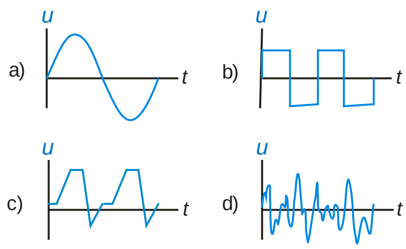
1. Osnovni pojmi izmeničnih električnih količin

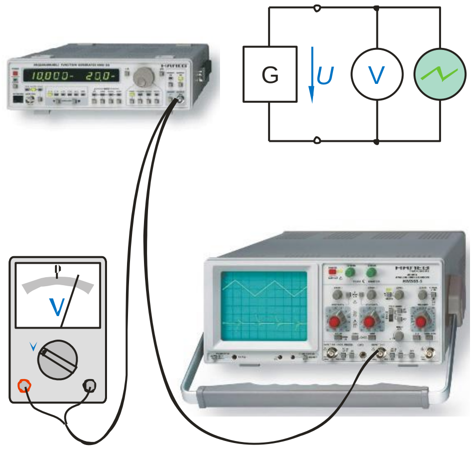


V osnovah elektrotehnike 1 smo spoznali električne napetosti in tokove, katerih **velikost** in **smer** se s časom praviloma **nista spreminjali.** V elektrotehniki pa tako na področju **elektronike** kot **elektroenergetike** uporabljamo tudi napetosti in tokove, ki s časom **spreminjajo** velikost in smer.

Spreminjajoče se napetosti in tokovi imajo v osnovi podobne lastnosti in učinke (toplotne, magnetne …) kot enosmerne napetosti in tokovi. Zaradi **spreminjanja** svoje **velikosti** in **smeri** pa imajo še druge lastnosti in učinke, ki omogočajo delovanje številnih elektroenergetskih in elektronskih naprav.

Spreminjajoče se fizikalne količine delimo v osnovi na dve skupini:

- ⇨ Količine z **enakomerno ponavljajočo** se časovno odvisnostjo spreminjanja (sl. a, b, c) imenujemo **periodične** količine.
- ⇨ Količine z **neponavljajočo** se časovno odvisnostjo spreminjanja (sl. d) imenujemo **neperiodične** količine.



Potek spreminjanja električne količine v odvisnosti od časa lahko, poleg z opazovanjem na zaslonu osciloskopa[1], dobimo tudi z risanjem na osnovi znanih trenutkih vrednosti količine.

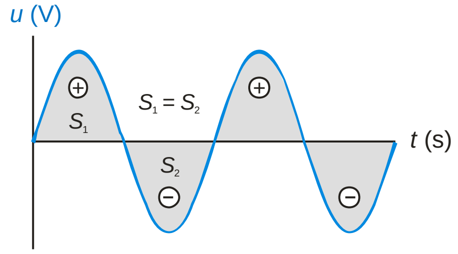
- ⇨ Sliko spreminjanja fizikalne količine v odvisnosti od časa na zaslonu osciloskopa (sl.) imenujemo **oscilogram**.
- ⇨ Grafičnemu prikazu spreminjanja fizikalne količine v odvisnosti od časa (sl. a, b, c, d), pravimo **časovni diagram**.

1.1 IZMENIČNE IN SESTAVLJENE ELEKTRIČNE KOLIČINE

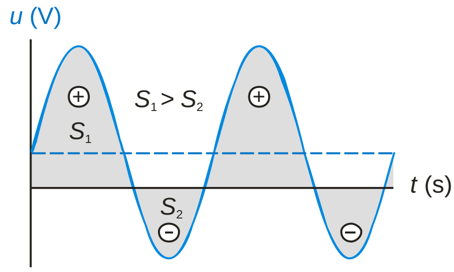
1.1.1 Pojem in oblike časovnih potekov

Periodično spreminjajoče se električne količine z različnimi časovnimi poteki imajo praviloma različne učinke in tudi imenujemo jih različno.

- ⇨ **Periodično** količino, katere zaporedni ploskvi, ki ju oklepa krivulja časovnega poteka količine s časovno osjo, sta **enaki** (slika a), imenujemo **izmenična** količina.
- ⇨ Periodična količina, katere zaporedni ploskvi, ki ju oklepa krivulja časovnega poteka količine s časovno osjo, sta **različni** (slika b), je sestavljena iz enosmernega in izmeničnega dela. Imenujemo jo **sestavljena** količina.



a)



b)

---

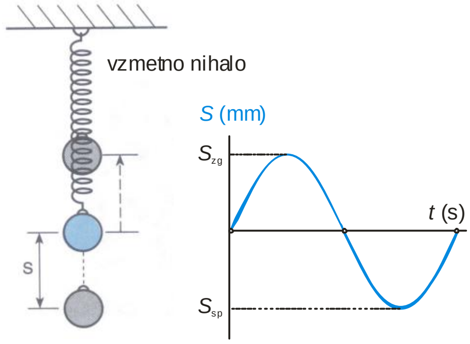
[1] oscilatio, lat. nihanje; osciloskop – naprava za merjenje izmeničnih količin.

1.1.2 Sinusna oblika časovnih potekov

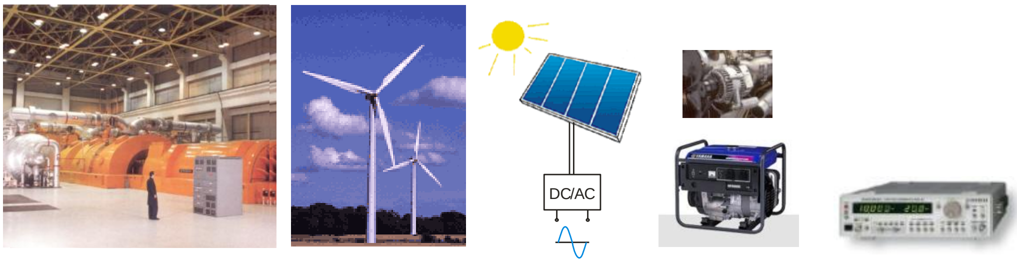
Sinusna[2] oblika izmenične napetosti in toka (sl. a) ima določene ugodne lastnosti, ki jih **nesinusne** oblike nimajo:

- ⇨ Izmenična napetost in tok sinusne oblike **ohranita obliko** ne glede na značilnosti elementov električnega kroga (ohmska upornost *R*, kapacitivnost *C* ali induktivnost *L*).
- ⇨ Delovanje in zgradba električnih naprav s sinusnim izmeničnim tokom so relativno **enostavni**.
- ⇨ Merjenje in računanje s sinusno obliko izmenične napetosti in toka je med vsemi drugimi oblikami **najbolj enostavno**.

