

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

**TIRIAMASIS DARBAS**

**STIPRIAI ĮSOTINTŲ MAGNETINIŲ GRANDINIŲ**  
**MAGNETINIŲ SRAUTŲ TYRIMAS**

Magistrantas EM – 4 gr. stud.

Donatas Janužis

Darbo vadovas:

Teodoras Šimkevičius

Šiauliai, 2006

# Turinys

<b>1. Įvadas.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Teorinė dalis.....</b>	<b>6</b>
2.1 Kintamosios srovės netiesinės grandinės.....	6
2.2 Netiesiniai elementai.....	7
2.3 Ritė su feromagnetine šerdimi ir jos lygtis.....	12
2.4 Ritės su feromagnetine šerdimi tyrimas.....	14
<b>3. Eksperimentinė dalis.....</b>	<b>19</b>
2.1 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius maitinamas iš 380V tinklo.....	19
2.2 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius maitinamas pastovaus dydžio efektine įtampa.....	43
2.3 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius maitinamas $+5\% \cdot U_v$ .....	74
<b>4. Išvados.....</b>	<b>96</b>
<b>5. Literatūra.....</b>	<b>97</b>

## 1. Įvadas

Šiame darbe tyrinėjama kaip kinta magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros kreivės ir jų harmonikos magnetinėje grandinėje, kurią veikia sinusinės įtampos šaltinis. Nagrinėsime tik nusistovėjusiu režimu. Magnetinio srauto kreivė artima sinusinei, kai šerdis yra neįsotinta, šerdžiai įsisotinus magnetinis srautas tampa nesinusinis.

Tirsime kaip kinta magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros kreivės ir jų harmonikos, magnetinėje grandinėje, kai į pirminę apviją įvedama aktyvi varža, tai nesinusinė srovė sukelia varžoje, todėl magnetinio srauto ir elektrovaros kreivės negali būti sinusinės. Šerdimi sklindantis magnetinis srautas turi aukštesniųjų harmonikų.

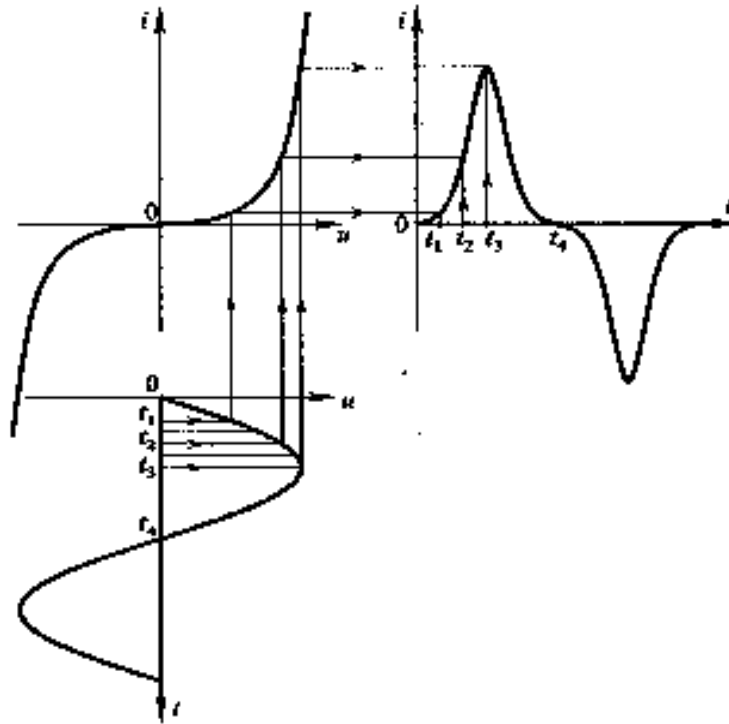
Literatūroje nagrinėdami magnetines grandines dirbtinai ignoruoja aukštesniąsias harmonikas ir srovės ir magnetinius srautus laiko sinusinėmis funkcijomis.

Šio darbo tikslas yra ištirti aktyvios varžos poveikį į magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros kreives, bei jų harmonikas.

## 2. Teorinė dalis

### 2.1 Kintamosios srovės netiesinės grandinės

Dauguma elektros įrenginių maitinami iš sinusinių EV ar srovės šaltinių. Jei grandinėse, maitinamose iš tokių šaltinių yra netiesinių aktyvių varžų, induktyvumų ar talpų, tai šių grandinių srovės ir įtampos bus periodinės, bet nesinusinės.



1 pav. Grandinės su netiesine varža, kai prijungta įtampa sinusinė, grafinė analizė.

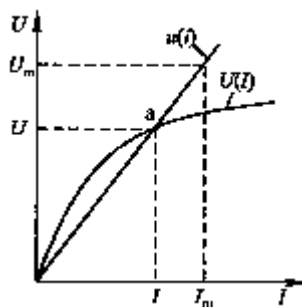
Tarkime, kad prie netiesinės varžos, kurios voltamperinė įtampa  $i(u)$  pavaizduota 1 pav., prijungta sinusinė įtampa  $u(t)$ . Grafiškai sudarysime šios grandinės srovės priklausomybę nuo laiko. Pasirinkę keletą laiko momentų iš kreivės  $u(t)$  randame juos atitinkančias įtampas, o iš voltamperinės charakteristikos  $i(u)$  – sroves. Iš 1 pav., pavaizduoto srovės grafiko  $I(t)$  matome, kad srovė grandinėje yra periodinė nesinusinė laiko funkcija. Analogiškai, jei netiesine varža teka sinusinė srovė, šio elemento įtampa bus nesinusinė laiko funkcija.

Esant tam tikromis sąlygomis kintamosios srovės netiesinėse grandinėse gali atsirasti nestabilus būvis. Tais atvejais reikėtų nagrinėti tokių grandinių stabilumą.

## 2.2 Netiesiniai elementai

Elementai, kurių varža priklauso nuo jais tekančios srovės ar įtampos, kintamosios srovės grandinėje yra tie patys, kaip ir nuolatinės srovės grandinėse. Tai kaitinamosios lempos, termistoriai, elektrinis lankas, diodai, puslaidininkiai elementai. Kintamosios srovės grandinėse, kur įtampos ir srovės kinta bėgant laikui, reikia naudoti dinamines voltamperines charakteristikas. Prie žemų dažnių kai kurių netiesinių elementų statinės charakteristikos artimos dinaminėms. Tai priklauso nuo elemente vykstančių fizikinių procesų. Netiesiniai elementai, kurių statinės ir dinaminės charakteristikos nesutampa, vadinami inerciniais. Šių elementų netiesiškumą dažniausiai lemia šiluminiai ir mechaniniai procesai. Pavyzdžiui, kaitinamosios lempos pasižymi nemaža šilumine inercija. Keičiantis srovės efektiniai vertei, keičiasi siūlelio temperatūra, tuo pačiu ir siūlelio varža. Todėl jos voltamperinė charakteristika efektinėmis reikšmėmis  $U(I)$  yra netiesinė. Ji parodyta 2 paveiksle. Tačiau, esant pramoninio dažnio ( $f = 50\text{Hz}$ ) įtampai, kaitinamosios lempos siūlelio temperatūra per periodą praktiškai nekinta. Šiuo laikotarpiu pastovi ir lempos varža. Todėl kaitinamoji lempa, kai srovės efektinė reikšmė nekinta, akimirkinių reikšmių atžvilgiu yra tiesinis elementas ir jos dinaminė voltamperinė charakteristika  $u(i)$  yra tiesė (2 pav). Šiuo atveju įtampos amplitudė  $U_m$ , o srovės –  $I_m$ , tai jos dinaminė varža

$$R_D = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}. \quad (1)$$



2 pav.

*Netiesinės varžos didelė šilumine inercija voltamperinės charakteristikos efektinėmis  $U(I)$  ir momentinėmis  $u(i)$  reikšmėmis.*

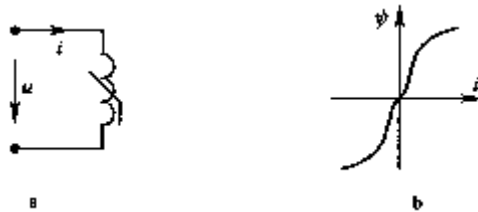
Kintamosios srovės ir įtampos efektinės reikšmės  $I$  ir  $U$  atitinka charakteristikų susikirtimo tašką a. Tokių elementų dinaminė varža randama iš statinės charakteristikos, jei žinomos efektinės vertės.

Elementai, kurių charakteristikos efektinėmis reikšmėmis netiesinės, o akimirkinėmis reikšmėmis tiesinės vadinami sąlygiškai netiesiniai.

Riba skirianti sąlygiškai netiesinius elementus nuo netiesinių yra sutartinė.

Praktikoje gausu ir neinerccinių netiesinių elementų. Tai elektroninės lempos, puslaidininkiniai elementai. Jų inercija labai maža. Tokie elementai yra netiesiniai tiek efektinėmis, tiek akimirkinėmis reikšmėmis. Periodinių procesų atžvilgiu elementų ir srovių kreivės skirtingų formų.

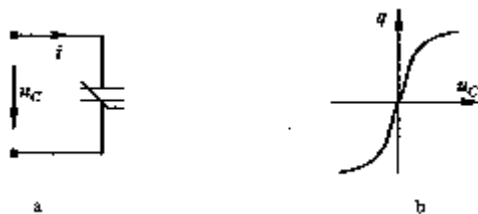
Tiesinio induktyvumo  $L$  surištas srautas yra tiesiog proporcingas srovei  $i$  ( $\Psi = Li$ ). Šiuo atveju induktyvumo magnetinis srautas sklinda tiesine aplinka, kurios magnetinė skvarba yra pastovi, nuo lauko stiprio nepriklauso. Jei induktyvumo (ritės) surištas magnetinis srautas sklinda netiesine aplinka, pavyzdžiui, feromagnetiku, tai šis induktyvumas yra netiesinis. Šiuo atveju aplinkos (feromagnetiko) magnetinė skvarba nėra tiesinė lauko stiprio (magnetinio srauto tankio) funkcija. Netiesinis induktyvumas pavaizduotas 3 pav., a, apibūdinamas netiesine vėberamperine charakteristika  $\Psi(i)$  (3 pav., b).



3 pav. Netiesinis induktyvumas (a) ir jo vėberamperinė charakteristika (b).

Realiai ritei su feromagnetine šerdimi būdingas histerezės reiškinys. Jos vėberamperinė charakteristika turi histerezės kilpą. Šiuo atveju ritėje atsiranda nuostoliai, proporcingi histerezės kilpos plotui. Tokios ritės negalima laikyti idealiu netiesiniu induktyvumu, nes ji vartoja energiją. Dažnai šie nuostoliai būna maži ir juos galima paneigti. Tada ritę galima laikyti netiesiniu induktyvumu su vienareikšme vėberamperine charakteristika (3 pav., b).

Talpa  $C$  yra tiesinė, jei jos krūvis  $q$  yra tiesiai proporcingas įtampai  $U_C$  ( $q = Cu_C$ ). Šio elemento dielektriko elektrinė skvarba yra pastovus dydis, nepriklauso nuo įtampos. Jei elektrinis srautas sklinda netiesine aplinka, pavyzdžiui, segnetoelektriku, tai talpa yra netiesinė. Tokiuose elementuose elektrinio srauto tankio priklausomybė nuo lauko stiprio yra netiesinė. Netiesinė talpa apibūdinama netiesine kulonvoltine charakteristika  $q(u_C)$  (4 pav.).



4 pav. Netiesinė talpa (a) ir jos kulonvoltage charakteristika (b).

Netiesinės kintamosios srovės grandinės aprašomos netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis, kurios sudaromos naudojant Kirchhoffo dėsnius. Bendroju atveju, gautos netiesinės diferencialinės lygties sprendinys yra periodinė nesinusinė laiko funkcija. Periodinę funkciją (įtampą ar srovę) galime išskleisti Fourier eilute su be galo daug narių. Praktiniuose skaičiavimuose tenka apriboti šios eilutės narių (harmonikų) skaičių. Tuomet sprendinį randame apytiksliai. Skaičiavimo tikslumą galime įvertinti išsprendę lygčių sistemą bent du kartus su skirtingu Fourier eilutės narių skaičiumi. Jei šių sprendinių skirtumas mažas ir tenkina sprendinio tikslumo reikalavimus, skaičiavimą baigiame. Jei ne – skaičiuodami turime įvertinti daugiau Fourier eilutės narių.

Sprendžiant netiesines diferencialines lygtis, įvedami ir kiti supaprastinimai bei apribojimai. Visuomet racionalu siekti, kad įvedus šiuos supaprastinimus, nagrinėjama grandinė būtų apibūdinama ne diferencialinėmis lygtimis.

Kintamosios srovės netiesinės grandinės gali būti skaičiuojamos efektinių arba akimirkinių reiškinių skaičiavimo metodais. Kai reikalinga rasti sprendinio efektines reikšmes (prietaisų rodmenis, galią ir kt.) naudojami efektinių reikšmių skaičiavimo metodai. Tai grafiniai, analiziniai, ekvivalentinių sinusoidžių, linearizacijos efektinėmis reikšmėmis, iteracijų ir kitų metodai.

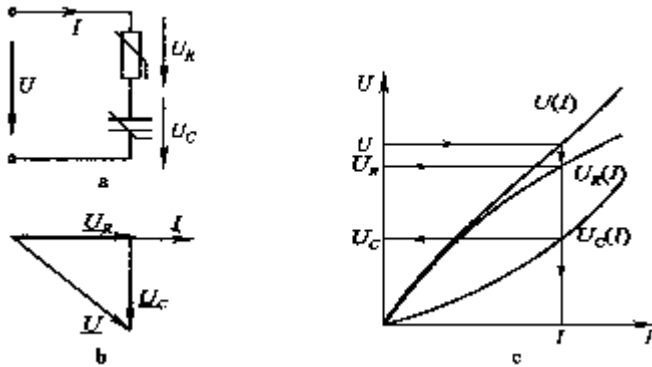
Ieškant sprendinio priklausomybės nuo laiko, naudojami akimirkinių reikšmių skaičiavimo metodai. Praktikoje dažniausiai sutinkami grafiniai, analiziniai, linearizacijos, harmoninio balanso ir kiti metodai.

Sąlygiškai netiesiniai elementai gali būti ne tik varžos, bet ir induktyvumai bei talpos turinčios judančių dalių. Tokių elementų voltamperinės charakteristikos efektinėmis reikšmėmis yra netiesinės, o akimirkinėmis – tiesinės. Iš to išeina, kad grandinėse su sąlygiškai netiesiniais elementais srovės ir įtampos yra sinusinės laiko funkcijos, nors pereinant nuo vieno efektinių reikšmių charakteristikos taško prie kito, srovės ir įtampos pakinta netiesiškai. Skaičiuojant grandines su sąlygiškai netiesiniais elementais, sinusiniai dydžiai keičiami fazoriais (kompleksiniais skaičiais). Tokioms grandinėms galioja Ohmo, Kirchhoffo dėsniai. Čia, kaip ir tiesinėse grandinėse, įtampos ir srovės sumuojamos vektoriškai.

Išnagrinėkime 5a pav., pavaizduotą grandinę. Raskime elementų įtampas ir srovę, jei šaltinio įtampos efektinė reikšmė  $U$ . Elementų charakteristikos  $U_R(I)$  ir  $U_C(I)$  efektinėmis reikšmėmis parodytos 5b pav. Abu netiesiniai elementai sujungti nuosekliai. Šakos įtampa

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C. \quad (2)$$

Šią lygtį atitinka fazių diagrama pavaizduota 5b pav. Iš šios diagramos randame šakos įtampos efektinę reikšmę:



5 pav. Netiesinė grandinė iš sąlygiškai netiesinių elementų(a), jos vektorių diagrama (b) ir voltamperinės charakteristikos (c).

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (3)$$

Sudarykime grandinės šakos atstojamąją voltamperinę charakteristiką  $U(I)$ . Ją randame analogiškai, kaip ir nuolatinės srovės atveju. Pradžioje pasirenkame keletą srovės  $I$  efektnių verčių, o iš charakteristikų  $U_R(I)$  ir  $U_C(I)$  randame elementų įtampas  $U_R$  ir  $U_C$ . Toliau sumuodami įtampas pagal (3) lygtį gauname šaltinio įtampų seką. Žinodami šaltinio įtampą  $U$  iš 5c pav., charakteristikų randame šakos srovę  $I$  ir elementų įtampas  $U_R$  bei  $U_C$ .

Panagrinėkime srovės kreivės formą grandinėje su netiesiniu induktyvumu, kurio vėberamperinė charakteristika pavaizduota 6 paveiksle, kai šaltinio įtampa sinusinė:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi / 2).$$

Surištojo magnetinio srauto kitimo dėsnį gausime suintegravę įtampą laiko atžvilgiu

$$\Psi = \int U_m \sin(\omega t + \pi / 2) dt = \frac{U_m}{\omega} \sin \omega t = \Psi_m \sin \omega t. \quad (4)$$

Gautojoje srauto išraiškoje integravimo pastovioji lygi nuliui, nes pradinės sąlygos nulinės ( $\Psi(0) = 0$ ).



Iš gautųjų išraiškų matome, kad jei netiesinio induktyvumo įtampa kinta sinuso dėsnio, tai surištas magnetinis srautas taip pat sinusinis.

6 paveiksle grafiniu metodu gautos srovės kreivės formos prie dviejų skirtingų surištojo srauto amplitudžių  $\Psi_{1m}$  ir  $\Psi_{2m}$ .

Iš 6 pav., pastebime, kad srovės kreivės forma artima sinusinei, kai surištojo srauto amplitudė nedidelė. Šiuo atveju šerdis neįšotinta. Esant didelei srauto amplitudei šerdis įšotinta ir srovės kreivės forma tampa nesinusinė.

