50'$. Векторскиот дијаграм е даден на сликата 14.31



Сл.14.31

13. Да се пронајде условот за резонанција во колото со две паралелни гранки, дадено на сликата 14.32.

Решение:



Сл.14.32

изместена во однос на напонот за 90° , а во гранката со отпорникот и калемот таа заостанува зад напонот за некоја фазна разлика φ_1 (види го векторскиот дијаграмна сликата 14.33a):

$$\tan \varphi_1 = \frac{\omega L}{R}.$$

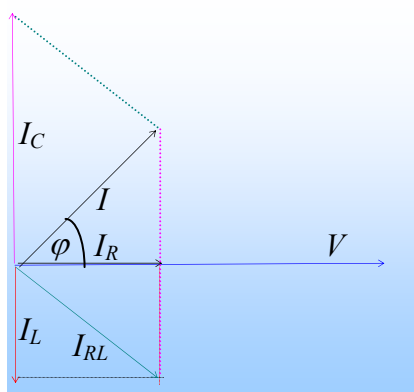
Резултантната струја I се добива со векторско собирање на струите I_C и I_{RL} . Оваа струја е фазно одместена за φ во однос на напонот.

Напонот меѓу точките на гранање двете гранки е еднаков и со иста фаза. Меѓутоа, струите во општ случај се различни:

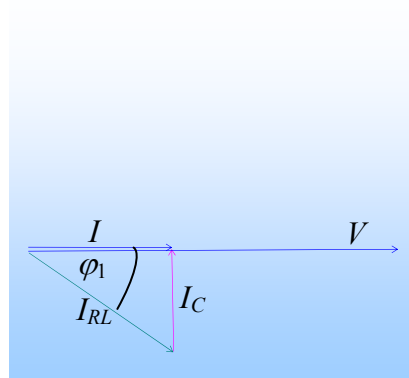
$$I_C = \frac{V}{R_C} = \omega C V \quad (1)$$

$$I_{RL} = \frac{V}{z_1} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (2)$$

Струјата во гранката на кондензаторот е фазно



Сл.14.33a



Сл.14.33б

Услов за струјна резонанција е низ колото да тече минимална струја, односно да постои максимален отпор. Тоа се постигнува кога резултантната струја I е во фаза со напонот (сл.14.33б). Од сликата следува:

$$I_C = I_{RL} \sin \varphi_1 \quad (3)$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (4)$$

Со замена на (1), (2) и (4) во (3) се добива

$$\omega CV = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \Rightarrow C = \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (5)$$

од овде за резонантната фреквенција се добива:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (6)$$

а ако омскиот отпор е занемарлив

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (7)$$

15. Во коло со наизменична струја со напон $V = 220 \text{ V}$ паралелно се вклучени: мотор чиј активен отпор е $R = 8 \Omega$, а индуктивниот $R_L = 6 \Omega$ и кондензатор со капацитативен отпор $R_C = 40 \Omega$. Да се определи струјата во моторот и кондензаторот, а исто и во неразгранетиот дел, како и фазната разлика меѓу напонот и струјата во ова коло.

Решение:

Струјата низ моторот е :

$$I_1 = \frac{V}{z_1} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + R_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 22 \text{ A}, \text{ а струјата низ кондензаторот } I_2:$$

$$I_2 = \frac{V}{z_2} = \frac{V}{R_C} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ A}.$$

За да се определи струјата во неразгранетиот дел треба да се најде активниот и реактивниот дел на струите во одделните гранки:

$$I_{a,1} = I_1 \cos \varphi_1 ; \quad \cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} = 0,8 ; \quad I_{a,1} = 22 \cdot 0,8 = 17,6 \text{ A}$$

$$I_{a,2} = I_2 \cos \varphi_2 ; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2} = 0 ; \quad I_{a,2} = 0$$

$$I_{r,1} = I_1 \sin \varphi_1 ; \quad \sin \varphi_1 = \frac{R_L}{z_1} = \frac{6}{10} = 0,6 ; \quad I_{r,1} = 22 \cdot 0,6 = 13,2 \text{ A}$$

$$I_{r,2} = I_2 \sin \varphi_2 ; \quad \sin \varphi_2 = \frac{R_C}{z_2} = \frac{40}{40} = 1 ; \quad I_{r,2} = I_2 = 5,5 \text{ A}$$

Активната компонента на неразгранетата струја е еднаква на аритметичката сума на активните компоненти на гранките, а реактивната на алгебарската сума на реактивните струи:

$$I_a = I_{a,1} + I_{a,2} = 17,6 + 0 = 17,6 \text{ A}$$

$$I_r = I_{r,1} + I_{r,2} = -13,2 + 5,5 = -7,7 \text{ A}$$

Струјата во неразгранетиот дел се добива како:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{17,6^2 + 7,7^2} = 19,2 \text{ A}$$

Фазната разлика ќе ја определиме од односот меѓу активната струја I_a и струјата I :

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} = \frac{17,6}{19,2} = 0,91; \quad \Rightarrow \varphi = 24^\circ.$$

16. Во коло со напон $V=220 \text{ V}$ и фреквенција $f=50 \text{ Hz}$ е вклучен калем со индуктивитет $L=0,127 \text{ H}$ и отпор $R=30 \Omega$. Определете ги активниот и вкупниот отпор на калемот, активната и реактивната компонента на напонот, како и активната и реактивната компонента на моќноста.