Zakaj ravno **sinusna** oblika ima navedene ugodne lastnosti? Del odgovora najdemo v naravnih pojavih, kot je npr. **lastno nihanje** teles (sl. 1.7). Tako nihanje praktično ne potrebuje zunanje energije, časovni potek nihanja pa ima enostaven matematični zapis s funkcijo kota, imenovano **sinus**.



Sinusna izmenična napetost in tok zaradi navedenih lastnosti še posebej domujeta v **elektroenergetiki** (sl. 1.6). Krajše jima rečemo kar **sinusna napetost** in **sinusni tok**, slednjega pa pogosto označimo s kratico »**AC**[3]«.



Generatorji sinusne napetosti

Električne količine s povsem **poljubno obliko** časovnega poteka za elektrotehniko niso posebej zanimive. Z njimi, praviloma, **ne znamo računati**, težje jih je **meriti**, za delovanje naprav pa so praktično **neuporabne**. V nadaljevanju se bomo zato usmerili na obravnavo predvsem **sinusnih** količin, le informativno in primerjalno pa bomo navedli tudi nekatere periodične nesinusne oblike.

1.1.3 Osnovne značilnosti izmeničnih količin

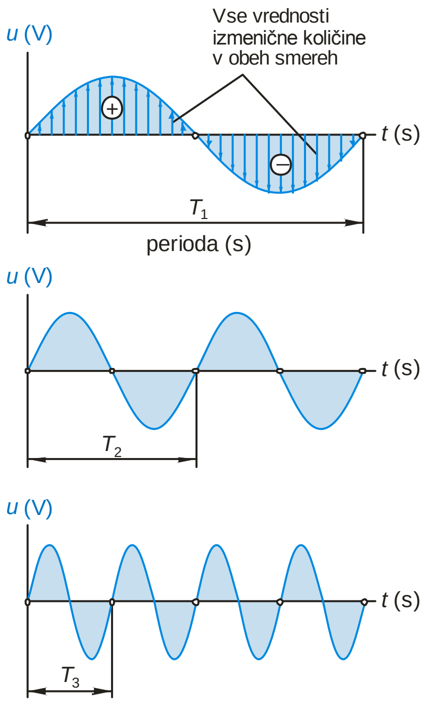
Perioda (*T*) in frekvenca (*f*)

- ⇨ Čas, v katerem se zvrstijo vse vrednosti izmenične količine v obeh smereh, imenujemo **perioda**[4] (***T***).
- ⇨ Osnovna enota za merjenje periode je **sekunda**.

Periode izmeničnih količin so lahko različne. To pomeni, da se v enakem času lahko zvrsti različno število period.

- ⇨ Število period v časovni enoti imenujemo **frekvenca**[5] (***f***).
- ⇨ Frekvenca je **obratno sorazmerna** s periodo.

$\boxed{f = \frac{1}{T}}$ (Hz)   (1/s = s^{-1} = **hertz** = **Hz**)   *T* (s)



$T_2 = T_1/2 \Rightarrow f_2 = 2\,f_1$

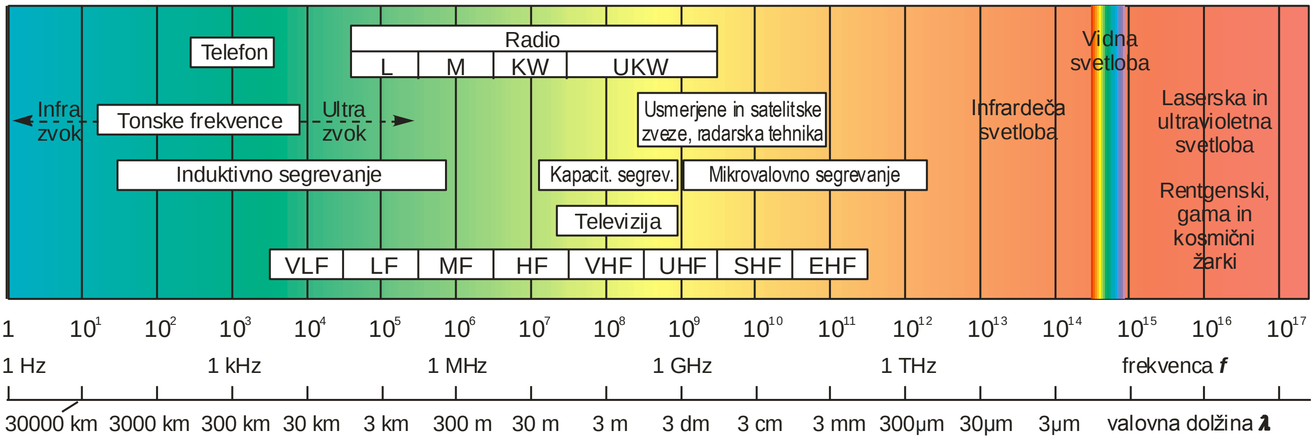
$T_3 = T_1/4 \Rightarrow f_3 = 4\,f_1$

---

[2] Sinus (lat.) = lok, v matematiki kotna funkcija
[3] AC = **Al**ternating **C**urrent (angl.) = izmenični tok
[4] gr. periodos = obhod
[5] lat. frequentia = ponavljanje, pogostost

⇨ snovna enota za merjenje frekvence je s^{-1}. Imenujemo jo **hertz**[6] (Hz).

Frekvence izmeničnih električnih količin so najpogosteje med nekaj desetink Hz in več sto GHz. Frekvenčno področje možnega sinusnega nihanja energije in njenega širjenja v prostor v obliki elektromagnetnih valov pa je še veliko širše. Skupaj s področji uporabe je prikazano v preglednici1. Podrobneje obravnava valovanje fizika.



Primera:

1. Kolikšna je perioda sinusne napetosti pri frekvenci 50 Hz?

$$f=\frac{1}{T} \quad ⇨ \quad T=\frac{1}{f}=\frac{1}{50\ s^{-1}}=0{,}02\ s=\mathbf{20\ ms}$$

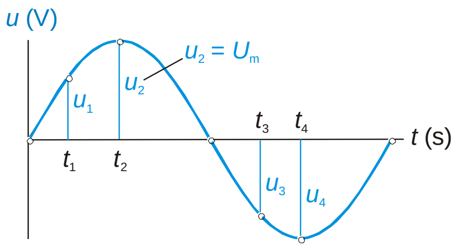
2. Kolikšne so periode izmeničnih količin na območju ultravisokih (UHF) frekvenc? Območje UHF je med 300 MHz in 3GHz GHz (pregl. 1.1).

$$T_{max}=\frac{1}{f_{min}}=\frac{1}{300\cdot 10^{6}\ s^{-1}}=3{,}33\cdot 10^{-9}\ s=\mathbf{3{,}33\ ns}$$

$$T_{min}=\frac{1}{f_{max}}=\frac{1}{3\cdot 10^{9}\ s^{-1}}=0{,}333\cdot 10^{-9}\ s=\mathbf{0{,}333\ ns}$$

Trenutna vrednost sinusne količine (*u, i* ...)