Netiesinio induktyvumo vėberamperinę charakteristiką aproksimuosime išraiška:

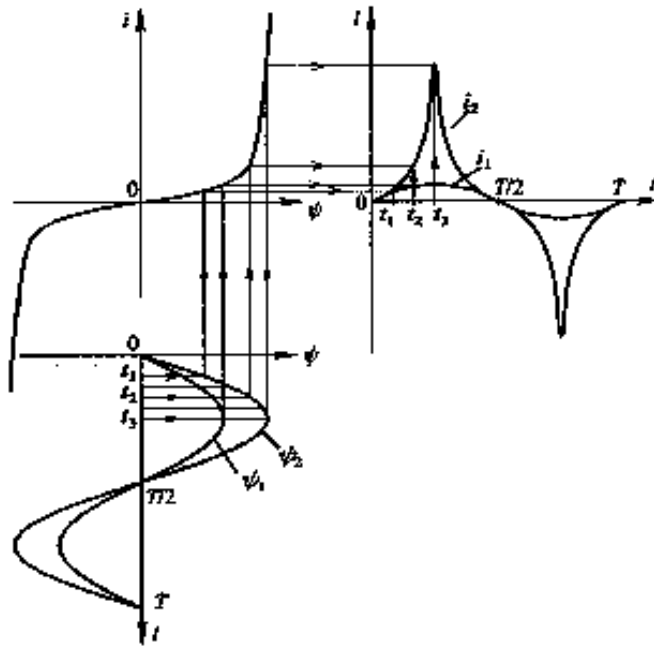
$$i = a_1 \Psi + b_1 \Psi^3. \quad (5)$$

Kai srautas sinusinis (4), tai srovė:

$$i = a_1 \Psi_m \sin \omega t + b_1 \Psi_m^3 \sin^3 \omega t. \quad (6)$$

Įvertinę, kad  $\sin^3 \omega t = \frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \sin 3\omega t$  gausime:

$$i = \left( a_1 \Psi_m + \frac{3}{4} b_1 \Psi_m^3 \right) \sin \omega t - \frac{1}{4} b_1 \Psi_m^3 \sin 3\omega t = I_{m(1)} \sin \omega t - I_{m(3)} \sin 3\omega t. \quad (7)$$



6 pav. Netiesinio induktyvumo srovės kreivės forma, kai surištas magnetinis srautas (įtampa) sinusinė.

Iš gautos išraiškos matome, kad srovė nesinusinė: be pirmosios harmonikos yra ir trečioji. Tiksliau aproksimavus vėberamperinę charakteristiką srovės kreivėje atsirastų ir kitų nelyginių harmonikų. Tais atvejais, kai aukštesniųjų harmonikų amplitudės daug mažesnės už pirmosios, jas galime paneigti ir srovės kreivę laikyti sinusine.

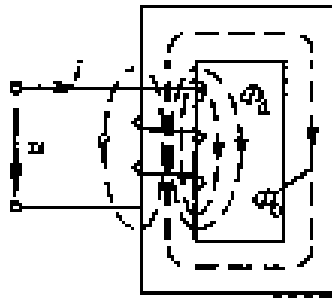
### 2.3 Ritė su feromagnetine šerdimi ir jos lygtis

Dabar panagrinėsime ritę **su feromagnetine šerdimi**. Ritė (7 pav.) tekanti srovė  $I$  sukuria kintamąjį magnetinį srautą  $\phi$ . Dalis šio srauto  $\phi_0$  užsidaro šerdyje, likusioji dalis  $\phi_d$ , vadinama sklaidos magnetiniu srautu, užsidaro per aplinką (orą). Visas ritės srautas

$$\phi = \phi_d + \phi_0. \quad (8)$$

Ritės turinčios  $N$  vijų surištas magnetinis srautas

$$\Psi = N\phi = N\phi_d + N\phi_0 = \Psi_d + \Psi_0. \quad (9)$$



7 pav. Ritė su feromagnetine šerdimi.

Surištojo sklaidos magnetinio srauto priklausomybė nuo srovės tiesinė, nes jis sklinda tiesine aplinka (oru):

$$\Psi_d = L_d i; \quad (10)$$

čia  $L_d$  – ritės sklaidos induktyvumas.

Šerdyje užsidarantis magnetinis srautas  $\phi_0$  ritės apvijoje indukuoja elektrovarą  $e_0$ :

$$e_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt}. \quad (11)$$

Ši EV priešinasi apvija tekančios srovės kitimui. Tai patogu įvertinti įtampa  $u_0$ :

$$u_0 = -e_0 = \frac{d\Psi_0}{dt}. \quad (12)$$

Ritei su feromagnetine šerdimi užrašome Kirchhoffo dėsnio įtampos lygtį:

$$iR_{Cu} + \frac{d\Psi}{dt} = u; \quad (13)$$

čia  $R_{Cu}$  – apvijos laidininko varža, ji dar vadinama vario varža, nes apvijos laidininkas dažniausiai būna iš vario.

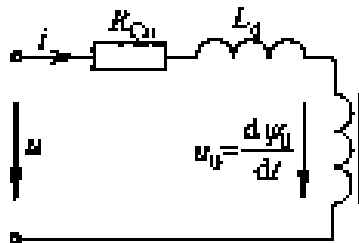
Įrašę (9, 10, 12) išraiškas į (13) gauname ritės su feromagnetine šerdimi lygtį:

$$iR_{Cu} + L_d \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi_0}{dt} = u, \quad (14)$$

arba

$$iR_{Cu} + L_d \frac{di}{dt} + u_0 = u. \quad (15)$$

Pirmieji du lygčių (14) arba (15) nariai yra tiesiniai ir apibūdina apvijos parametrus. Trečiasis narys įvertina šerdyje cirkuliuojančio srauto sukurtą elektrovarą (įtampą). Šiuo atveju ryšys tarp srauto  $\Phi_0$  ir srovės  $I$  netiesinis. Naudodamiesi (14) arba (15) lygtimi galime nubraižyti ritės su plieno šerdimi atstojamąją schemą. Ji pavaizduota 8 pav.

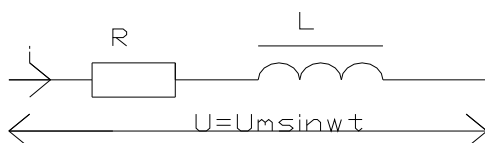


8 pa. Ritės su feromagnetine šerdimi atstojamoji schema, atskirianti apvijos parametrus  $R_{Cu}$  ir  $L_d$ .

Bendroju atveju, kai ritės įtampa sinusinė, jos srovės kreivė yra nesinusinė, nes be pirmosios būna ir kitos, aukštesniosios harmonikos.

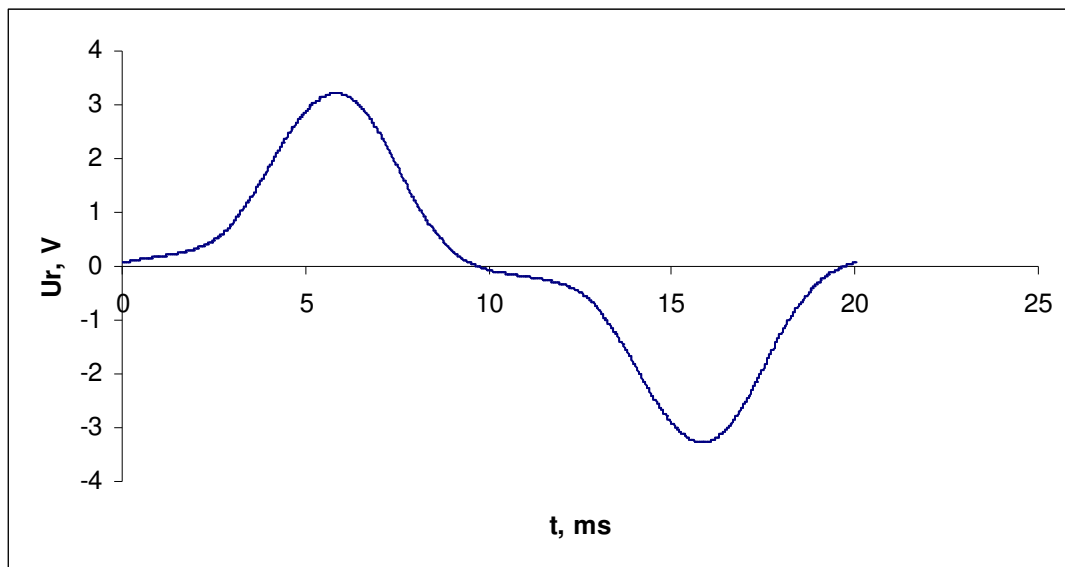
## 2.4 Ritės su feromagnetine šerdimi tyrimas

Nagrinėjamos ritės su feromagnetinę šerdimi schema parodyta 9 pav..



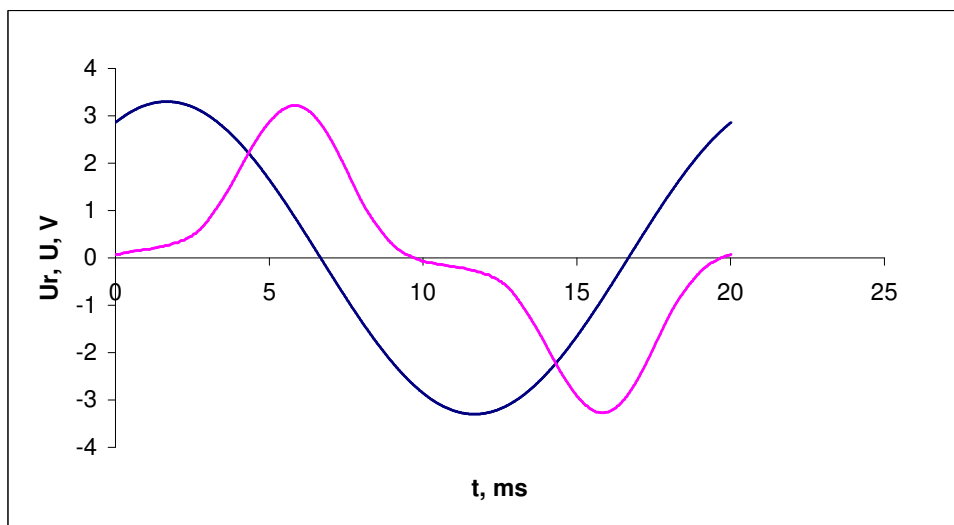
9 pav. *RL grandinė*

Kadangi grandinėje yra ritė su feromagnetine šerdimi, tai įtampos kritimas ant aktyviojoje varžoje  $R$  nesinusinis. Įtampos kritimo kreivė parodyta 10 pav.



10 pav. *Įtampos kritimas aktyviojoje varžoje R*

Priimkime kad šaltinio įtampa sinusinė ir jos kreivė pralenkia  $u_r \frac{\pi}{3}$  pradine faze.



11 pav. Šaltinio įtampa  $U$  pralenkia  $u_r \frac{\pi}{3}$  pradine faze.

$u_r$  – nesinusinė, tai ir įtampa ant  $L$  su plieno šerdimi bus nesinusinė.

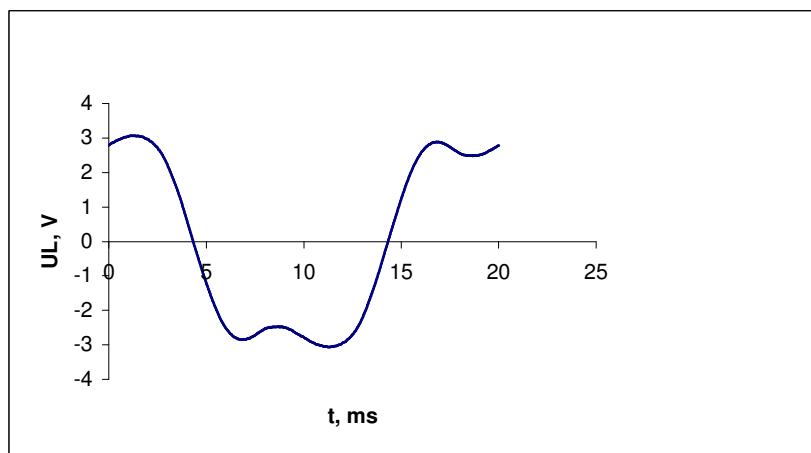
Įtampų lygtis:

$$U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) = iR + L \frac{d\Psi}{dt}, \quad (16)$$

tai  $u_L$  – įtampos kritimas ant ritės, išsireiškus iš lygties (19), gauname:

$$L \frac{d\Psi}{dt} = U_m (\omega t + \frac{\pi}{3}) - iR, \quad (17)$$

Atlikus skaičiavimus su Microsoft Exel programa, gauname nesinusinę  $u_L$ , ji pavaizduota 12 pav.



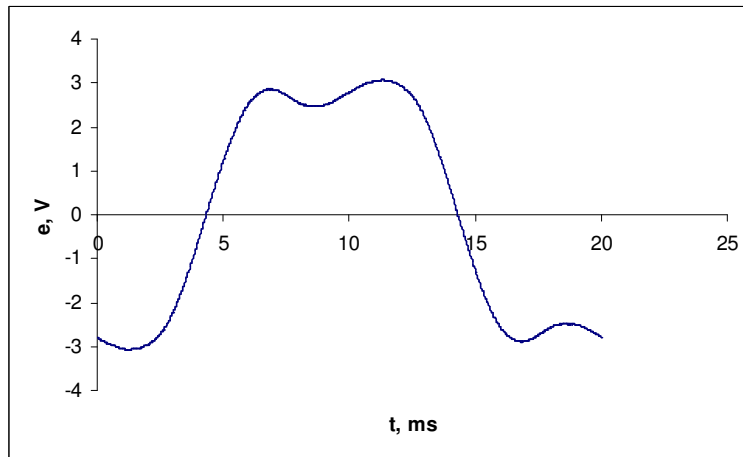
12 pav. Įtampos kritimas itėje

Kadangi magnetolaidyje veriantis pagrindinis srautas  $\Phi$ , verdamas apvijos N vijas, indukuoja jose evj  $e_L$ .

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

- **Srauto  $\phi$  skaičiavimas:**

Kadangi magnetinio srautonegalime tiesiogiai išmatuoti, tai skaičiuosime iš elektrovaros, kadangi  $-u_L = e_L$ , harmonikomis skaidysime  $e_L$ .



13 pav.  $e_L = f(t)$

Šią kreivę skaidysime harmonikomis, kai kreivės periodas yra  $2\pi$ , tai harmonikų skaidymas aprašomas tokiomis lygtimis:

$$f(x) = \sum_{n=1}^5 A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (19)$$

Šią lygtį sutvarkome:

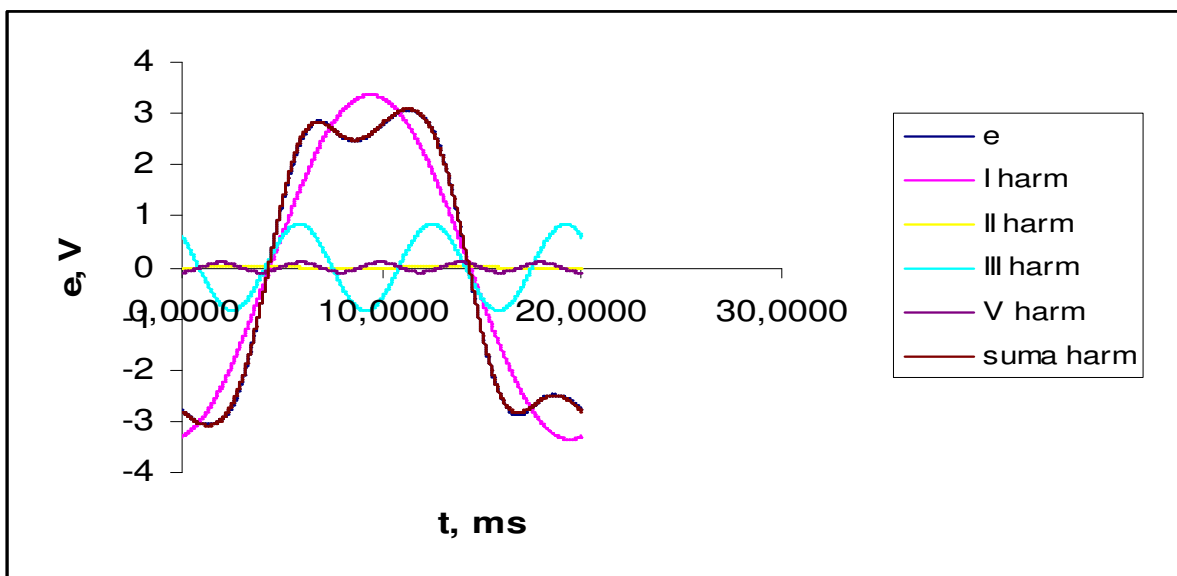
$$A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) = A_n \sin n\omega t \cos \alpha_n + A_n \cos n\omega t \sin \alpha_n = C_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \quad (20)$$

Sinusinės ir kosinusinės dedamosios:

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (21)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (22)$$

Išskleidę  $e_L$  harmonikomis, gauname kreives, kurios parodytos 14 pav.