Решение:

$$R_L = \omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,127 = 39,87 \Omega$$

$$z = \sqrt{R^2 + R_L^2} = \sqrt{900 + 1589,61} \approx 50 \Omega$$

$$I = \frac{V}{z} = 4,4 \text{ A}$$

$$V_a = RI = 4,4 \cdot 30 = 132 \text{ V}$$

$$V_L = \omega LI = 4,4 \cdot 39,87 = 175,42 \text{ V}$$

Вкупната моќност:

$$S = I \cdot V = 4,4 \cdot 220 = 968 \text{ V} \cdot \text{A},$$

а активната:

$$P = I \cdot V \cos \varphi = 968 \cdot 0,6 = 58,8 \text{ W} \text{ бидејќи } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{30}{50} = 0,6.$$

Реактивната моќност е:

$$Q = I \cdot V \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{937024 - 337328,64} = 774,4 \text{ var}$$

17. Кон потрошувач со активен отпор $R=8 \Omega$ и индуктивен отпор $R_L=6 \Omega$, вклучен во коло со напон $V=127 \text{ V}$ и фреквенција $f=50 \text{ Hz}$, паралелно е вклучен кондензатор со капацитет $C=40 \mu\text{F}$. Определете ја струјата во неразгранетиот дел и во паралелните гранки, коефициентот на моќноста, активната и реактивната моќност во колото.

Решение:

Кон серески врзаните омски и индуктивен отпор се врзува паралелно капацитативен отпор (сл.14.34а).

Напонот $V_{AB} = V = 127 \text{ V}$

$$I_1 = \frac{V}{z_1} = \frac{127}{\sqrt{R^2 + R_L^2}} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V}{1/\omega C} = 127 \cdot 314 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 1,59 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_1 = 0,62 \Rightarrow \varphi_1 \approx 52^\circ$$

Според векторскиот дијаграм (сл.14.34б) :

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 = 9,79 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} = 0,79 \Rightarrow \varphi \approx 37^\circ$$

За моќноста се добиваат вредности:

Вкупната моќност:

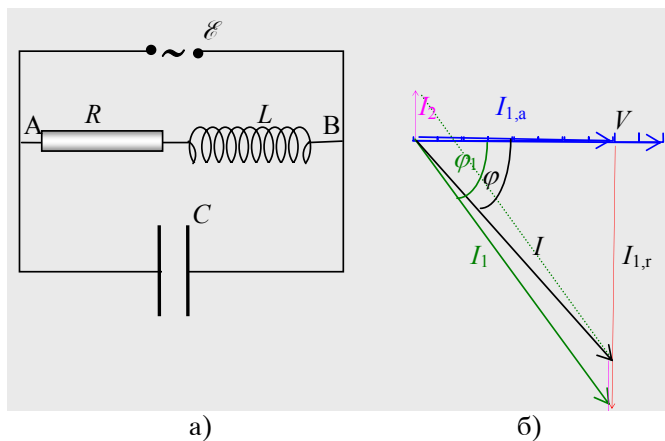
$$S = I \cdot V = 1243,79 \text{ V} \cdot \text{A} ;$$

активната

$$P = I \cdot V \cos \varphi = 982,23 \text{ W} ,$$

а реактивната

$$Q = I \cdot V \sin \varphi = 743,75 \text{ var}$$



Сл.14.34

18. Во трифазно коло со меѓуфазен напон $V_1=380 \text{ V}$ во звезда врзување вклучен е потрошувач чиј активен отпор е $R_a=20 \Omega$, а реактивниот $R_i=15 \Omega$. Да се определи големината на фазниот напон, струјата низ секоја од фазните линии R,S, и T коефициент на моќноста и импеданцијата z .

Решение:

$$V_{\text{fazno}} = \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V} \text{ и тоа } V_R = V_S = V_T = 220 \text{ V} \text{ при еднакво оптоварување,}$$

тогаш јачината на струјата во сите фазни линии се еднакви и се добиваат како однос меѓу напонот V_{fazno} и импеданцијата z :

$$I = \frac{V_{\text{fazno}}}{z} = \frac{220}{\sqrt{R^2 + R_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{20^2 + 15^2}} = 8,8 \text{ A} ;$$

$$z = 25 \Omega ; \cos \varphi = \frac{R_a}{z} = \frac{20}{25} = 0,8.$$

19. Трансформатор за снижување на напонот при вклучување во мрежа од $V_1 = 10 \text{ kV}$ има коефициент на трансформација $k=45$. Определете го напонот на краевите од секундарниот калем, моќноста на празниот од на трансформаторот, ако $I_0 = 5 \text{ A}$, ако коефициент на моќноста е $\cos \varphi = 0,2$.

Решение:

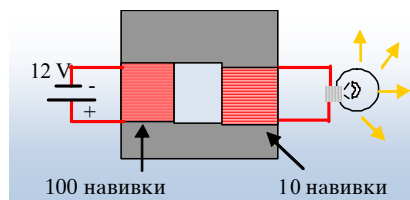
Коефициентот на трансформација е $k = \frac{N_1}{N_2}$. Бидејќе станува збор за намалување на напонот, за напонот на секундарот се добива:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \Rightarrow V_2 = \frac{1}{k} V_1 = \frac{1}{45} \cdot 10 \cdot 10^3 = 222 \text{ V}$$

Моќноста при празен од е дадена со:

$$P = V I_0 \cos \varphi = 10 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 0,2 = 10 \text{ kW}$$

20. Колкав е напонот на краевите на светилката дадена на сликата 14.35, колкава струја тече низ неа?



Сл.14.35