⇨ Vrednost izmenične količine v določenih trenutkih (sl. - t_1, t_2 ...) imenujemo **trenutna vrednost**. Označujemo jo z malimi poševno pisanimi črkami (***u***, ***i*** ...).



V trenutkih t_2 in t_4 (sl. 1.9), je trenutna vrednost izmenične količine **največja.** Ta vrednost je merodajna za največje trenutne vrednosti npr. **električne poljske jakosti** in dimenzioniranje električne izolacije vodnikov, **gostote magnetnega pretoka** in magnetnih sil ...

⇨ Največji trenutni vrednosti izmenične količine pravimo **maksimalna** vrednost. Označujemo jo z veliko poševno črko in indeksom »m« (U_m, I_m, P_m …).

Zapis trenutne vrednosti sinusne količine

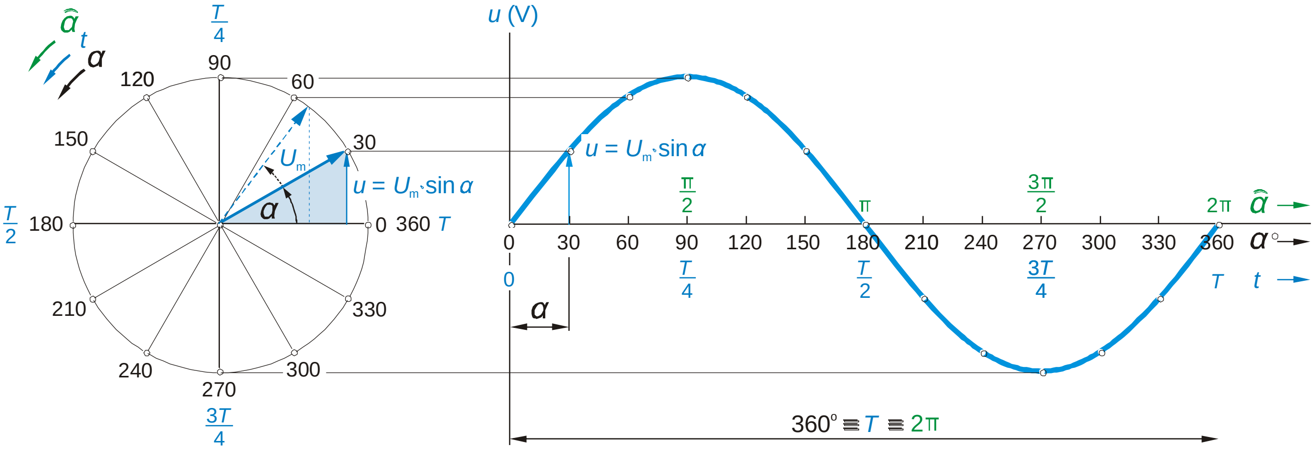
Fizikalne količine so znanstveniki določili tako, da jih lahko **merimo** in **računamo**. Čeprav je sinusna oblika izmeničnih količin tista, s katero to naredimo najenostavneje, pa sl. 1.9 pove, da tako enostavno, kot z enos-

---

[6] Heinrich **Hertz**, nemški fizik

mernimi količinami, gotovo ne gre. Za računanje s sinusno količino najprej potrebujemo njen **matematični zapis**.

Vrednosti za risanje sinusne oblike časovnega poteka npr. napetosti, lahko dobimo kot projekcije **kazalca** »dolžine[7]« $\boldsymbol{U}_\mathrm{m}$ na vertikalno os koordinatnega sistema. Če kazalec $\boldsymbol{U}_\mathrm{m}$ zavrtimo iz položaja po sliki v nasprotni smeri urinega kazalca, bosta kot in kotu pripadajoča nasprotna kateta pravokotnega trikotnika naraščala. Pri kotu $\alpha = 90^\mathrm{o}$ doseže kateta »dolžino« $\boldsymbol{U}_\mathrm{m}$, z nadaljnjim naraščanjem kota se začne njena dolžina zmanjševati …



Trenutno vrednost sinusne količine lahko torej zapišemo in računamo z enačbama:

$\boxed{u = U_\mathrm{m} \cdot \sin\alpha}$ (V) ali tudi $\boxed{i = I_\mathrm{m} \cdot \sin\alpha}$ (A)

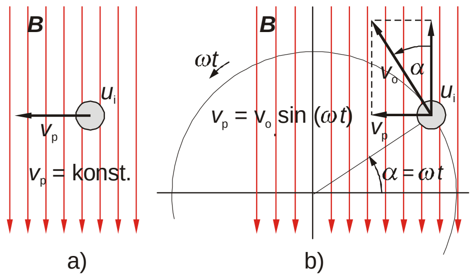
⇨ Trenutna vrednost sinusne količine *u, i, …* je določena s produktom **maksimalne vrednosti** sinusne količine U_m, I_m … in **sinusa** trenutnega kota $\boldsymbol{\alpha}$.

Kot $\boldsymbol{\alpha}$ ($^\mathrm{o}$) ni enostavno merljiv ali kako drugače določljiv. Zato bomo v nadaljevanju navedeni enačbi preuredili v obliko, ki kot α izraža z **merljivima** količinama – **frekvenco** sinusne količine in **časom**.

Kako dobimo sinusno električno napetost?

Najpogostejši načini pridobivanja sinusne napetosti so predvsem:

⇨ z elektromagnetno indukcijo v navitjih **rotacijskih generatorjev** (elektroenergetika) (sl. b).
⇨ s pretakanjem in pretvarjanjem magnetne energije v električno in obratno[8] v **električnih oscilatorjih** (elektronika),
⇨ s **pretvorniki** enosmerne napetosti npr. fotonapetostnih generatorjev (omrežne sončne elektrarne) in s **funkcijskimi generatorji** (elektronika).



a) b)

Pri obravnavi izmeničnih električnih količin se bomo najpogosteje srečavali s **sinusno** obliko. Zato se dogovorimo, da bomo z izrazom »**izmenične**« imeli v mislih **sinusne** količine. Pri vsaki drugačni obliki pa bomo to posebej poudarili.