14 pav.  $e_L$  kreivė išskaidyta harmonikomis

Kiekvienai harmonikai atskirai apskaičiuojame magnetinius srautus ir juos susumuojame, kadangi srautas pralenkia  $e_L$  pradine faze  $\frac{\pi}{2}$ , tai:

$$e_L = \omega N \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (23)$$

$$E_L = 4,44 N \Phi_m f, \quad (24)$$

$$\Phi_m = \frac{E_L}{4,44 N f}. \quad (25)$$

Apskaičiuojame  $E_L$  – efektinę reikšmę, pagal formulę:

$$E_L = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (26)$$

Ir įsistatę dydį i formulę (25) apskaičiuojame  $\Phi_m$ , magnetinis srautas  $\phi$  yra:

Iš šios kreivės surandame srautą  $\phi$  magnetolaidyje, srautas bus nesinusinis,  $\phi$  skaidysime harmonikomis:

$$\phi = \Phi_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \delta_1) + \Phi_{m3} \sin(3\omega t + \frac{\pi}{2} + \delta_3) + \Phi_{m5} \sin(5\omega t + \frac{\pi}{2} + \delta_5) + \dots + \Phi_{mn} \sin(n\omega t + \frac{\pi}{2} + \delta_n) \quad (27)$$

$$\omega = 2\pi f_n t \quad (28)$$

$f_1$  - pirmai harmonikai 50 Hz

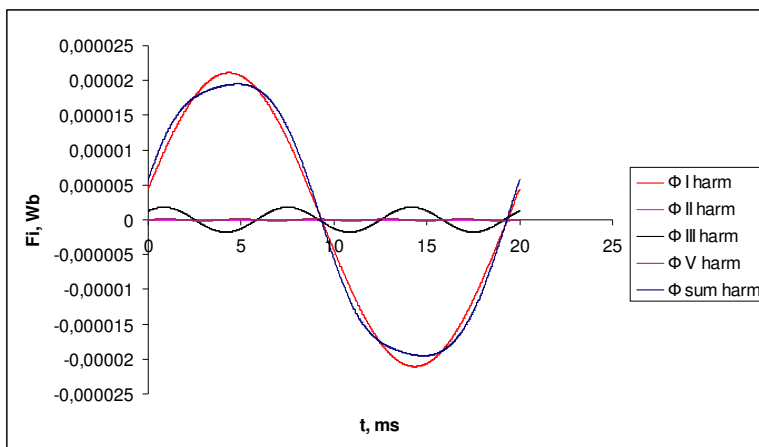
$f_2$  - antrai harmonikai 100 Hz

$f_3$  - trečiai harmonikai 150 Hz

$f_5$  - penktai harmonikai 250 Hz

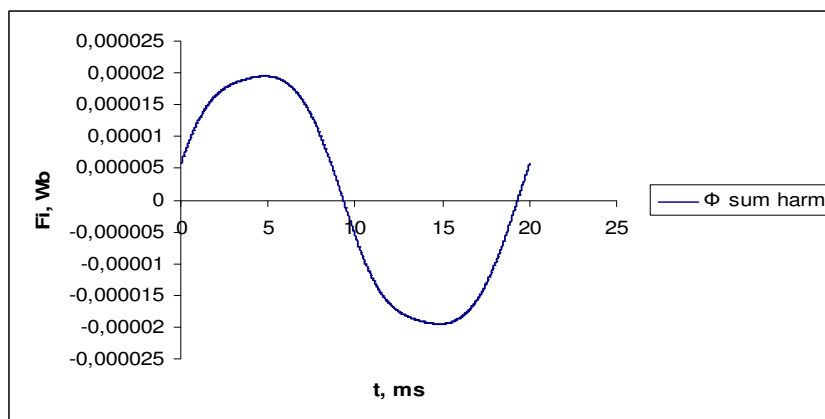
$N = 500$  (vijų skaičius).

Apskaičiavus kiekvienai harmonikai srautus, jas susumavę gauname magnetinį srautą  $\phi$ :



15 pav. Magnetinio srauto kreivė ir jos harmonikos

Gauta magnetinio srauto  $\phi$  kreivė, parodyta 16 pav.



16 pav. Magnetinio srauto  $\phi$  kreivė

### 3 Eksperimentinė dalis

#### 3.1 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius

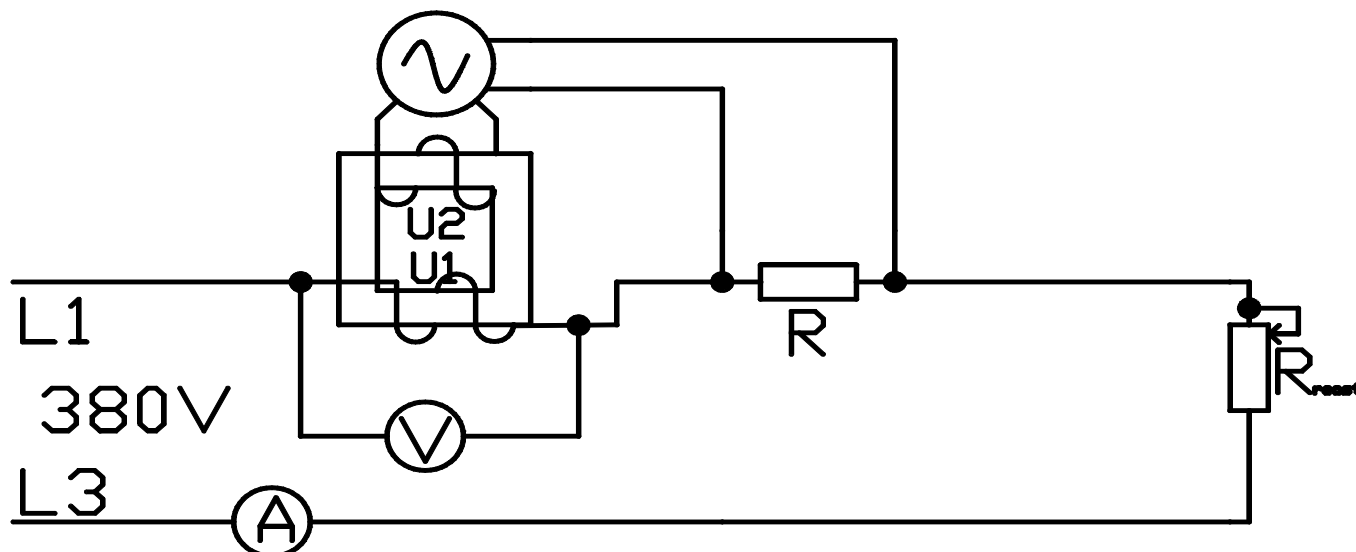


## maitinamas iš 380 V tinklo

Šio eksperimento tikslas, tirti kaip keisis magnetinio srauto kreivė, keičiant aktyvią varžą grandinėje ir kaip kės srovės ir elektrovaros kreivės.

Grandinę prijungiamo prie 380 V (L1 ir L2), į grandinę nuosekliai sujungiame reostatus, su jais reguliuojame aktyvią varžą grandinėje, schemoje pavaizduoti kaip  $R_{reost.}$ , taip pat nuosekliai į pirminę transformatoriaus grandinę įjungiamo labai mažą aktyvią varžą R. Ant varžos R matuojama srovės kreivė prie atitinkamų sąlygų. Ant transformatoriaus šerdies užvyniotos matavimo vijos (elektrovara). Prie transformatoriaus matuojamos apvijos prijungtas oscilografas, jis matuos elektrovaros kreivę.

Eksperimente naudojama schema parodyta 17 pav.



17 pav. Grandinės schema

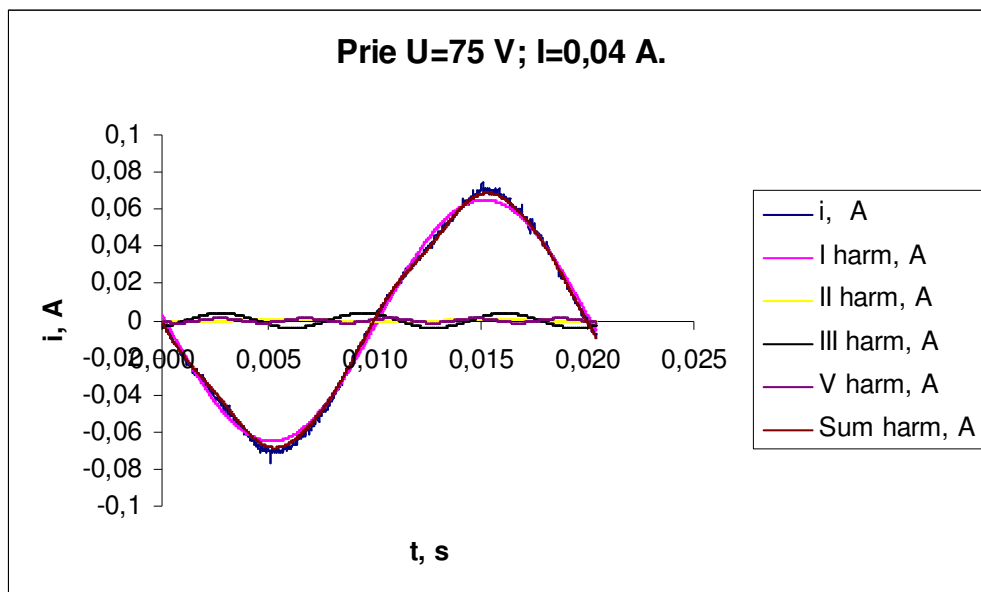
Oscilografas negali išmatuoti srovės kreivės tiesiogiai, nes jo labai didelė įėjimo varža, todėl ant varžos R išmatuosime įtampos kritimą. Aktyviojoje varžoje įtampos kritimo kreivė yra teisiškai proporcinga srovės kreivei, reikia tik įvesti koeficientą R.

Nustačius R reikšmę, galime perskaičiuoti įtampos kreivę į srovės kreivę.  $R = 2,34\Omega$

### Darbo eiga:

Atlikau 6 matavimus, prie skirtingų įtampų, voltmetas prijungtas prie transformatoriaus pirminės apvijos, kiekvienu bandymu mažinau aktyvią varžą grandinėje reostatu pagalba.

1. Pirmas matavimas: Kai  $U=75$  V; ir  $I=0,04$  A.



18 paveikslas. Srovės kreivė ir jos harmonikos.

- Įtampos kreivę, perskaičiuojame į srovės kreivę:

$$i_{1..818} = \frac{u_{1..818}}{R}. \quad (29)$$

- Srovės kreivę  $i = f(t)$ , skaidome harmonikomis:
- Periodas susideda iš 818 laiko ir srovės momentinių reikšmių, laiko žingsnis  $t = 0,000025$  s.

1 lentelė. Srovės ir laiko momentinės reikšmės per periodą.

Eil. Nr.	t, s	i, A
1	0	-0,0055
2	0,000025	-0,00238
---	---	---
817	0,0204	-0,018
818	0,020425	-0,02113

- Apskaičiuojame kiekvienai laiko reikšmei kampą  $\alpha_{1..818}$ .

$$\alpha_{1..818} = \frac{t_{1..818} \cdot \pi}{0,01}, \quad (30)$$

- Kreivę  $i = f(t)$  skaidome harmonikomis, integruojame į sinusines ir kosinusines harmonikų dedamąsias eilutes, pagal (20), (21), (22) formules:

- Skaičiavimo duomenys pateikti 2 lentelėje:

2 lentelė. Sinusinių ir kosinusinių harmonikų dedamosios.

Eil. Nr.	Kampas $\alpha$ , rad	1 harm.		3 harm.		5 harm.	
		$i_{I.sin.harm}$ , A	$i_{I.cos.harm}$ , A	$i_{III.sin.harm}$ , A	$i_{III.cos.harm}$ , A	$i_{V.sin.harm}$ , A	$i_{V.cos.harm}$ , A
1	0	0	-0,00235	0	-0,0023454	0	-0,0023454
2	0,007854	-0,000008	-0,00101	-0,000024	-0,00101	-0,00004	-0,001012
---	---	---	---	---	---	---	---
817	6,408849	-0,00096	-0,00762	-0,00283	-0,00714	-0,00451	-0,00621
818	6,416703	-0,0012	-0,00893	-0,00351	-0,008296	-0,00558	-0,007075
$\Sigma$	---	-26,5914	1,140674	0,8224903	-1,4136337	-0,4723479	-0,217392

- Apskaičiuojame koeficientą K, kuris reikalingas skaičiuojant kiekvienos harmonikos amplitudę:

$$K_{I.sin.harm} = \frac{2 \cdot A_{I.sin.harm}}{n}, \quad (31)$$

$$K_{I.cos.harm} = \frac{2 \cdot B_{I.sin.harm}}{n}. \quad (32)$$

$n = 818$  - momentinių reikšmių skaičius per periodą.

Rezultatai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Koeficientų K reikšmės.

$K_{I.sin.harm}$	$K_{I.cos.harm}$	$K_{III.sin.harm}$	$K_{III.cos.harm}$	$K_{V.sin.harm}$	$K_{V.cos.harm}$
0,065	0,0028	0,002	-0,0035	-0,0012	-0,00053

- Apskaičiuojame kiekvienos harmonikos amplitudę:

$$I_{m.I.harm} = \sqrt{K_{I.sin.harm}^2 + K_{I.cos.har}^2}, \quad (33)$$

.....

$$I_{m.V.harm} = \sqrt{K_{V.sin.harm}^2 + K_{V.cos.harm}^2}. \quad (34)$$

Srovės kreivių harmonikų amplitudės pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Srovės kreivės harmonikų amplitudės.

$I_{m.I.harm}$ , A	$I_{m.III.harm}$ , A	$I_{m.V.harm}$ , A
0,0651	0,0034	0,00127

- Apskaičiuojame kiekvienos srovės kreivės harmonikos fazės kampą:

$$\psi_{I.harm} = \arctg \frac{K_{I.cos.harm}}{K_{I.sin.harm}}, \quad (35)$$

.....

$$\psi_{V.harm} = \arctg \frac{K_{V.cos.harm}}{K_{V.sin.harm}}. \quad (36)$$

Skaičiavimo duomenis pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Harmonikų fazės, radianais.

$\psi_{I.harm}$ , rad	$\psi_{III.harm}$ , rad	$\psi_{V.harm}$ , rad
<b>0,043</b>	<b>-1,044</b>	<b>0,431</b>

- Perskaičiuojame radianus į laipsnius:

$$\varphi_{I.harm} = \frac{\psi_{I.harm} \cdot 180}{\pi}, \quad (37)$$

.....

$$\varphi_{V.harm} = \frac{\psi_{V.harm} \cdot 180}{\pi}. \quad (38)$$

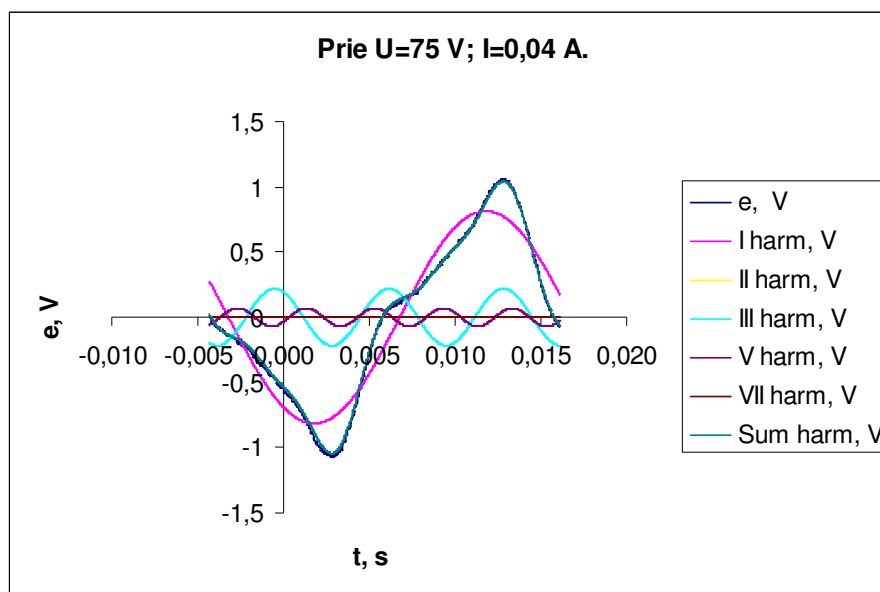
6 lentelė. Harmonikų fazės, laipsniais

$\varphi_{I.harm}$	$\varphi_{III.harm}$	$\varphi_{V.harm}$
2,46 <sup>0</sup>	-59,81 <sup>0</sup>	24,71 <sup>0</sup>

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$i = 0,0651 \sin(\omega t - 2,456^\circ) + 0,00008 \sin(2\omega t + 61,36^\circ) + 0,0034 \sin(3\omega t - 59,81^\circ) + 0,00127 \sin(5\omega t + 24,71^\circ).A$$

- **Analogiškai atliksiu skaičiavimus elektrovarai, kurios kreivė išskaidyta harmonikomis pavaizduota 19 pav.**



19 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos.

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 0,8149 \sin(\omega t - 58,06^\circ) + 0,0012 \sin(2\omega t + 46,40^\circ) + 0,2179 \sin(3\omega t - 61,76^\circ) + 0,0701 \sin(5\omega t - 28,23^\circ) + 0,0034 \sin(7\omega t - 82,19^\circ).V$$

- **Srauto  $\phi$  skaičiavimas.**

- kiekvienai elektrovaros harmonikai apskaičiuojame srautus, kadangi srautas pralenkia  $e_L$

faze kampų  $\frac{\pi}{2}$ . tai:

$$e_L = \omega N \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (39)$$

- Apsiskaičiuojame kiekvienos elektrovaros harmonikos efektingą reikšmę:

$$E_{L.I.harm} = \frac{E_{m.I.harm}}{\sqrt{2}}, \quad (40)$$

.....

$$E_{L.V.harm} = \frac{E_{m.V.harm}}{\sqrt{2}}. \quad (41)$$

- Skaičiavimo duomenis pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Elektrovaros kreivių harmonikų efektingės reikšmės.