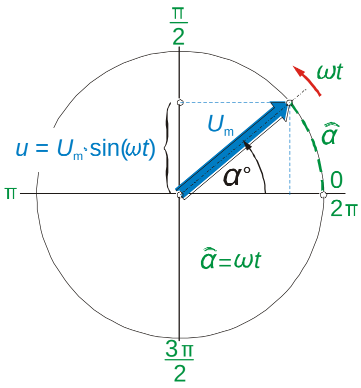
[7] v merilu, npr. 100 V ≡ 1 cm oziroma 100 V/cm
[8] naraven način nastajanja sinusne napetosti

1.2 KAZALČNI DIAGRAM SINUSNE KOLIČINE

Iz slike »risanja« sinusne oblike ob pomoči rotirajočega kazalca ugotavljamo:

- ⇨ Sinusno količino lahko prikažemo z **rotirajočim kazalcem**.
- ⇨ Prikazu sinusne količine z **rotirajočim kazalcem** U_m, I_m, … v **obratni smeri** urinega kazalca, pravimo **kazalčni diagram**.

Kazalčni diagram nas ne seznanja s sinusno količino tako nazorno kot časovni diagram. O njegovih prednostih pa se bomo prepričali, ko bomo v istem diagramu hoteli prikazati več sinusnih količin. Časovni diagram takrat postane nepregleden, njegovo risanje pa zahtevno in zamudno.



- ⇨ Kot kazalca merimo v **radianih**[9].
- ⇨ Čas obhoda kazalca predstavlja **periodo *T*** sinusne količine.

Čim višja je frekvenca sinusne količine, tem krajša je perioda, tem hitreje se vrti kazalec kazalčnega diagrama. Hitrost vrtenja kazalca pa vodi do iskane drugačne oblike enačbe za trenutno vrednost sinusne količine.

- ⇨ Hitrosti vrtenja kazalca kazalčnega diagrama podajamo v elektrotehniki s **kotno hitrostjo (*ω*)**.

$\boxed{\omega = 2\,\pi \cdot f}$ (rad/s ali s^{-1}) f(Hz)

$\boxed{\hat{\alpha} = \omega \cdot t}$ (rad) ω(rad/s); t (s)

- ⇨ Kotna hitrost ima enoto **rad/s**, zato ji pravimo tudi **krožna frekvenca**.

Enačbi sinusne napetosti in toka lahko potem zapišemo v obliki:

$\boxed{u = U_m \cdot \sin(\omega t)}$ (V) $\boxed{i = I_m \cdot \sin(\omega t)}$ (A) $\omega(s^{-1})$; t(s)

Merjenje kotov v radianih nima vpliva na časovni diagram sinusne količine. Pri določanju vrednosti funkcije sinus pa je potrebno **kalkulatorju »povedati«**, da je kot podan v **radianih**. Enačbe, ki smo jih dobili za **krožno frekvenco** in **trenutno vrednost** sinusnih količin so splošno veljavne, ne glede na način ustvarjanja **sinusne** količine.

Primer:

Sinusna napetost s frekvenco 50 Hz ima maksimalno vrednost 34 V. Izračunaj: a) krožno frekvenco ω in b) trenutno vrednost sinusne napetosti po času t = 7 ms (sl. 1.13).

a) $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 100\ s^{-1} = \mathbf{314\ s^{-1}}$

$$\omega = \frac{\text{sprememba kota}}{\text{časovni enoti}} = \frac{\hat{\alpha}}{t} = \frac{2\,\pi}{T} = 2\,\pi \cdot f$$

$$\boxed{\hat{\alpha} = \frac{\alpha^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi\ \text{rad}} \qquad \boxed{\alpha^\circ = \frac{\hat{\alpha}}{2\pi\ \text{rad}} \cdot 360^\circ}$$

Iz iste enačbe dobimo tudi zapis kota: $\hat{\alpha} = \omega \cdot t$

b) $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$= 34\ V \cdot \sin(314\ s^{-1} \cdot 0{,}007\ s)$

$= 34\ V \cdot \sin 2{,}198 = 34\ V \cdot 0{,}8097 = \mathbf{27{,}5\ V}$

---

[9] radius, lat. kotna enota

1.3 EFEKTIVNA VREDNOST SINUSNE KOLIČINE

Delo enosmernega toka računamo po enačbi[10]:

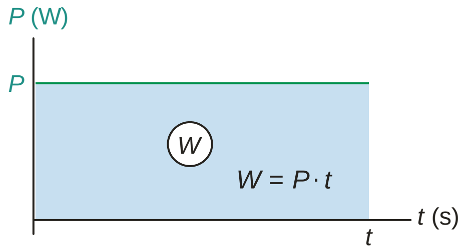
$W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t$

pri čemer sta ***U*** in ***I*** vrednosti enosmernih količin. Katero vrednost pa moramo upoštevati pri računanju dela **izmeničnega** toka? Maksimalno, srednjo, ali katero drugo vrednost?

Za računanje dela **izmeničnega** toka se je pokazalo kot praktično, če ga računamo z ekvivalentnim[11] **enosmernim** tokom, ki ima pri istem porabniku, pri enakih pogojih **enak učinek** (efekt[12]) kot izmenični tok.

⇨ Izmeničnemu toku po učinku ekvivalenten enosmerni tok, imenujemo **efektivni tok** izmeničnega toka.
⇨ Izmenični napetosti po učinku ekvivalentno enosmerno napetost, imenujemo **efektivna napetost** izmenične napetosti.

Bolj točen odgovor na to vprašanje poiščimo z znanjem o enosmernem električnem toku in s sklepanjem (slika).

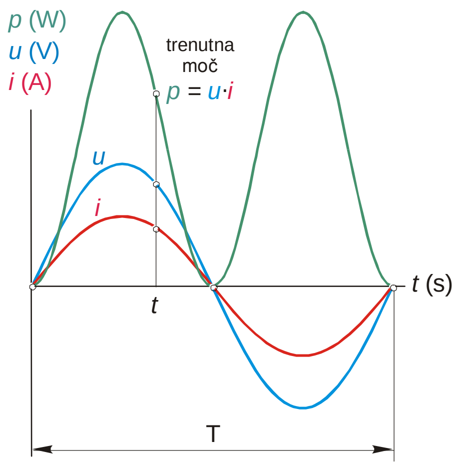


⇨ Delo enosmernega električnega toka je določeno s »površino«, ki jo oklepa krivulja moči s časovno osjo.