$E_{L.I.harm}, V$	$E_{L.III.harm}, V$	$E_{L.V.harm}, V$
<b>0,576</b>	<b>0,1541</b>	<b>0,0496</b>

- Pagal formulę apskaičiuojame srauto amplitudę kiekvienai harmonikai:

$$\Phi_{m.I.harm} = \frac{E_{L.I.harm}}{4,44 \cdot N \cdot f_1}, \quad (42)$$

$$\Phi_{m.V.harm} = \frac{E_{L.V.harm}}{4,44 \cdot N \cdot f_5}. \quad (43)$$

Pavyzdys:

$$\Phi_{m.I.harm} = \frac{0,576}{4,44 \cdot 0,004 \cdot 50} = 0,6489 \text{ mWb},$$

$$f_1 = 50\text{Hz},$$

$$f_2 = 100\text{Hz},$$

$$f_3 = 150\text{Hz},$$

$$f_5 = 250\text{Hz},$$

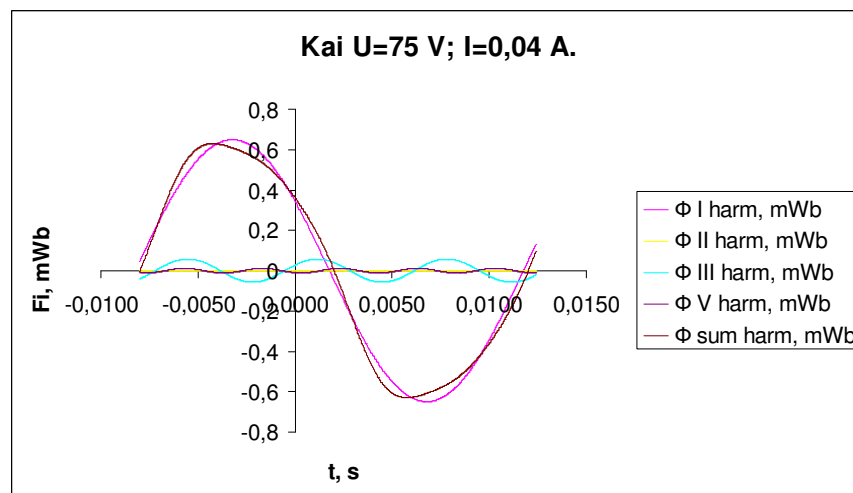
$$N = 4.$$

8 lentelė. Srauto amplitudės kiekvienai harmonikai.

$\Phi_{m.I.harm}$ , mWb	$\Phi_{m.III.harm}$ , mWb	$\Phi_{m.V.harm}$ , mWb
<b>0,649</b>	<b>0,0578</b>	<b>0,01117</b>

- Srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\begin{aligned} \phi &= \Phi_{m.I.harm} \cdot \sin(\omega t + 58,06^\circ + 90^\circ) + \Phi_{m.II.harm} \cdot \sin(2\omega t + 46,40^\circ + 90^\circ) + \\ &+ \Phi_{m.III.harm} \cdot \sin(3\omega t - 61,76^\circ + 90^\circ) + \Phi_{m.V.harm} \cdot \sin(5\omega t - 28,23^\circ + 90^\circ). \text{Wb} \\ \phi &= 0,649 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 58,06^\circ + 90^\circ) + 4,9 \cdot 10^{-7} \sin(2\omega t + 46,40^\circ + 90^\circ) + \\ &+ 5,78 \cdot 10^{-5} \sin(3\omega t - 61,76^\circ + 90^\circ) + 1,117 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 28,23^\circ + 90^\circ) \text{Wb}. \end{aligned}$$



20 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Apskaičiuojame, kokią dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

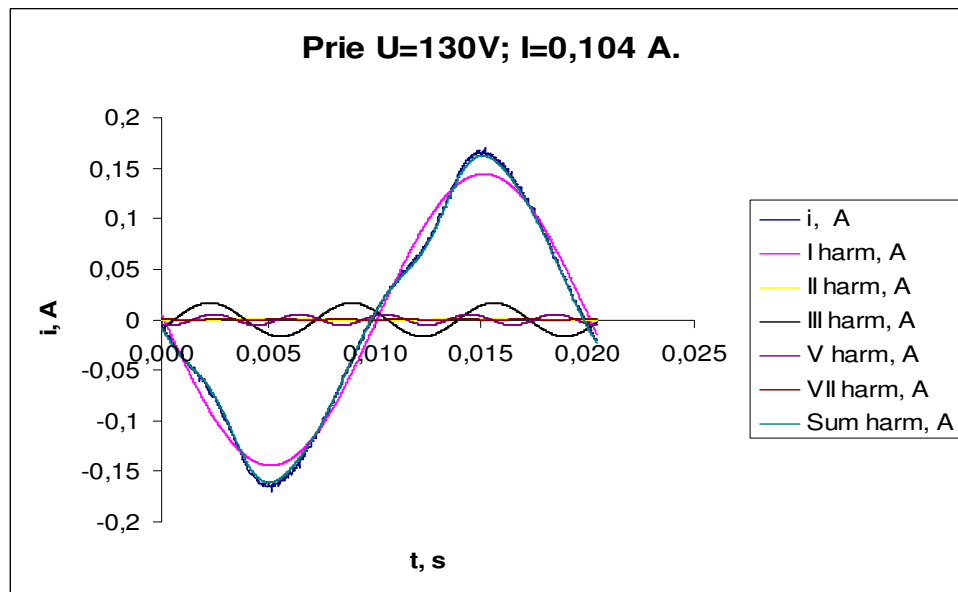
$$\xi_n = \frac{I_{m.n.harm}}{I_{m.I.harm}} \cdot 100\% \quad (44)$$

Skaičiavimo rezultatai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 75V$ ,  $I = 0,04A$ .

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\Phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>6,16</b>	<b>26,74</b>	<b>8,91</b>
5	<b>1,95</b>	<b>8,6</b>	<b>1,73</b>
7		<b>0,42</b>	

## 2. Antras matavimas. Kai $U=130V$ ; ir $I=0,104A$ .



21 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Kreivę  $i = f(t)$  skaidysime harmonikomis, analogiškai kaip ir prieš tai.
- Analogiškai apskaičiuojame kiekvienos harmonikos amplitudę:

10 lentelė. Srovės kreivės harmonikų amplitudės.

$I_{m.I.harm}$ , A	$I_{m.II.harm}$ , A	$I_{m.III.harm}$ , A	$I_{m.V.harm}$ , A	$I_{m.VII.harm}$ , A
<b>0,1443</b>	<b>0,00067</b>	<b>0,0167</b>	<b>0,0055</b>	<b>0,00088</b>

- Apskaičiuojame srovės kreivės harmonikos fazę kampa, duomenis pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Harmonikų fazės kampas, radianais.

$\psi_{I.harm}$	$\psi_{II.harm}$	$\psi_{III.harm}$	$\psi_{V.harm}$	$\psi_{VII.harm}$
<b>-0,0355</b>	<b>1,4222</b>	<b>-0,553</b>	<b>0,8613</b>	<b>-1,3183</b>

- Perskaičiuojame radianus į laipsnius:

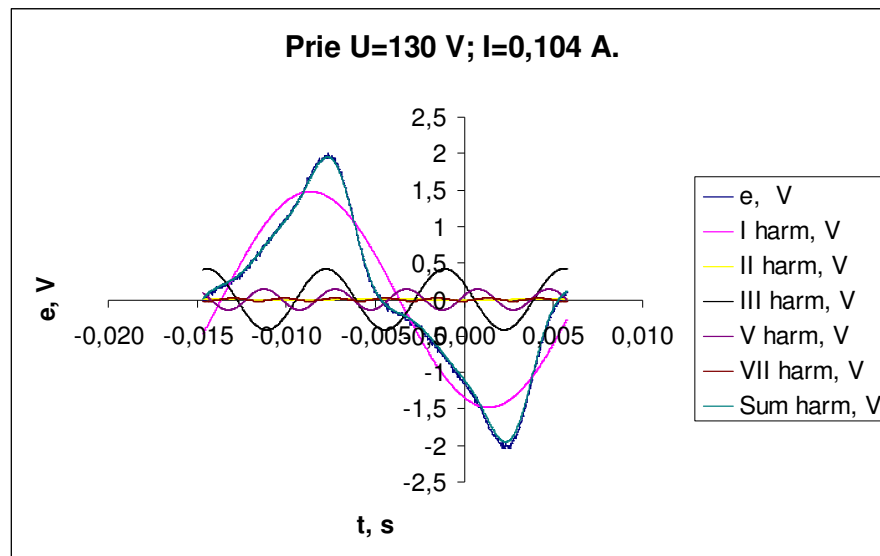
12 lentelė. Harmonikų fazės, laipsniais

$\varphi_{I.harm}$	$\varphi_{II.harm}$	$\varphi_{III.harm}$	$\varphi_{V.harm}$	$\varphi_{VII.harm}$
<b>-2,03<sup>0</sup></b>	<b>81,48<sup>0</sup></b>	<b>-31,68<sup>0</sup></b>	<b>49,35<sup>0</sup></b>	<b>-75,53<sup>0</sup></b>

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$i = 0,1443 \sin(\omega t - 2,03^\circ) + 0,00067 \sin(2\omega t + 81,48^\circ) + 0,0167 \sin(3\omega t - 31,68^\circ) + 0,00088 \sin(5\omega t - 75,53^\circ) A.$$

- Taip pat atliekame skaičiavimus elektrovarai, kurios kreivė ir jos harmonikos parodytos 11.2 paveiksle.



22 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 1,4779 \sin(\omega t - 66,73^\circ) + 0,0013 \sin(2\omega t + 85,11^\circ) + 0,4172 \sin(3\omega t + 29,74^\circ) + 0,1427 \sin(5\omega t + 23,82^\circ) + 0,0213 \sin(7\omega t - 73,41^\circ) V.$$

- **Srauto  $\Phi$  skaičiavimas, kai  $U=130$  V ir  $I=0,104$  A.**
- Skaičiavimai analogiški.

Skaičiavimo duomenys pateikti lentelėse:



13 lentelė. Elektrovaros kreivių harmonikų efektinės reikšmės.

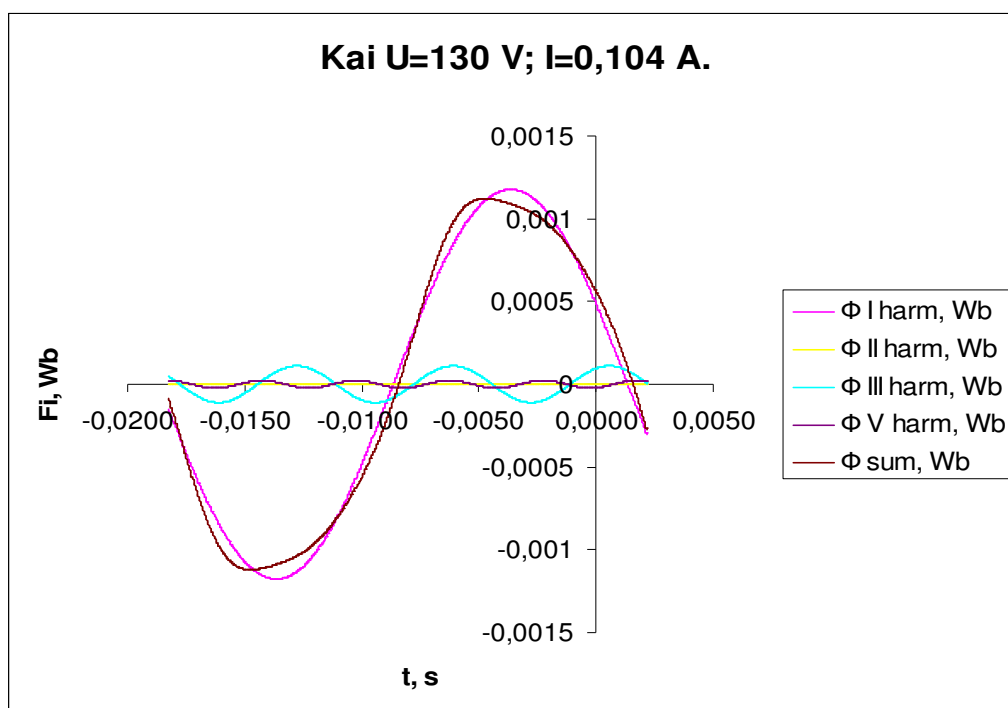
$E_{L.I.harm}, V$	$E_{L.II.harm}, V$	$E_{L.III.harm}, V$	$E_{L.V.harm}, V$
<b>1,045</b>	<b>0,00094</b>	<b>0,295</b>	<b>0,101</b>

14 lentelė. Srauto amplitudės kiekvienai harmonikai.

$\Phi_{m.I.harm}, Wb$	$\Phi_{m.II.harm}, Wb$	$\Phi_{m.III.harm}, Wb$	$\Phi_{m.V.harm}, Wb$
<b>0,00118</b>	<b>0,00000053</b>	<b>0,00011</b>	<b>0,000023</b>

- Srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 1,18 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 66,73^{\circ} + 90^{\circ}) + 5,3 \cdot 10^{-7} \sin(2\omega t + 85,11^{\circ} + 90^{\circ}) + 1,1 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 29,73^{\circ} + 90^{\circ}) + 2,3 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 23,82^{\circ} + 90^{\circ}) Wb.$$



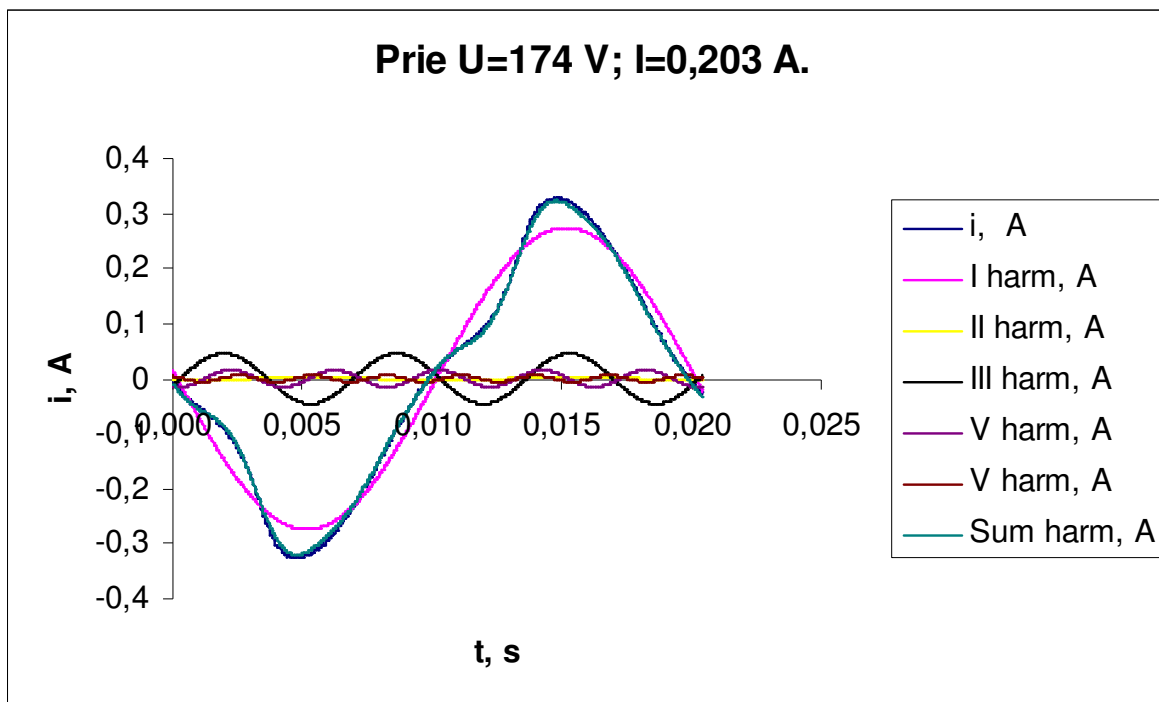
23 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Analogiškai apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

15 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 130V$ ,  $I = 0,104A$

Harmonikos eilės numeris	$i, \%$	$e, \%$	$\Phi, \%$
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>11,55</b>	<b>28,23</b>	<b>9,32</b>
5	<b>3,81</b>	<b>9,66</b>	<b>1,95</b>
7	<b>0,61</b>	<b>1,44</b>	

3. Trečias matavimas. Kai  $U=174$  V; ir  $I=0,203$  A.



24 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Kreivę  $i = f(t)$  skaidysime harmonikomis, analogiškai kaip ir prieš tai.
- Apskaičiuoti duomenys pateikti lentelėse:

16 lentelė. Srovės kreivės harmonikų amplitudės.

$I_{m.I.harm}, A$	$I_{m.II.harm}, A$	$I_{m.III.harm}, A$	$I_{m.V.harm}, A$	$I_{m.VII.harm}, A$
<b>0,274</b>	<b>0,00125</b>	<b>0,0458</b>	<b>0,0156</b>	<b>0,00573</b>

17 lentelė. Harmonikų fazės radianais.

$\psi_{I.harm}$	$\psi_{II.harm}$	$\psi_{III.harm}$	$\psi_{V.harm}$	$\psi_{VII.harm}$
<b>0,05164</b>	<b>1,2867</b>	<b>-0,283</b>	<b>-1,1892</b>	<b>-0,8821</b>

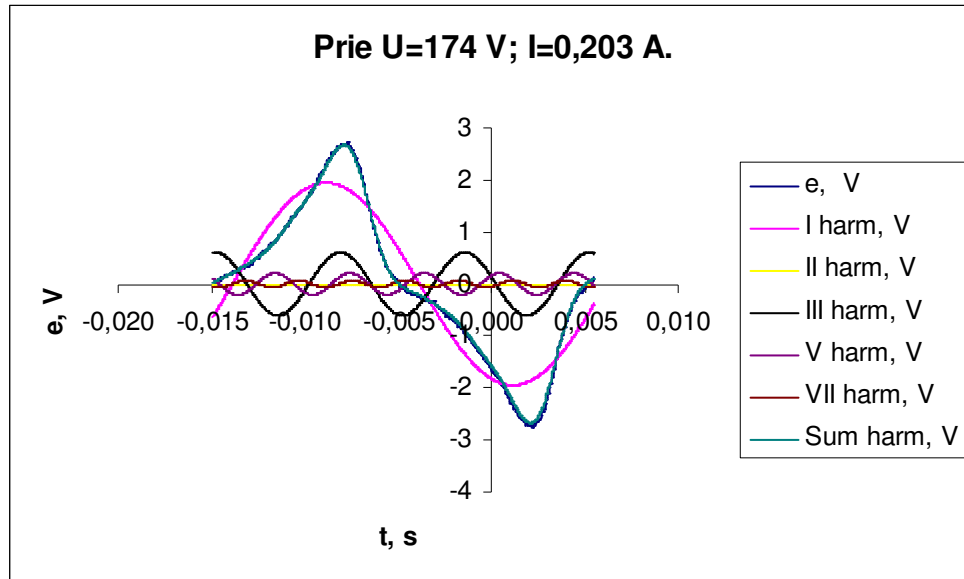
18 lentelė. Harmonikų fazės laipsniais

$\varphi_{I.harm}$	$\varphi_{II.harm}$	$\varphi_{III.harm}$	$\varphi_{V.harm}$	$\varphi_{VII.harm}$
<b><math>2,96^0</math></b>	<b><math>73,72^0</math></b>	<b><math>-16,21^0</math></b>	<b><math>-68,14^0</math></b>	<b><math>-50,54^0</math></b>

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$i = 0,27 \sin(\omega t + 2,96^\circ) + 0,00125 \sin(2\omega t + 73,72^\circ) + 0,0458 \sin(3\omega t - 16,21^\circ) + 0,156 \sin(5\omega t - 68,14^\circ) + 0,00573 \sin(7\omega t - 50,54^\circ) \text{ A.}$$

- Elektrovara kreivė išskaidyta harmonikomis ir pavaizduota 22.2 pav.