Podobno lahko sklepamo za sinusni tok. Če za posamezne trenutne vrednosti sinusnega toka in napetosti v času periode določimo trenutne moči:

$$i^2 \cdot R = p \quad \text{in} \quad (-i)^2 \cdot R = p\,,$$

dobimo časovni diagram moči sinusnega toka za periodo T (slika 1.18), ki ima tudi **sinusno** obliko, **dvojno frekvenco** toka in je v času cele periode **pozitiven**.



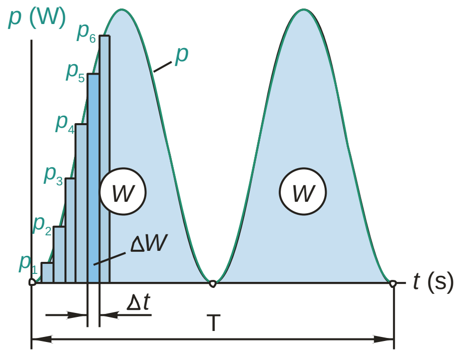
Nekoliko poenostavljeno bi v tem primeru lahko »izračunali« delo tako, da bi sešteli delčke dela Δ***W***, izračunane na osnovi povprečnih trenutnih moči v čim krajših časovnih intervalih Δ***t*** (slika).

Ker je posamezni delček dela Δ***W*** ponazorjen z delčkom površine, ki jo v času Δ***t*** oklene diagram moči s časovno osjo, lahko za celotno delo sklepamo:

⇨ Delo izmeničnega toka je določeno s »površino«, ki jo oklepata krivulja moči izmeničnega toka in časovna os.

Računanje električnega dela na omenjeni način ni praktično. Ker pri računanju dela v bistvu računamo »površino«, si lahko pomagamo tako, kot to prikazujeta sliki, ki sledita in zapišemo:

$$W = \frac{P_m}{2} \cdot T \quad \text{ali za poljuben čas } t: \quad W = \frac{P_m}{2} \cdot t$$



Predpostavimo, da sta **enosmerni** in **izmenični** tok pri **enakem porabniku** v **enakem času** opravila **enako delo**. V tem primeru sta površini pod pripadajočima diagramoma moči enaki:

$$P \cdot t = \frac{P_m}{2} \cdot t, \quad \text{od koder dobimo:}$$

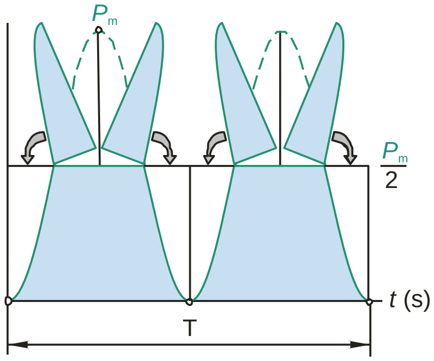
$$\boxed{P = \frac{P_m}{2}} \text{ (W)}$$

---

[10] Učbenik Osnove elektrotehnike 1, str. 76, enačba 423
[11] aequivalentia, lat., iz aequus = enak in valere = veljati, pomeni **enakovrednost**
[12] effectus, lat. **učinek**, posledica

⇨ Moč efektivnega toka je **efektivna** moč izmeničnega toka.
⇨ Efektivna moč sinusnega toka (P) je enaka **polovici** njegove maksimalne moči.

Če upoštevamo, da je $P = I^2 \cdot R$ in $P_m = I_m^2 \cdot R$, dobimo:



$$I^2 \cdot R = \frac{I_m^2 \cdot R}{2} \quad \text{ali} \quad I^2 = \frac{I_m^2}{2} \quad \text{in od tod:}$$

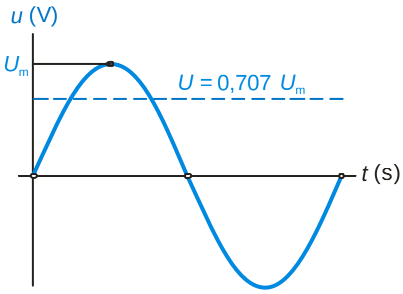
$$\boxed{I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}} \text{ (A)} \quad \text{ali tudi} \quad \boxed{I = 70{,}7\ \%\ I_m} \text{ (A)}$$

⇨ Efektivni tok je √ 2 - krat manjši od maksimalne vrednosti sinusnega toka (slika).

Na osnovi enačbe $P = U^2 \cdot R$ dobimo še **efektivno** vrednost sinusne napetosti[13].

$$\boxed{U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}} \text{ (V)} \quad \text{ali tudi} \quad \boxed{U = 70{,}7\ \%\ U_m} \text{ (V)}$$

Enako velja za vse električne količine, katerih izvor sta sinusna napetost in tok, kot sta npr. električna in magnetna poljska jakost …



⇨ Efektivne vrednosti izmeničnih količin označujemo enako kot **enosmerne** količine.
⇨ Učinke izmeničnih električnih količin računamo z njihovimi **efektivnimi** vrednostmi na osnovi zakonitosti za **enosmerne** količine.

Maksimalne vrednosti izmeničnih električnih količin v praksi praviloma niso znane. Zato je za računanje učinkov na osnovi merjenja teh količin, poskrbljeno z izvedbo merilnikov.

⇨ Merilniki izmeničnih količin kažejo **efektivne** vrednosti.

Poudarjanje »efektivna vrednost«, praviloma, iz praktičnih razlogov, opustimo. Če torej rečemo, zapišemo ali preberemo »izmenična napetost 230 V«, gre za **efektivno** vrednost izmenične napetosti, njena maksimalna vrednost pa je √ **2**-krat večja.

Primera:

1. Pri merjenju izmenične napetosti električnega omrežja pokaže V-meter 230 V. Kolikšni sta efektivna in maksimalna vrednost napetosti v omrežju?

   Odčitana napetost je efektivna napetost: $U = \mathbf{230\ V}$

   Maksimalna napetost: $U_m = U \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = \mathbf{325\ V}$

2. Električni grelnik z upornostjo 10 Ω priključimo na sinusno napetost 230 V. Kolikšen tok skozi porabnik pokaže A-meter, kolikšna je maksimalna vrednost toka in kolikšno električno delo opravi tok v času 8 ur?