25 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 1,9468 \sin(\omega t - 69,59^\circ) + 0,0016 \sin(2\omega t - 81,87^\circ) + 0,6058 \sin(3\omega t + 12,31^\circ) + 0,2076 \sin(5\omega t + 53,04^\circ) + 0,06518 \sin(7\omega t - 49,677^\circ) \text{ V.}$$

- Srauto  $\phi$  skaičiavimas, kai  $U=174 \text{ V}$  ir  $I=0,203 \text{ A}$ .
- Skaičiavimai analogiškai.

19 lentelė. Elektrovaros kreivių harmonikų efektinės reikšmės.

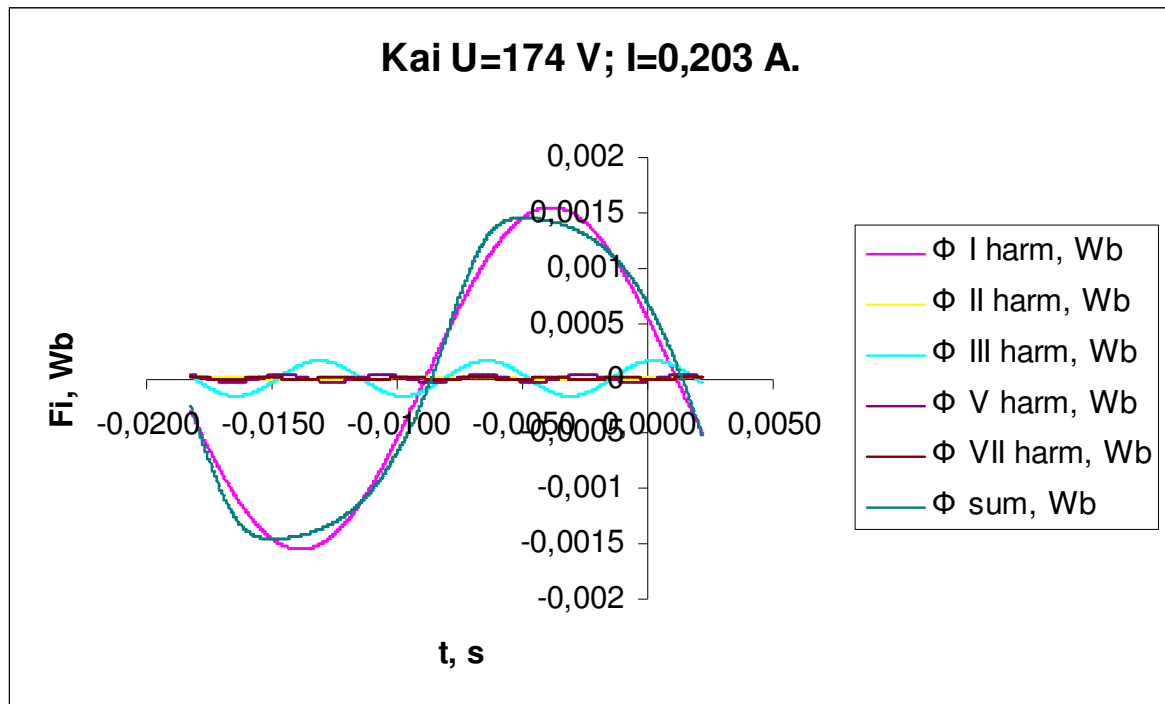
$E_{L.I.harm}, \text{ V}$	$E_{L.II.harm}, \text{ V}$	$E_{L.III.harm}, \text{ V}$	$E_{L.V.harm}, \text{ V}$	$E_{L.VII.harm}, \text{ V}$
<b>1,377</b>	<b>0,00112</b>	<b>0,4284</b>	<b>0,1468</b>	<b>0,0461</b>

20 lentelė. Srauto amplitudės kiekvienai harmonikai.

$\Phi_{m.I.harm}, \text{ Wb}$	$\Phi_{m.II.harm}, \text{ Wb}$	$\Phi_{m.III.harm}, \text{ Wb}$	$\Phi_{m.V.harm}, \text{ Wb}$	$\Phi_{m.VI.harm}, \text{ Wb}$
<b>0,00155</b>	<b>0,00000063</b>	<b>0,000161</b>	<b>0,000033</b>	<b>0,0000074</b>

- Srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 1,55 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 69,59^\circ + 90^\circ) + 6,3 \cdot 10^{-7} \sin(2\omega t - 81,87^\circ + 90^\circ) + 1,61 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 12,31^\circ + 90^\circ) + 3,3 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 53,04^\circ + 90^\circ) + 7,4 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t - 49,677^\circ + 90^\circ) \text{ Wb.}$$



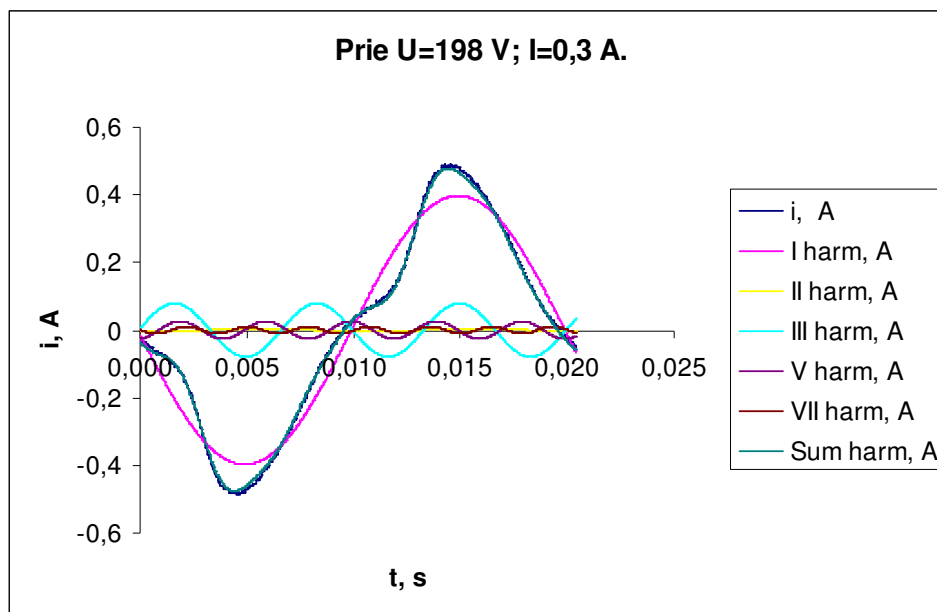
26 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Analogiškai apskaičiuojame, kokia dalį procentų pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

21 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 174V$ ,  $I = 0,203A$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\Phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>16,7</b>	<b>31,12</b>	<b>10,39</b>
5	<b>5,7</b>	<b>10,66</b>	<b>2,13</b>
7	<b>2,09</b>	<b>3,35</b>	<b>0,48</b>

4. Ketvirtas matavimas. Kai  $U=198\text{ V}$ ; ir  $I=0,3\text{ A}$ .

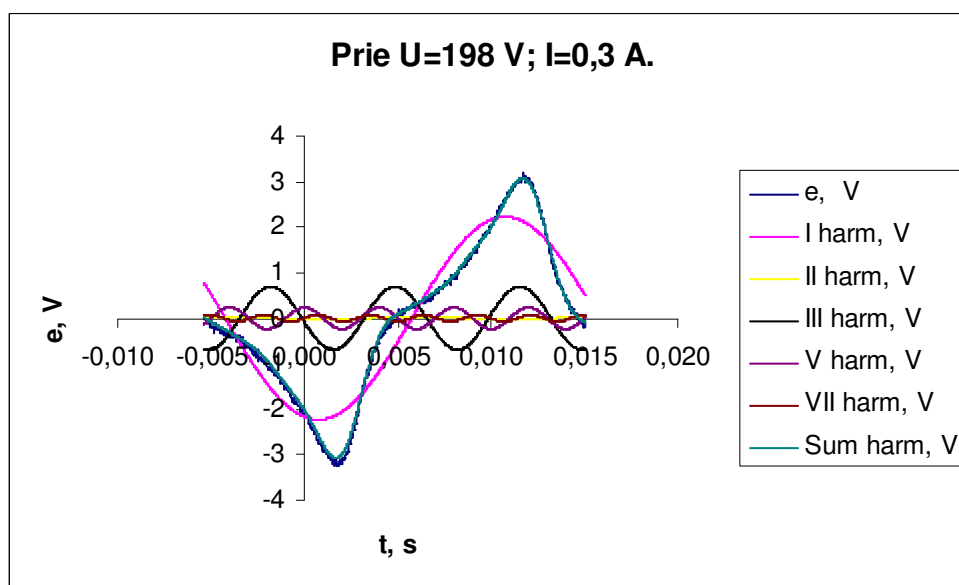


27 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Skaičiavimai analogiški ir galutinis rezultatas yra:

$$i = 0,398 \sin(\omega t + 1,92^\circ) + 0,006 \sin(2\omega t + 68,83^\circ) + 0,079 \sin(3\omega t + 3,07^\circ) + 0,0262 \sin(5\omega t - 78,99^\circ) + 0,0105 \sin(7\omega t + 3,5^\circ) \text{ A.}$$

- Elektrovaros kreivė, kai  $U=198\text{ V}$ ;  $I=0,3\text{ A}$ .

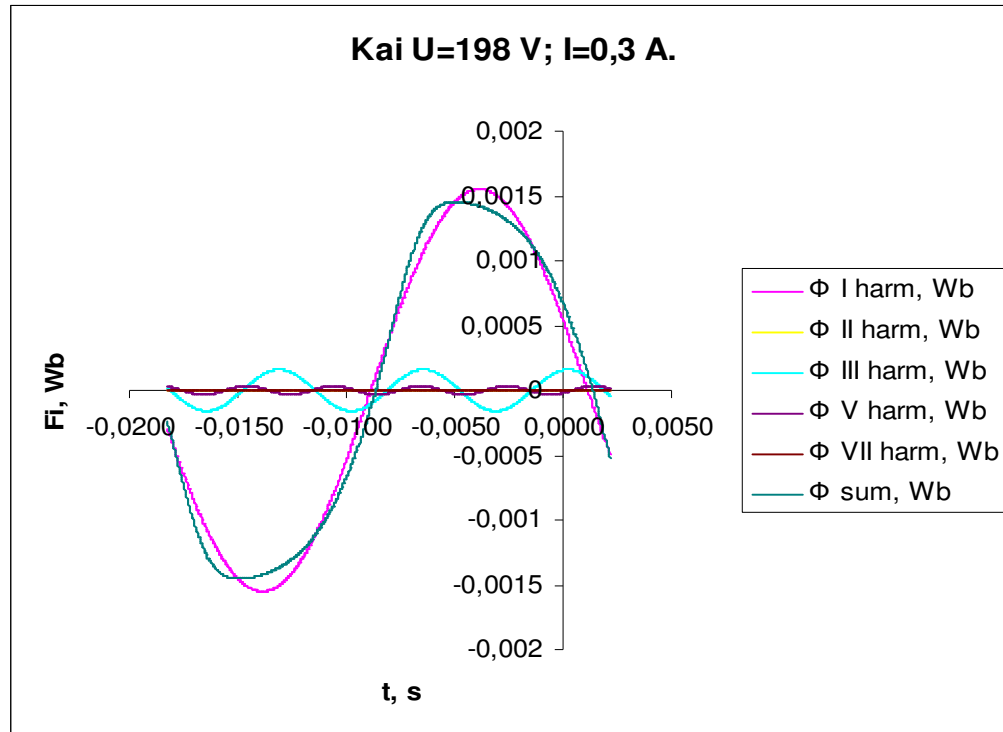


28 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 2,2292 \sin(\omega t - 76,42^\circ) + 0,0031 \sin(2\omega t + 53,67^\circ) + 0,69196 \sin(3\omega t - 7,2^\circ) + 0,2367 \sin(5\omega t + 90^\circ) + 0,07323 \sin(7\omega t - 5,4^\circ) V.$$

- Srautas  $\phi$ , kai  $U=198 V$  ir  $I=0,3 A$ .



29 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Kreivė išskleista harmonikomis:

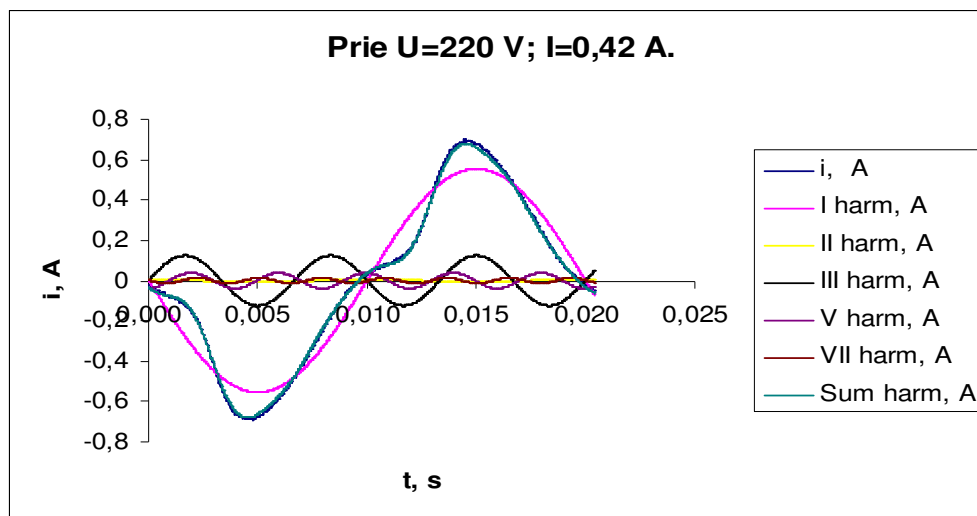
$$\phi = 1,78 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 76,42^\circ + 90^\circ) + 0,1 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 53,67^\circ + 90^\circ) + 1,84 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 7,2^\circ + 90^\circ) + 0,4 \cdot 10^{-4} \sin(5\omega t + 90^\circ + 90^\circ) + 0,8 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t - 5,4^\circ + 90^\circ) Wb.$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

22 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 198V$ ,  $I = 0,3A$ .

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>19,83</b>	<b>31,04</b>	<b>10,34</b>
5	<b>6,59</b>	<b>10,62</b>	<b>2,25</b>
7	<b>2,63</b>	<b>3,29</b>	<b>0,45</b>

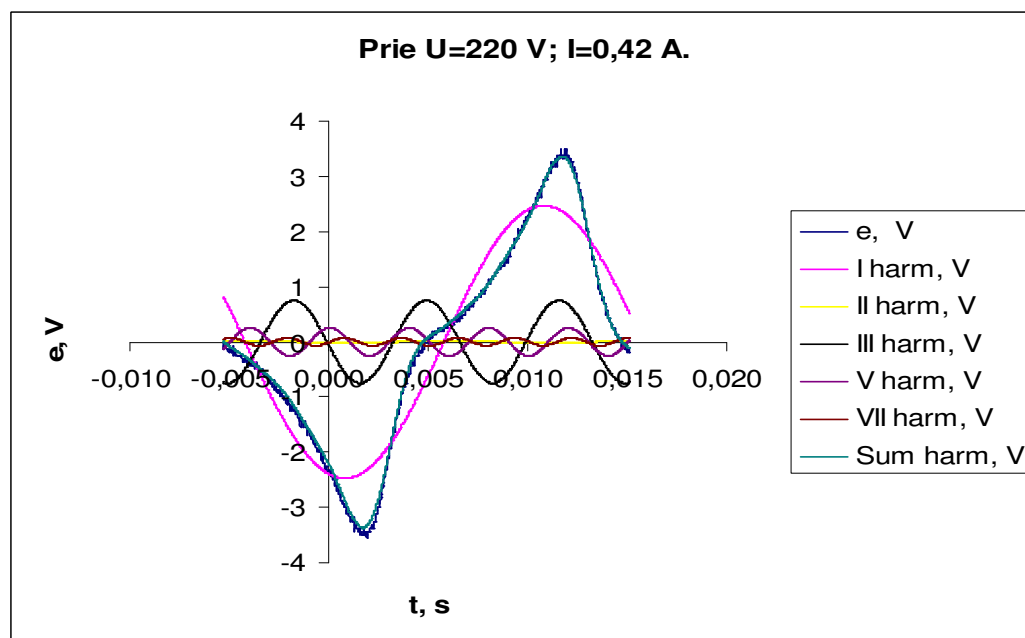
5. Penktas matavimas. Kai  $U=220\text{ V}$ ; ir  $I=0,42\text{ A}$ .



30 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

$$i = 0,5544 \sin(\omega t + 0,13^\circ) + 0,0013 \sin(2\omega t - 89,98^\circ) + 0,124 \sin(3\omega t + 0,68^\circ) + 0,039 \sin(5\omega t - 83,82^\circ) + 0,0141 \sin(7\omega t - 8^\circ) \text{ A.}$$

- Elektrovaros kreivė, kai  $U=220\text{ V}$ ;  $I=0,42\text{ A}$ .