   Efektivi tok: $I = \frac{U}{R} = \frac{230}{10} = \mathbf{23\ A}$

   Maksimalni tok: $I_m = I \cdot \sqrt{2} = 23 \cdot \sqrt{2} = \mathbf{32{,}5\ A}$

   Električno delo: $W = U \cdot I \cdot t = 230 \cdot 23 \cdot 8 = \mathbf{42{,}3\ kWh}$

Če bi na podoben način kot za sinusno obliko razmislili tudi za druge oblike izmeničnih količin, bi ugotovili:

---

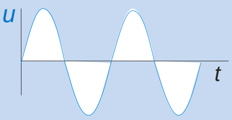
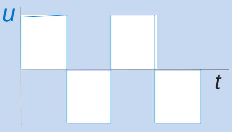
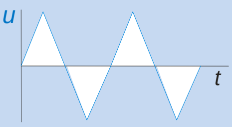
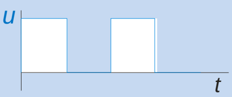
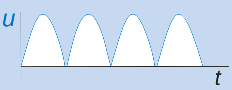
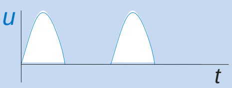
[13] Zaradi **kvadratne** odvisnosti moči sinusnega toka $\boldsymbol{P = I^2 \cdot R}$ ali tudi $\boldsymbol{P = U^2/R}$, pravimo efektivni vrednosti sinusne količine tudi **srednja kvadratna** ali **geometrična srednja vrednost** sinusne količine.

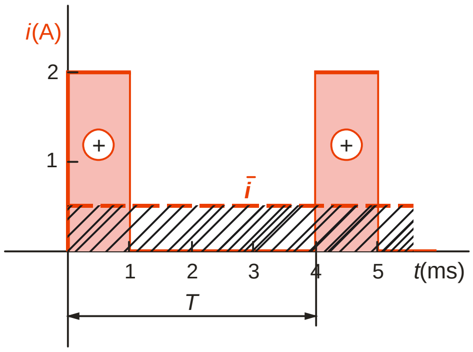
➪ Efektivna vrednost izmenične količine je odvisna tudi od **oblike** njenega časovnega poteka.

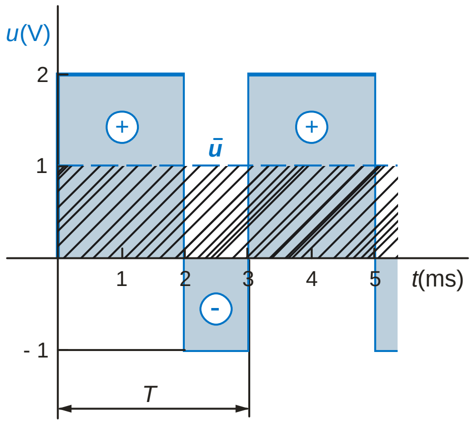
Za primerjavo z efektivno vrednostjo sinusne oblike izmenične količine se informativno seznanimo z efektivnimi vrednostmi nekaterih pogostejših oblik časovnih potekov izmeničnih količin (preglednica).

➪ Srednjo vrednost periodične količine označujemo z malo poševno tiskano, zgoraj nadčrtano črko $\bar{u}$, $\bar{i}$ **...**

Efektivne in srednje vrednosti izmeničnih/sestavljenih količin

Oblika izmenične količine	Efektivna vrednost U	**Srednja vrednost** $\bar{u}$
Sinusna 	$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$	**0**
Pravokotna 	$U = U_{max}$	**0**
Trikotna 	$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}}$	**0**
Pravokotna, impulzna 	$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$	$\frac{U_{max}}{2}$
Sinusna, pulzirajoča 2 	$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$	$\frac{2 \cdot U_{max}}{\pi}$
Sinusna, pulzirajoča 1 	$U = \frac{U_{max}}{2}$	$\frac{U_{max}}{\pi}$





Primer:

Izračunaj srednjo vrednost toka in napetosti, katerih časovna diagrama prikazujeta sliki.

$$\bar{i} = \frac{1\ \text{ms} \cdot 2\ \text{A}}{4\ \text{ms}} = \mathbf{0{,}5\ A}$$

$$\bar{u} = \frac{2\ \text{ms} \cdot 2\ \text{V} - 1\ \text{ms} \cdot 1\ \text{V}}{3\ \text{ms}} = \mathbf{1\ V}$$

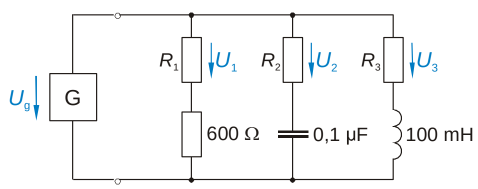
Za **izmenične** količine, kot je npr. sinusna, je razlika površin v periodi enaka **nič** zato velja:

➪ Srednja vrednost poljubne **izmenične** količine je **nič**.

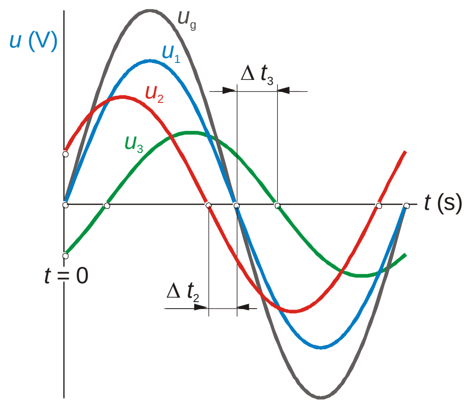
Z medsebojno primerjavo srednjih vrednosti pogostejših izmeničnih in sestavljenih oblik nas informativno seznanja preglednica.

1.5 FAZNI PREMIK (α) IN FAZNI KOT(φ)

Z opazovanjem izmeničnih napetosti v vezavi po sliki bi ugotovili njihove časovne poteke kot jih prikazuje časovni diagram. Podobne primere imamo v električnih krogih električnih naprav in strojev, ki imajo poleg ohmske upornosti tudi kapacitivno in induktivno lastnost.



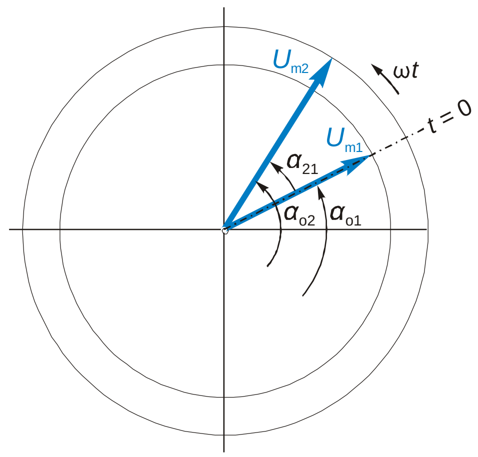
Medsebojni **premiki** časovnih potekov izmeničnih količin **enakih frekvenc** so pogosto osnova **delovanja** električne naprave ali stroja in so **ustvarjeni** namenoma. Pogosto pa so posledica **neželene** kapacitivne in induktivne lastnosti izmeničnih krogov in so za delovanje električnih strojev in naprav **škodljivi**.



- ⇨ Izmenični količini **enakih frekvenc**, ki imata v vsakem trenutku **enako smer** (sl.), sta v **fazi**[14].
- ⇨ Če izmenični količini spremenita smer z določeno **časovno** razliko **Δ *t*** (sl.), pravimo, da je med njima **fazni premik**.
- ⇨ Če izmenična količina spremeni smer **prej** kot druga pravimo, da **prehiteva** drugo količino in obratno (sl.).

Zahtevno risanje **časovnih** diagramov je tem bolj zamudno, čim več količin želimo prikazati. Kot vemo, za prakso zadostuje, če **sinusne** količine **enakih frekvenc** predstavimo v **kazalčnem** diagramu.

V praksi fazne premike izmeničnih količin pogosto obravnavamo tudi s **koti**. Oglejmo **splošni primer** v trenutku t = 0 »posnetih« kazalcev npr. dveh izmeničnih napetosti s faznim premikom (sl.). Kazalca smo ujeli med rotacijo kar pomeni, da sta do trenutka posnetka (t = 0), že ustvarila kota $\boldsymbol{\alpha_{02}}$ in $\boldsymbol{\alpha_{01}}$. Glede na začetek našega opazovanja (t = 0), jima pravimo **začetna kota**. Pri tem ni pomembno kolikšna sta, ampak le njuna **razlika**.

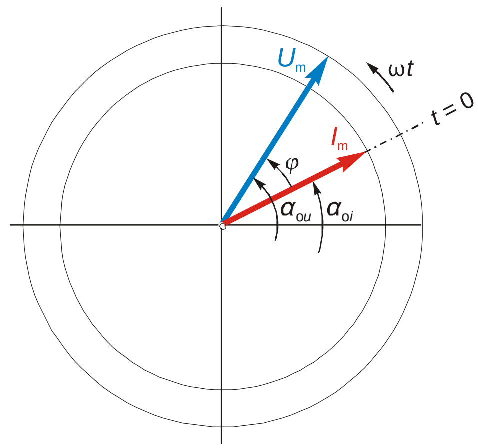


- ⇨ Trenutni vrednosti izmeničnih količin, katerih kazalca imata **enaka** začetna kota, imata v vsakem trenutku **enako smer**, zato pravimo, da sta v **fazi**.
- ⇨ Izmenična količina z **večjim** začetnim kotom (sl.), **prej spremeni smer**, zato pravimo, da **prehiteva** drugo izmenično količino in obratno.

V splošnem primeru izmenična količina z **večjim** začetnim kotom **prehiteva** izmenično količino z **manjšim** začetnim kotom za **razliko** začetnih kotov $\boldsymbol{\alpha}$.

$$\alpha_{21} = \alpha_{02} - \alpha_{01}$$

- ⇨ **Razliko začetnih kotov** izmeničnih količin enakih frekvenc imenujemo **fazni premik** omenjenih količin.



Na področju elektroenergetike se najpogosteje srečujemo s faznim premikom med **tokom** in **napetostjo** (sl.). Spoznali bomo, da sta od njega močno odvisna **delo** in **moč** izmeničnega toka, pa tudi **izgube** električne energije v električnih napravah in omrežjih. Zato mu dajemo **poseben pomen**.

- ⇨ Fazni premik med **tokom** in **napetostjo** imenujemo **fazni kot**.
- ⇨ Fazni kot označujemo s črko $\boldsymbol{\varphi}$, merimo pa v kotnih **stopinjah**.

Enačbi tako predstavljenih sinusnih napetosti in toka se glasita:

---

[14] phasis, gr. pojav, stanje, določeno s frekvenco in začetnim položajem

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha_{0u}) \quad \text{in} \quad i = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha_{0i}).$$

➩ **Fazni kot** je določen z **razliko** začetnih kotov **napetosti** in **toka**.
$\boxed{\varphi = \alpha_{0u} - \alpha_{0i}}$ (°)

➩ Po dogovoru označujemo fazni kot z ločno puščico v smeri od kazalca **toka** proti kazalcu **napetosti** (sl.).
➩ Če **tok zaostaja** za **napetostjo** je, po dogovoru, fazni kot **pozitiven**, sicer pa je **negativen**.

Iz slik lahko še sklepamo:

➩ Kazalci količin z enako frekvenco se v kazalčnem diagramu vrtijo v isti smeri z **enako** krožno frekvenco ***ω***.
➩ Fazni premiki med kazalci se med vrtenjem kazalcev **ohranjajo**.
➩ Kazalca količin, ki sta v **fazi**, se **prekrivata**.

Kljub svoji preprostosti, omogočajo kazalčni diagrami pregledno obravnavo tudi **zahtevnejših** sestavljenih izmeničnih krogov. Zato bo kazalčni diagram naše osnovno »**orodje**« za obdelavo izmeničnih krogov. Če nas moti vrtenje kazalcev, jih lahko brez škode »ustavimo« tako, da se »usedemo« npr. na kazalec toka in se z njimi »zapeljemo« okrog koordinatnega izhodišča. Bistva diagrama s tem nismo prizadeli, izničili pa smo relativno hitrost kazalcev glede na opazovalca in omogočili delo z »**mirujočimi«** kazalci.

➩ Pri **znanih faznih premikih** lahko praviloma »pozabimo« tudi na začetne kote, njihovega pomena pa ne smemo pozabiti pri zahtevnejših primerih določanja faznega kota.

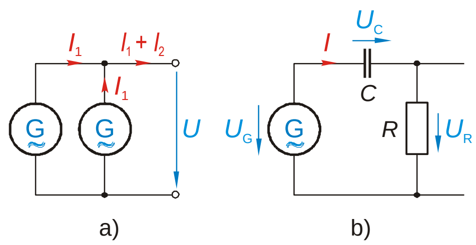
Zapis trenutnih vrednosti izmeničnega toka in napetosti se po tem poenostavi v:

$$\boldsymbol{i = I_m \cdot \sin(\omega t)} \quad \text{in} \quad \boldsymbol{u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)}$$

1.6 SEŠTEVANJE IZMENIČNIH KOLIČIN

Podobno kot v enosmernih, imamo tudi v izmeničnih krogih opraviti s **sestavljenimi** električnimi krogi in v njih z **napetostnimi zankami** in **tokovnimi vozlišči** (slika).