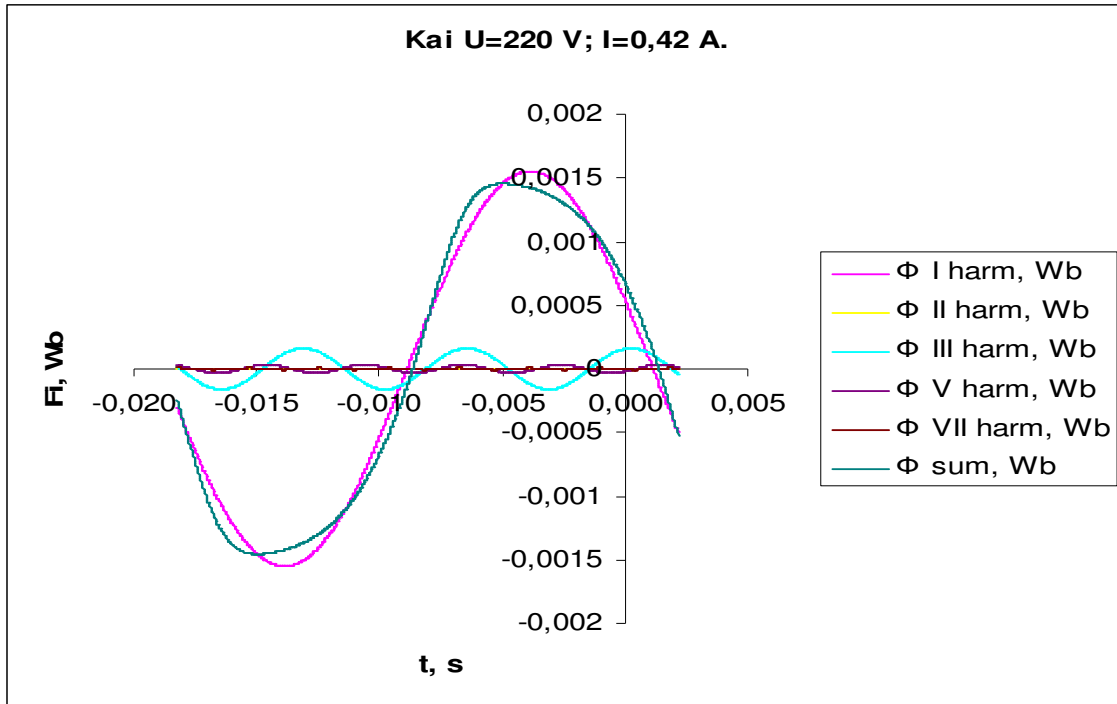


31 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 2,4704 \sin(\omega t - 75,86^\circ) + 0,0027 \sin(2\omega t + 56,46^\circ) + 0,7473 \sin(3\omega t - 75,25^\circ) + 0,2553 \sin(5\omega t + 86,67^\circ) + 0,07169 \sin(7\omega t - 6,51^\circ) \text{ V.}$$

- Srautas  $\phi$ , kai  $U=220\text{ V}$  ir  $I=0,42\text{ A}$ .



32 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 75,86^\circ + 90^\circ) + 0,11 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 56,46^\circ + 90^\circ) + 2 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 75,25^\circ + 90^\circ) + 4,1 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 86,67^\circ + 90^\circ) + 8,2 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t - 6,51^\circ + 90^\circ) \text{ Wb}.$$

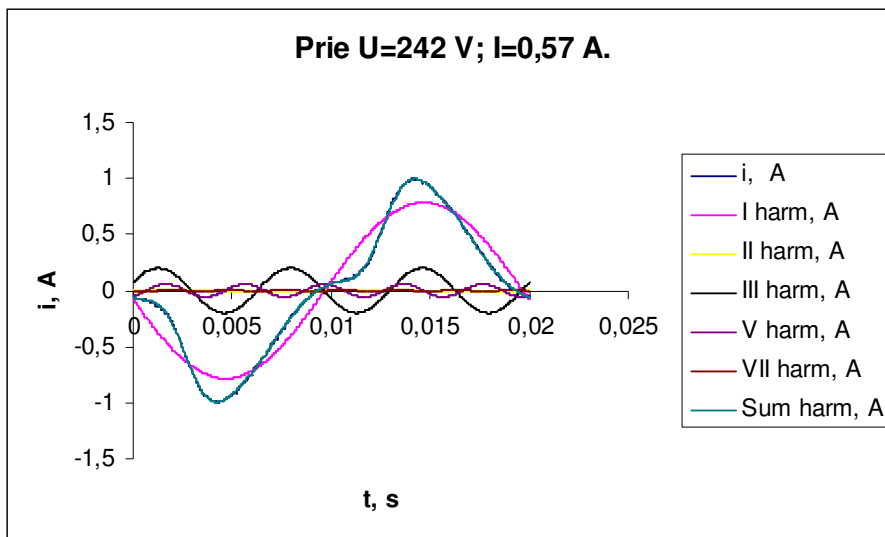
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

23 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 220\text{ V}$ ,  $I = 0,42\text{ A}$ .

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\Phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>22,43</b>	<b>30,25</b>	<b>10</b>
5	<b>7,05</b>	<b>10,33</b>	<b>2,05</b>
7	<b>2,54</b>	<b>2,9</b>	<b>0,41</b>



6. Šeštas matavimas. Kai  $U=242\text{ V}$ ; ir  $I=0,57\text{ A}$ .

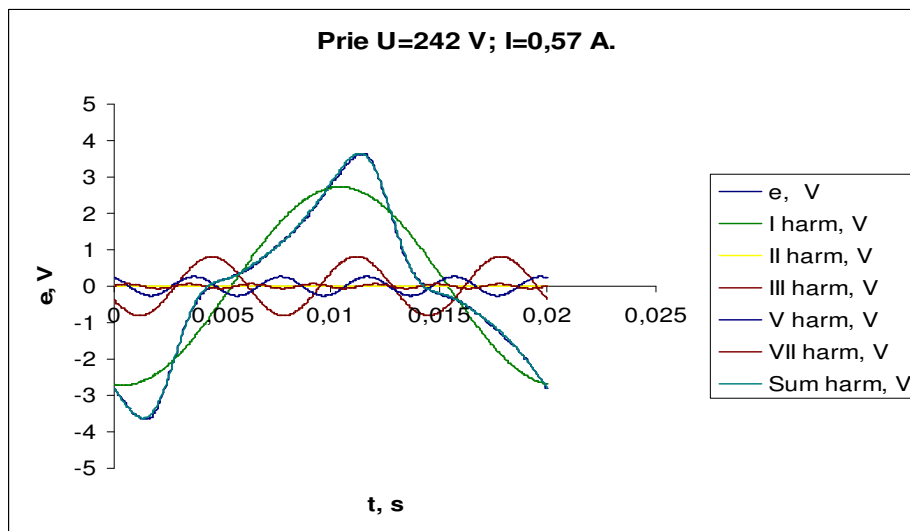


33 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Galutinis rezultatas:

$$i = 0,785 \sin(\omega t - 5,78^\circ) + 0,0013 \sin(2\omega t + 14,8^\circ) + 0,2 \sin(3\omega t + 21^\circ) + 0,0575 \sin(5\omega t - 58,53^\circ) + 0,0163 \sin(7\omega t + 19,81^\circ) \text{ A.}$$

- Elektrovaros kreivė, kai  $U=242\text{ V}$ ;  $I=0,57\text{ A}$ .



34 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

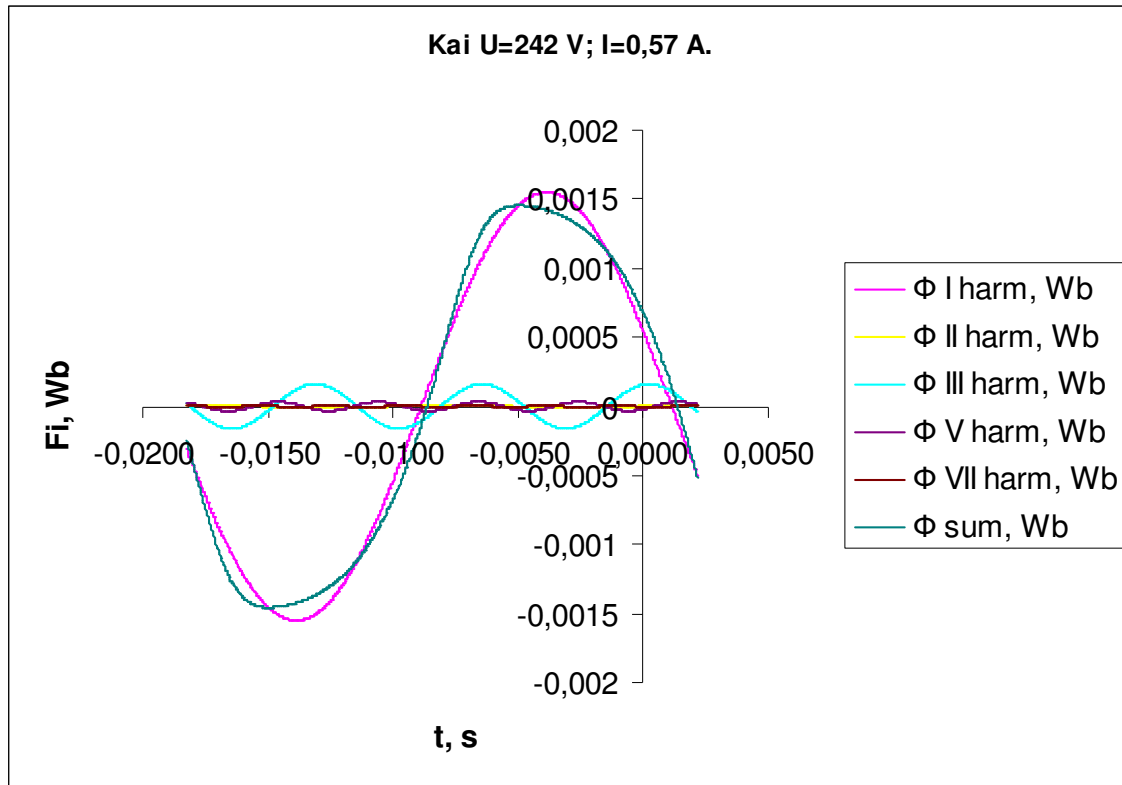
- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 2,72 \sin(\omega t - 82,37^\circ) + 0,012 \sin(2\omega t + 85,15^\circ) + 0,8105 \sin(3\omega t - 6,85^\circ) + 0,2629 \sin(5\omega t + 61,97^\circ) + 0,06183 \sin(7\omega t + 11,23^\circ) \text{ V.}$$

- Srautas  $\phi$ , kai  $U=242\text{ V}$  ir  $I=0,57\text{ A}$ .

- Srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 2,2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 82,37^\circ + 90^\circ) + 0,5 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 85,15^\circ + 90^\circ) + 2,2 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 6,85^\circ + 90^\circ) + 4,2 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 61,97^\circ + 90^\circ) + 0,7 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 11,23^\circ + 90^\circ) \text{ Wb.}$$



35 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos.

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

24 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $U = 242\text{ V}$ ,  $I = 0,57\text{ A}$ .

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\Phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>25,49</b>	<b>29,8</b>	<b>10</b>
5	<b>7,33</b>	<b>9,67</b>	<b>1,91</b>
7	<b>2,07</b>	<b>2,72</b>	<b>0,32</b>

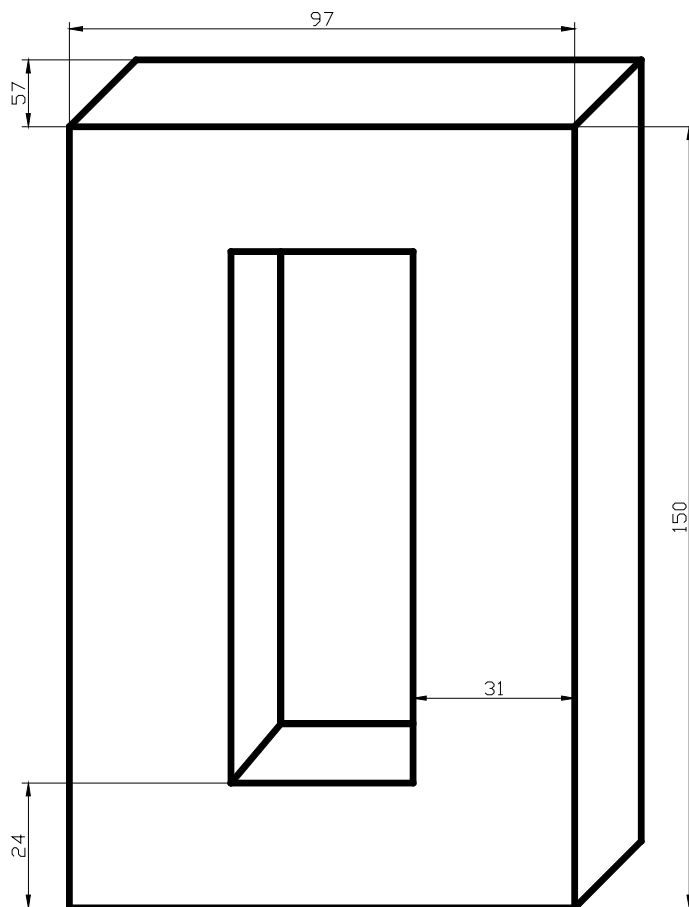
- Procentinių srovės, elektrovaros ir magnetinio srauto išraiškų palyginimas.

25 lentelė. Procentinių srovės, elektrovaros ir srauto išraiškos

Harmonikos eilės numeris	Kai U=75V; I=0,04A. i, %	Kai U=75V; I=0,04A. e, %	Kai U=75V; I=0,04A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>6,16</b>	<b>26,74</b>	<b>8,91</b>
5	<b>1,95</b>	<b>8,6</b>	<b>1,73</b>
7		<b>0,42</b>	
Harmonikos eilės numeris	Kai U=130V; I=0,104A. i, %	Kai U=130V; I=0,104A. e, %	Kai U=130V; I=0,104A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>11,55</b>	<b>28,23</b>	<b>9,32</b>
5	<b>3,81</b>	<b>9,66</b>	<b>1,95</b>
7	<b>0,61</b>	<b>1,44</b>	
Harmonikos eilės numeris	Kai U=174V; I=0,203A. i, %	Kai U=174V; I=0,203A. e, %	Kai U=174V; I=0,203A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>16,7</b>	<b>31,12</b>	<b>10,39</b>
5	<b>5,7</b>	<b>10,66</b>	<b>2,13</b>
7	<b>2,09</b>	<b>3,35</b>	<b>0,48</b>
Harmonikos eilės numeris	Kai U=198V; I=0,3A. i, %	Kai U=198V; I=0,3A. e, %	Kai U=198V; I=0,3A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>19,83</b>	<b>31,04</b>	<b>10,34</b>
5	<b>6,59</b>	<b>10,62</b>	<b>2,25</b>
7	<b>2,63</b>	<b>3,29</b>	<b>0,45</b>
Harmonikos eilės numeris	Kai U=220V; I=0,42A. i, %	Kai U=220V; I=0,42A. e, %	Kai U=220V; I=0,42A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>22,43</b>	<b>30,25</b>	<b>10</b>
5	<b>7,05</b>	<b>10,33</b>	<b>2,05</b>
7	<b>2,54</b>	<b>2,9</b>	<b>0,41</b>
Harmonikos eilės numeris	Kai U=242V; I=0,57A. i, %	Kai U=242V; I=0,57A. e, %	Kai U=242V; I=0,57A. Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>25,49</b>	<b>29,8</b>	<b>10</b>
5	<b>7,33</b>	<b>9,67</b>	<b>1,91</b>
7	<b>2,07</b>	<b>2,72</b>	<b>0,32</b>

- **Srauto tankio B skaičiavimas.**

36 paveiksle yra pavaizduotas transformatoriaus feromagnetinė šerdis, kuri yra pagaminta iš feromagnetinės medžiagos (elektrotechninių plieno lakštų). Sklaidos magnetinių srautų nepaisysime, tuomet magnetinis srautas nešakotinės grandinės šerdyje bus vienodas. Nagrinėjama šerdis yra iš vienodo skerspjūvio magnetolaidžio dalių.



36 pav. Feromagnetinė šerdis

- **Skaičiavimas:**
- Kadangi žinome magnetolaidžio medžiagos magnetinį srautą, o sklaidos magnetinius srautus galime paneigti, skaičiuojame taip:
- Apskaičiuojame skerspjūvio plotą:

$$S = 31\text{mm} \cdot 57\text{mm} = 1767\text{mm}^2 = 0,001767\text{m}^2.$$

- Apskaičiuojame indukciją magnetolaidžio dalyje. Kai sklaidos srautas  $\Phi_d = 0$ , magnetinis srautas  $\phi$  visose magnetolaidžio dalyse yra vienodas. Todėl grandinės magnetinę indukciją galime rasti padaliję srautą  $\Phi_{m,n}$  iš tos grandinės dalies skerspjūvio ploto  $S$ :

$$B_n = \frac{\Phi_{m,n}}{S}, \quad (46)$$

Pavyzdys:

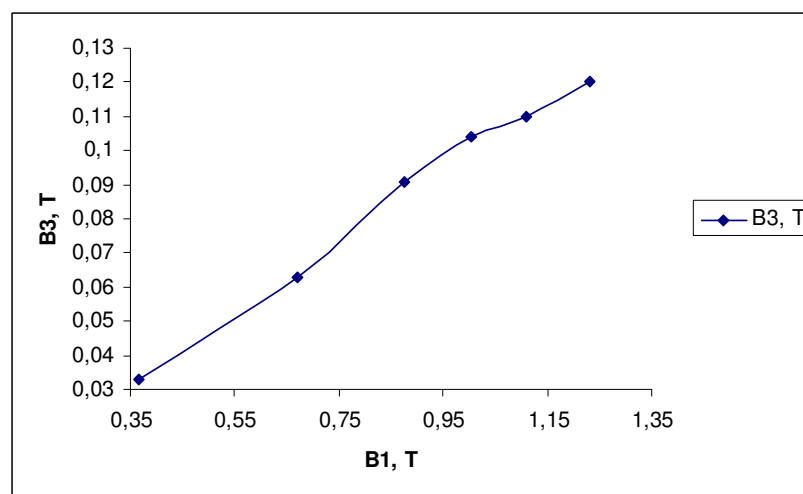
$$B_{1,U=75V} = \frac{0,000649}{0,001767} = 0,3673 \text{ T.}$$

- Analogiškai apskaičiuojamas srauto tankis kiekvienai harmonikai atskirai, prie skirtingų sąlygų. Skaičiavimo duomenys pateikti 26 lentelėje.