Osnovni zakoni elektrotehnike, ki smo jih spoznali pri obravnavi enosmernih električnih količin, veljajo tudi za **trenutne** in **efektivne** vrednosti **sinusnih** količin. Zato velja:



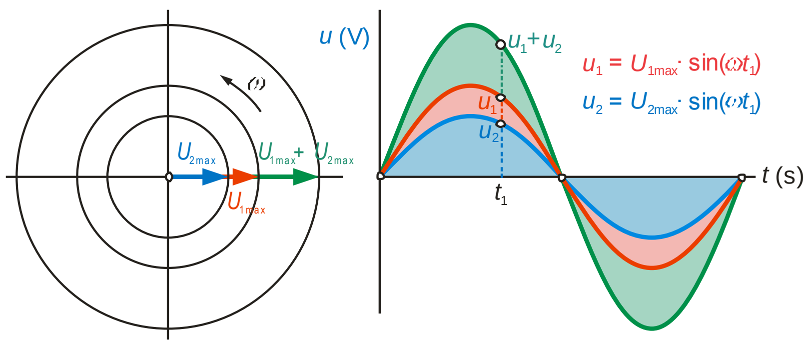
➩ Zakon napetostne zanke in tokovnega vozlišča veljata tudi za **trenutne** in **efektivne** vrednosti izmeničnih količin.

Za vezave na sliki lahko zato zapišemo za trenutne vrednosti:

$i_1 + i_2 = i \quad \text{in} \quad u = u_C + u_R$ ali tudi

$I_1 + I_2 = I \quad in \quad U = U_C + U_R$

V energetiki in elektroniki se bomo srečavali s seštevanjem in odštevanjem izmeničnih količin predvsem enakih, v določenih primerih pa tudi različnih frekvenc in faz. Oglejmo si nekaj primerov:



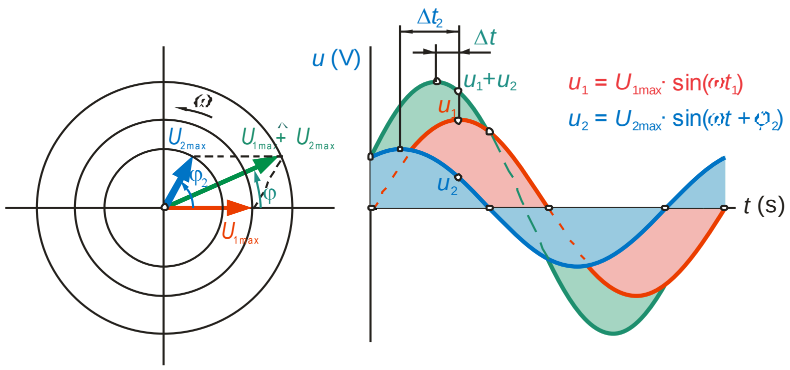
t

Seštevanje sinusnih količin enakih frekvenc, ki sta v fazi

Iz dobljene slike ugotavljamo:

- ➪ Trenutna vrednost **vsote** izmeničnih količin je enaka **vsoti** trenutnih vrednosti izmeničnih količin.
- ➪ **Vsota** sinusnih količin, ki sta v **fazi**, ima **sinusno** obliko in je v **fazi** z količinama, ki ju seštevamo.
- ➪ V kazalčnem diagramu je kazalec **vsote** količin, ki sta v **fazi**, enak **aritmetični** vsoti kazalcev količin, ki ju seštevamo.

Podobno lahko sklepamo na osnovi naslednje slike:

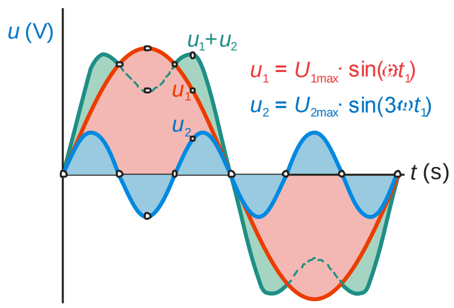


t

Seštevanje sinusnih količin enakih frekvenc, ki **nista** v fazi

- ➪ Časovni potek vsote sinusnih količin **enakih frekvenc**, ki **nista v fazi**, ima tudi **sinusno** obliko, **ni** pa v **fazi** z nobeno od količin, ki ju seštevamo.
- ➪ V kazalčnem diagramu je kazalec vsote količin enak **geometrični** vsoti kazalcev količin, ki ju seštevamo.

Če bi seštevanje po sliki nadaljevali na način:



Sinusne količine različnih frekvenc

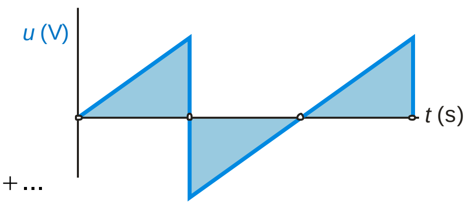
$$u = U_{max} \cdot \sin(\omega t) + \frac{U_{max}}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{U_{max}}{5} \cdot \sin(5\omega t) + \frac{U_{max}}{7} \cdot \sin(7\omega t) + ...$$

bi oblika časovnega poteka vsote dobivala vedno bolj **pravokotno** obliko, z neskončnim zaporedjem pa bi dobili popolno **pravokotno obliko**.

Prepričali bi se lahko, da z nekoliko drugačnim razmerjem maksimalnih vrednosti in frekvenc sinusnih količin lahko »ustvarimo« poljubno obliko periodične, **nesinusne izmenične** količine. Zato lahko sklepamo:

- ➪ Poljubna periodična količina **nesinusne** oblike je sestavljena iz samih **sinusnih** količin s točno določenim zaporedjem frekvenc in maksimalnih vrednosti.

Poljubno **periodično** funkcijo **nesinusne** oblike lahko matematično zapišemo s **vsoto sinusnih** komponent v obliki tako imenovane **Fourierjeve**[15] vrste. Informativno napišimo le primer za žagasto obliko napetosti (sl.).



$$u = U_{max} \cdot \sin(\omega t) - \frac{U_{max}}{2} \cdot \sin(2\omega t) + \frac{U_{max}}{3} \cdot \sin(3\omega t) - \frac{U_{max}}{4} \cdot \sin(4\omega t) + ...$$

Spoznanje je za prakso pomembno. Npr. pri prenosu signala **pravokotne** oblike na daljavo, prenosna pot »zaduši« njegove sinusne komponente visokih frekvenc, zato na koncu dobimo **popačeno** obliko signala.

- ➪ Časovni potek **vsote** sinusnih količin **različnih** frekvenc je **periodična** izmenična količina **nesinusne** oblike.

---

[15] Fourier, Jean Babtiste, francoski matematik in fizik, 1768 – 1830

⇨ Za ta primer **ne** moremo narisati **kazalčni** diagram, saj v njem lahko prikažemo le sinusne količine **enakih** frekvenc.