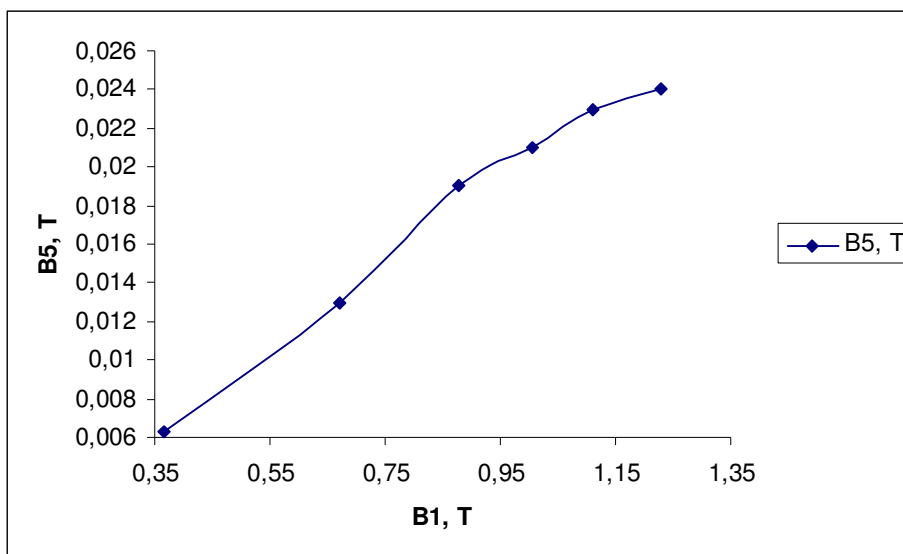
26 lentelė. Srauto tankis

Harmonikos eilės numeris	Kai U=75 V; ir I=0,04 A. B, T	Kai U=130 V; ir I=0,104 A. B, T	Kai U=174 V; ir I=0,203 A. B, T	Kai U=198 V; ir I=0,3 A. B, T	Kai U=220 V; ir I=0,42 A. B, T	Kai U=242 V; ir I=0,57 A. B, T
1	<b>0,367</b>	<b>0,67</b>	<b>0,877</b>	<b>1,005</b>	<b>1,11</b>	<b>1,23</b>
3	<b>0,033</b>	<b>0,063</b>	<b>0,091</b>	<b>0,104</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>
5	<b>0,0063</b>	<b>0,013</b>	<b>0,019</b>	<b>0,021</b>	<b>0,023</b>	<b>0,024</b>
7	<b>0,00022</b>	<b>0,00137</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,004</b>

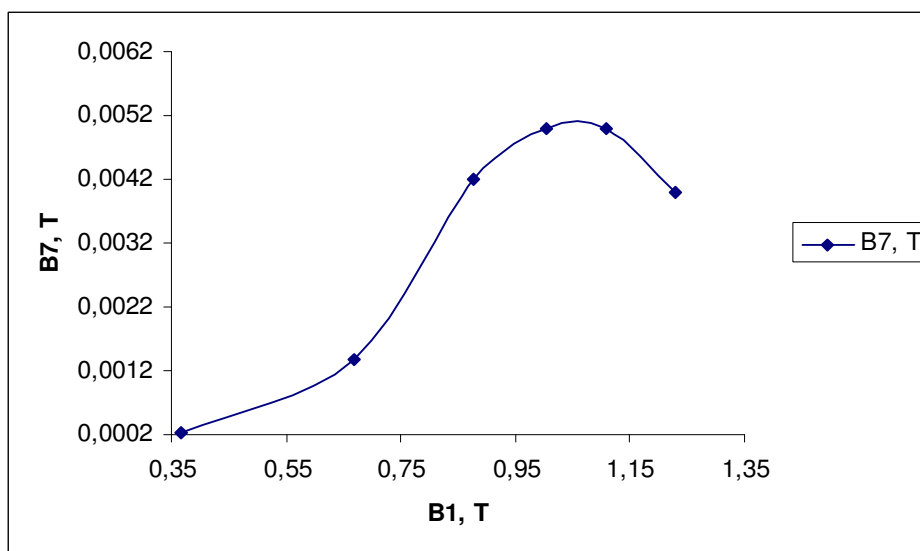
- Grafiškai pavaizduosiu  $B_3, B_5, B_7 = f(B_1)$ .



37 pav.  $B_3 = f(B_1)$



38 pav.  $B_5 = f(B_1)$



39 pav.  $B_7 = f(B_1)$

- Apskaičiuojame kiek procentų sudaro aukštesnės eilės harmonikos nuo pirmosios harmonikos:

$$\xi_B = \frac{B_{n=3;5;7}}{B_1} \cdot 100\%. \quad (47)$$

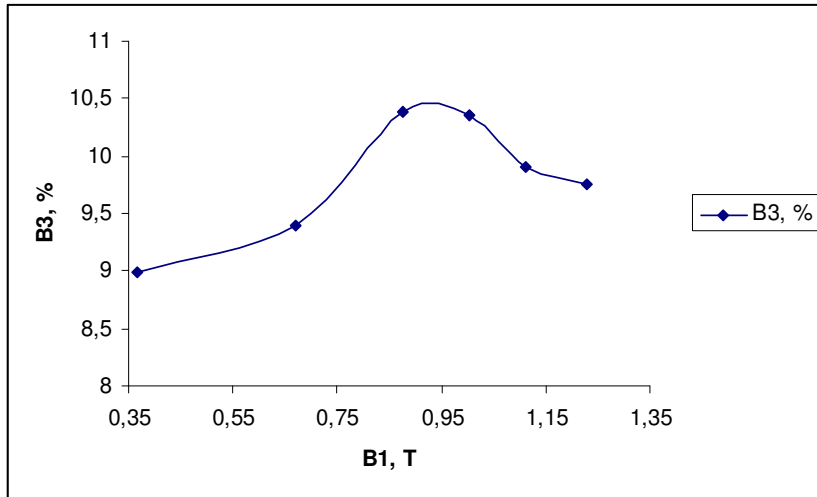
- Duomenis pateikti 27 lentelėje.

27 lentelė. Procentinė srauto tankio išraiška

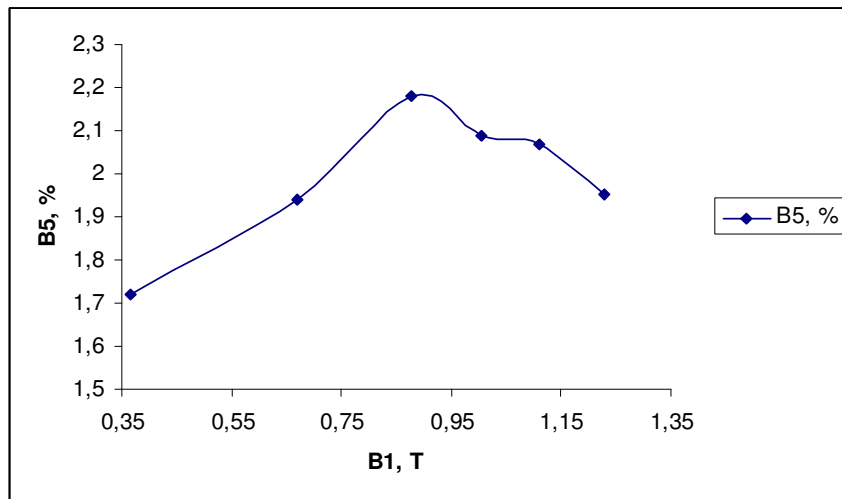
Harmonikos eilės	Kai U=75 V; ir I=0,04 A.	Kai U=130 V; ir I=0,104 A.	Kai U=174 V; ir I=0,203 A.	Kai U=198 V; ir I=0,3 A.	Kai U=220 V; ir I=0,42 A.	Kai U=242 V; ir I=0,57 A.

numeris	B, %	B, %	B, %	B, %	B, %	B, %
1	100	100	100	100	100	100
3	8,99	9,4	10,38	10,35	9,91	9,76
5	1,72	1,94	2,18	2,09	2,07	1,95
7	0,06	0,2	0,48	0,5	0,45	0,33

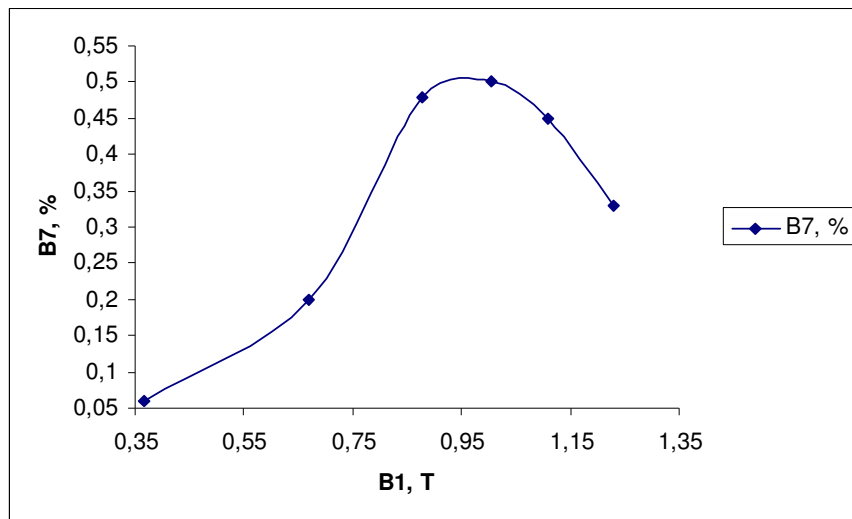
- Pavaizduojame 27 lentelę grafiškai  $B_3\%, B_5\%, B_7\% = f(B_1)$ .



40 pav. Trečios harmonikos indukcijos procentinė priklausomybė nuo  $B_1$



41 pav. Penktos harmonikos indukcijos procentinė priklausomybė nuo  $B_1$



42 pav. Septintos harmonikos indukcijos procentinė priklausomybė nuo  $B_1$

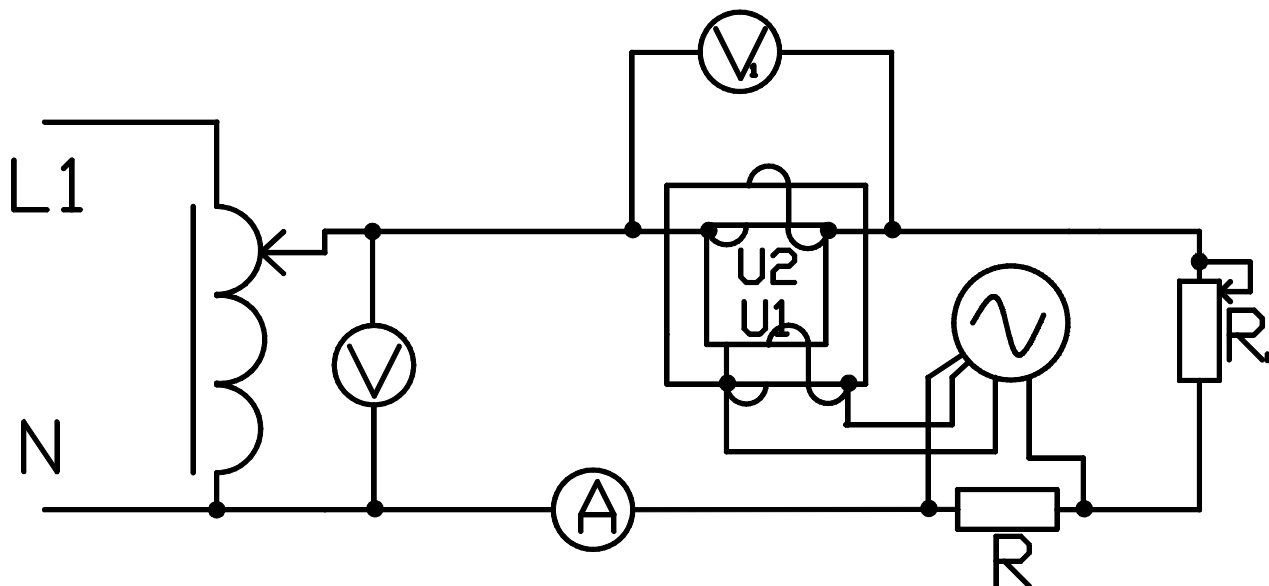
### 3.2 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius maitinamas pastovaus dydžio efektine įtampa

- Šio eksperimento tikslas:

**Palaikant pastovaus dydžio efektinę įtampą ant transformatoriaus apvijos, keisti įvedama aktyvios varžos dydį ir ištirti srovės, elektrovaros ir magnetinio srauto harmonikų dydžių kitimą.**

Grandinės schema pavaizduota 43 pav. Oscilografas analogiškai kaip ir prieš tai prijungtas prie transformatoriaus antrinės grandinės ir prie varžos  $R$ , kuria mes žinome  $R=0,25\Omega$ .





43 pav. Matuojamos grandinės schema

**Darbo eiga:**

Atlikta 12 matavimų, palaikant ant transformatoriaus apvijos  $U_1 \cong 40V$ .

7. **Pirmas matavimas, reostatas išvestas:** Kai  $R=0 \Omega$ ; ir  $I=3,3 A$ .

- Srovės kreivę  $i = f(t)$ , skaidome harmonikomis, kaip 3.1 skyriuje:
- Periodas susideda iš 401 laiko ir srovės momentinių reikšmių, laiko žingsnis  $t = 0,00005 s$ .

28 lentelė. Srovės ir laiko momentinės reikšmės per periodą

Eil. Nr.	t, s	i, A
1	-0,005	5,854563
2	-0,00495	5,881906
---	---	---
400	0,01495	5,799875
401	0,015	5,862375

- Apskaičiuojame kampą alfa  $\alpha_{1..401}$ , rad.

$$\alpha_{1..401} = \frac{t_{1..401} \cdot \pi}{0,01}, \quad (48)$$

- Išskaidome srovės kreivę į sinusines ir kosinusines harmonikų dedamąsias

29 lentelė. Skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	$\alpha$ , rad	1 harm.		3 harm.		5 harm.		7 harm.	
		$i_{I.sin.harm}$ , A	$i_{I.cos.harm}$ , A	$i_{III.sin.harm}$ , A	$i_{III.cos.harm}$ , A	$i_{V.sin.harm}$ , A	$i_{V.cos.harm}$ , A	$i_{VII.sin.harm}$ , A	$i_{VII.cos.harm}$ , A
1	-1,57	-5,86	$2,2 \cdot 10^{-5}$	5,86	$6,5 \cdot 10^{-5}$	-5,86	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	5,86	$1,5 \cdot 10^{-4}$
2	-1,56	-5,9	0,09	5,9	-0,28	-5,86	0,46	5,85	-0,65
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
400	4,7	-5,8	-0,09	5,8	0,27	-5,78	-0,46	5,76	0,64
401	4,71	-5,86	$1,15 \cdot 10^{-7}$	5,86	$-3,45 \cdot 10^{-7}$	-5,86	$5,75 \cdot 10^{-7}$	5,86	$-8,1 \cdot 10^{-7}$
$\Sigma$	---	-860,793	11,770531	296,60753	-95,13348	-36,4397	14,40059	8,090514	-1,5443319

- Apskaičiuojame koeficientus, kurie bus reikalingi skaičiuojant kiekvienos harmonikos amplitudę, pagal (31), (32) formules:

Rezultatai pateikti 30 lentelėje.

30 lentelė. Koeficiento K reikšmės.

$K_{I.sin.harm}$ , A	$K_{I.cos.harm}$ , A	$K_{III.sin.harm}$ , A	$K_{III.cos.harm}$ , A	$K_{V.sin.harm}$ , A	$K_{V.cos.harm}$ , A	$K_{VII.sin.harm}$ , A	$K_{VII.cos.harm}$ , A
-4,29	0,059	1,48	-0,47	-0,182	0,072	0,04	-0,0077

Srovės kreivių harmonikų amplitudės pateiktos 31 lentelėje.

31 lentelė. Srovės kreivės harmonikų amplitudės.

$I_{m.I.harm}$ , A	$I_{m.III.harm}$ , A	$I_{m.V.harm}$ , A	$I_{m.VII.harm}$ , A
4,29	1,55	0,195	0,041

Fazės kampo skaičiavimo duomenis pateikti 32 lentelėje.

32 lentelė. Harmonikų fazės kampas, radianais.

$\psi_{I.harm}$	$\psi_{III.harm}$	$\psi_{V.harm}$	$\psi_{VII.harm}$
-0,014	-0,31	-0,38	-0,189

- Perskaičiuojame radianus į laipsnius:

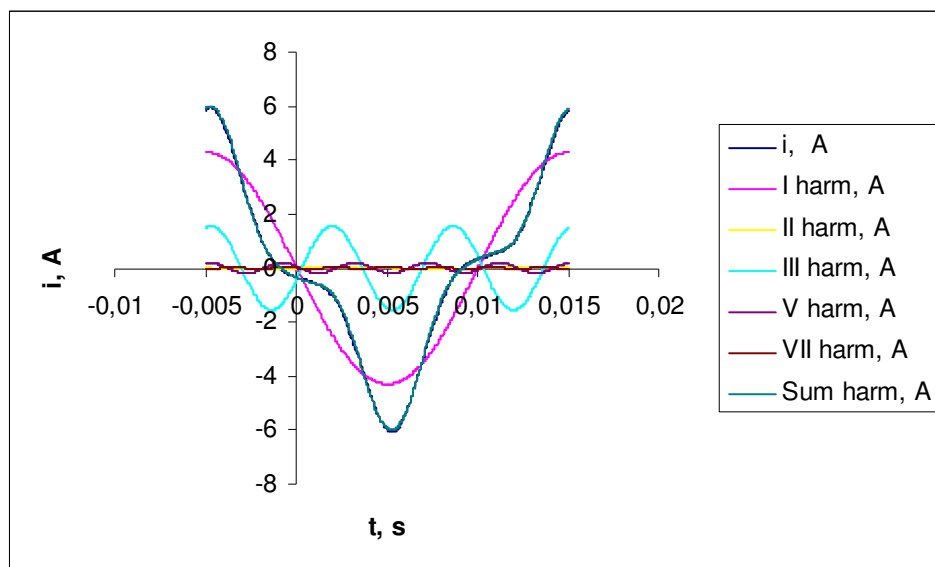
33 lentelė. Harmonikų fazės kampas, laipsniais

$\varphi_{I.harm}$	$\varphi_{III.harm}$	$\varphi_{V.harm}$	$\varphi_{VII.harm}$
$-0,78^0$	$-17,78^0$	$-21,56^0$	$-10,81^0$

- Kreives išskaidome harmonikomis:

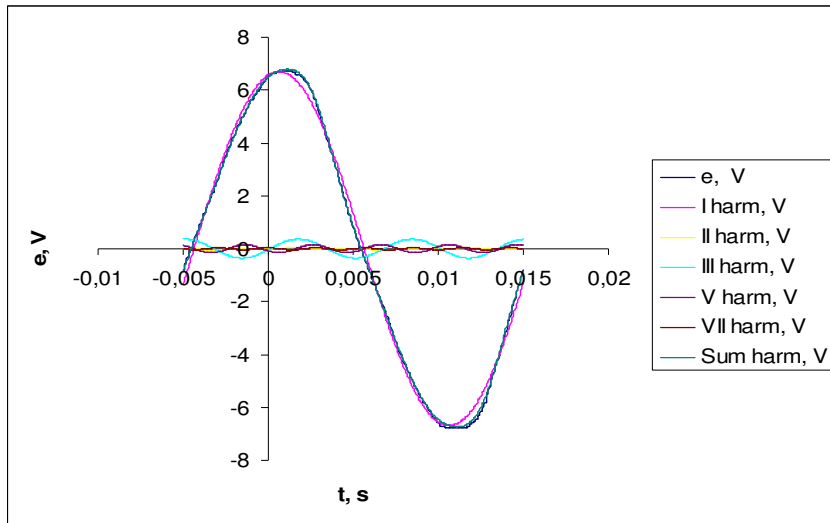
$$i = 4,29 \sin(\omega t - 0,78^\circ) + 0,0225 \sin(2\omega t - 11,84^\circ) + 1,55 \sin(3\omega t - 17,78^\circ) + 0,195 \sin(5\omega t - 21,56^\circ) + 0,041 \sin(7\omega t - 10,81^\circ).A$$

Kreivė išskaidyta harmonikomis pavaizduota 2 pav.



44 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Analogiškai atliekame skaičiavimus elektrovarai, kurios kreivė išskaidyta harmonikomis pavaizduota 45 pav.

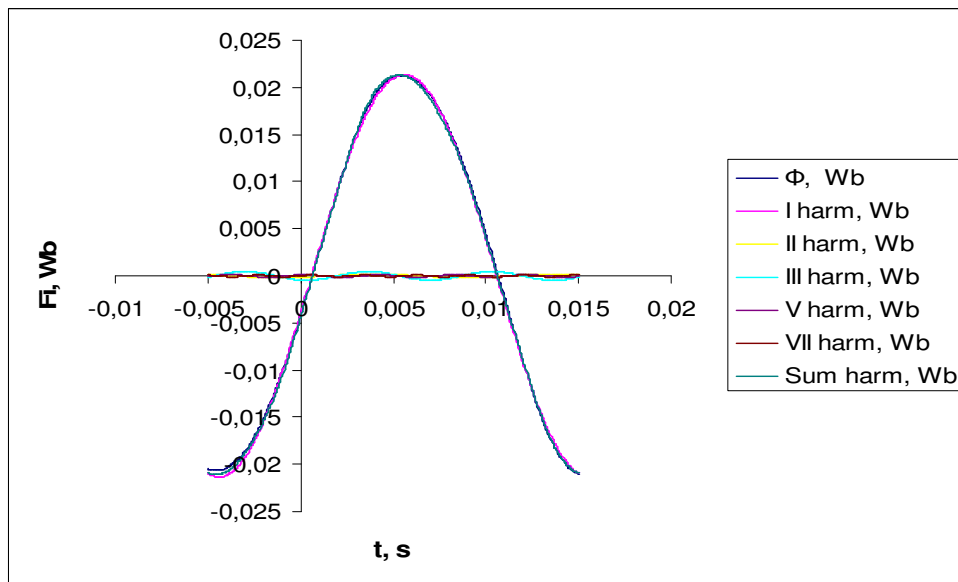


45 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 6,69 \sin(\omega t + 78,53^\circ) + 0,026 \sin(2\omega t + 26,58^\circ) + 0,36 \sin(3\omega t - 6,58^\circ) + 0,15 \sin(5\omega t + 32,52^\circ) + 0,034 \sin(7\omega t - 85,43^\circ).V$$

- Srauto  $\phi$  skaidymas harmonikomis atliekamas analogiškai kaip ir prieš tai



46 pav. Srauto kreivė ir jos harmonikos

- Magnetinio srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 168,53^\circ) + 4,1 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 116,58^\circ) + 3,8 \cdot 10^{-5} \sin(3\omega t + 83,42^\circ) + 9,4 \cdot 10^{-6} \sin(5\omega t + 122,52^\circ) + 1,6 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 4,57^\circ)Wb.$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės

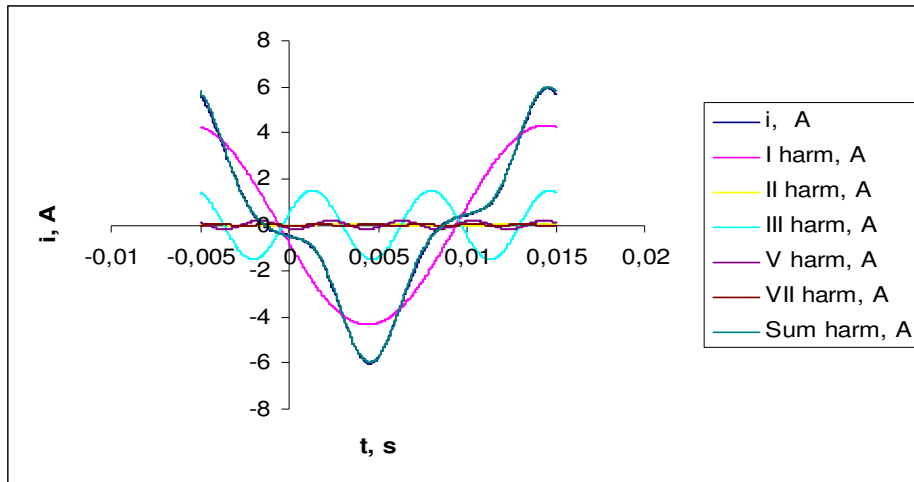
**harmonikos, pagal (45) formulę:**

Skaičiavimo rezultatai pateikti 34 lentelėje.

34 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 0\Omega$  ir  $I = 3,3A$

Harmonikos eilės numeris	$i, \%$	$e, \%$	$\phi, \%$
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>36</b>	<b>5,38</b>	<b>2,2</b>
5	<b>4,55</b>	<b>2,24</b>	<b>0,57</b>
7	<b>0,96</b>	<b>0,51</b>	<b>0,44</b>

**8. Antras matavimas, įvedama varža. Kai  $R_r=6,06\ \Omega$ ; ir  $I=3,4\ A$ .**

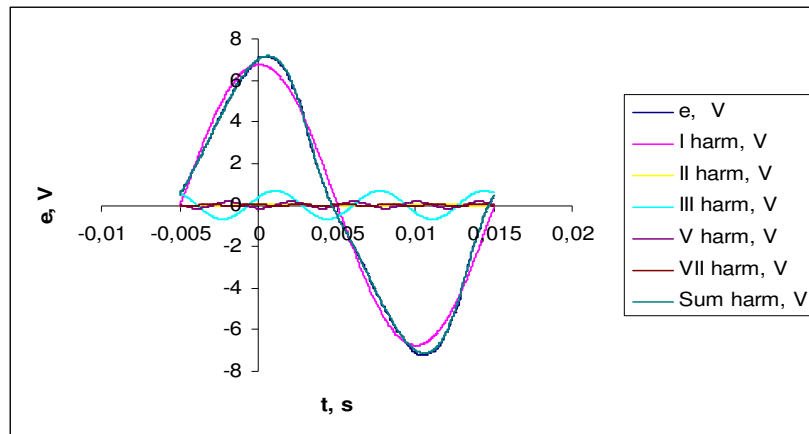


47 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$i = 4,34 \sin(\omega t - 10,33^\circ) + 0,02 \sin(2\omega t - 57,19^\circ) + 1,5 \sin(3\omega t + 18,25^\circ) + 0,18 \sin(5\omega t - 57,4^\circ) + 0,029 \sin(7\omega t - 51,94^\circ) A.$$

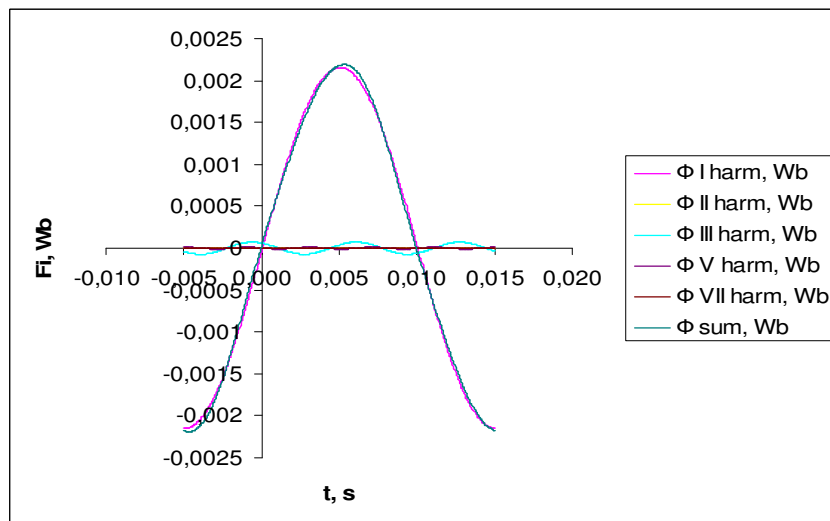
- Taip pat atliekame skaičiavimus elektrovarai ir magnetiniam srautui.



48 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,76 \sin(\omega t + 88,9^\circ) + 0,02 \sin(2\omega t + 59,54^\circ) + 0,68 \sin(3\omega t + 31,86^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 79,37^\circ) + 0,042 \sin(7\omega t + 63,39^\circ) \text{ V.}$$



49 pav. Magnetinio srauto kreivė ir jos harmonikos

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2,2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 178,9^\circ) + 3,1 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 149,54^\circ) + 7,3 \cdot 10^{-5} \sin(3\omega t + 121,86^\circ) + 0,1 \cdot 10^{-4} \sin(5\omega t + 10,63^\circ) + 1,9 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 153,39^\circ) \text{ Wb.}$$

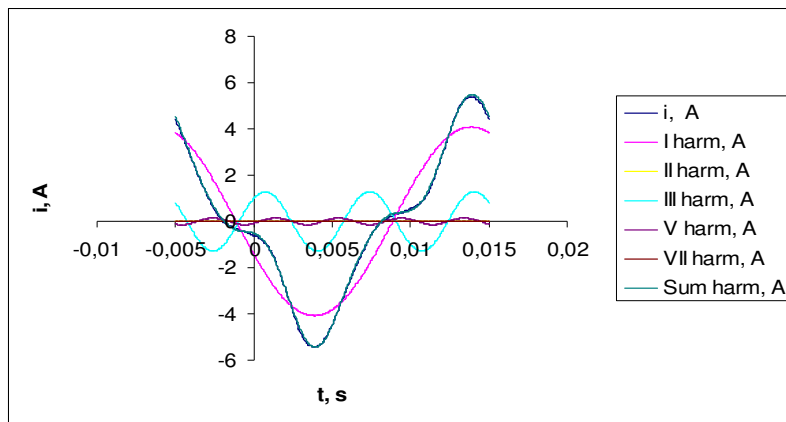
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

35 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 9,38\Omega$  ir  $I = 3,4\text{A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %

1	100	100	100
3	34,56	10,1	2,77
5	4,15	2,37	0,19
7	0,67	0,62	0,34

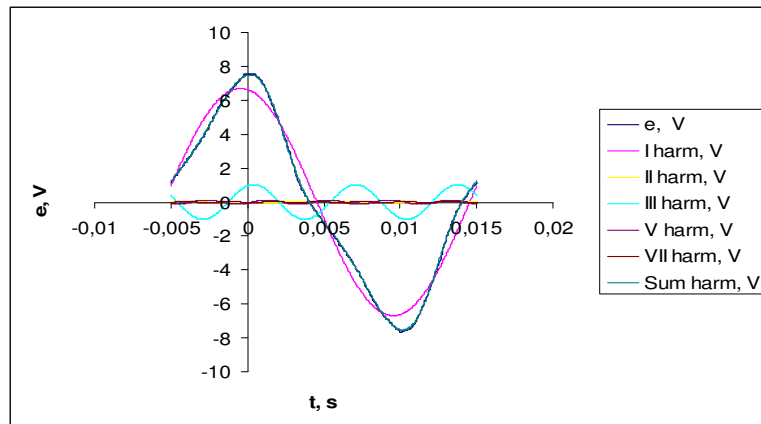
- Trečias matavimas. Kai  $R_r=9,38 \Omega$ ; ir  $I=3,2 \text{ A}$ .



50 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

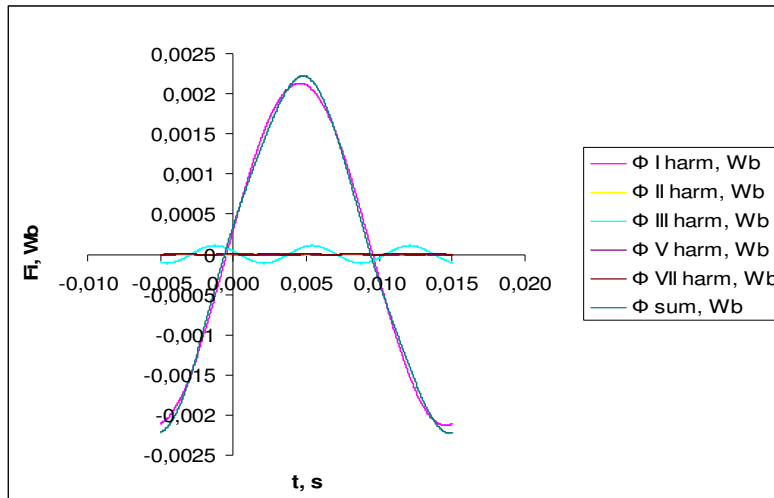
$$i = 4,08 \sin(\omega t - 20,46^\circ) + 0,025 \sin(2\omega t - 75,75^\circ) + 1,23 \sin(3\omega t + 50,85^\circ) + 0,14 \sin(5\omega t - 36,95^\circ) + 0,023 \sin(7\omega t + 89,3^\circ) \text{ A}$$



51 pav. Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,69 \sin(\omega t + 81,84^\circ) + 0,016 \sin(2\omega t - 86,18^\circ) + 1,03 \sin(3\omega t + 67,5^\circ) + 0,13 \sin(5\omega t - 27,03^\circ) + 0,023 \sin(7\omega t - 51,9^\circ) \text{ V}$$



52 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 171,84^{\circ}) + 2,5 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 3,82^{\circ}) + 1,2 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 157,5^{\circ}) + 8,2 \cdot 10^{-6} \sin(5\omega t + 62,97^{\circ}) + 1 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 38,1^{\circ}) \text{ Wb.}$$

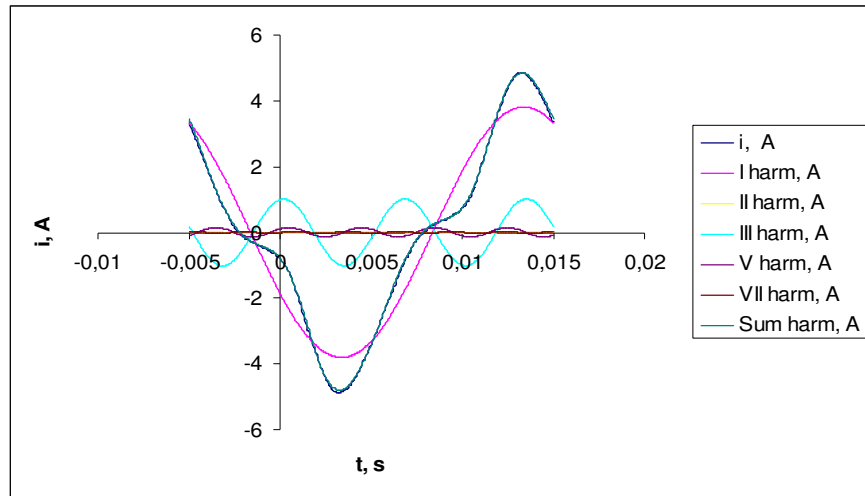
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

36 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 9,38\Omega$  ir  $I = 3,2\text{A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>30,15</b>	<b>15,4</b>	<b>4,76</b>
5	<b>3,43</b>	<b>1,94</b>	<b>0,39</b>
7	<b>0,58</b>	<b>0,34</b>	<b>0,52</b>

- Ketvirtas matavimas. Kai  $R_r=15,22 \Omega$ ; ir  $I=2,85 \text{ A}$ .

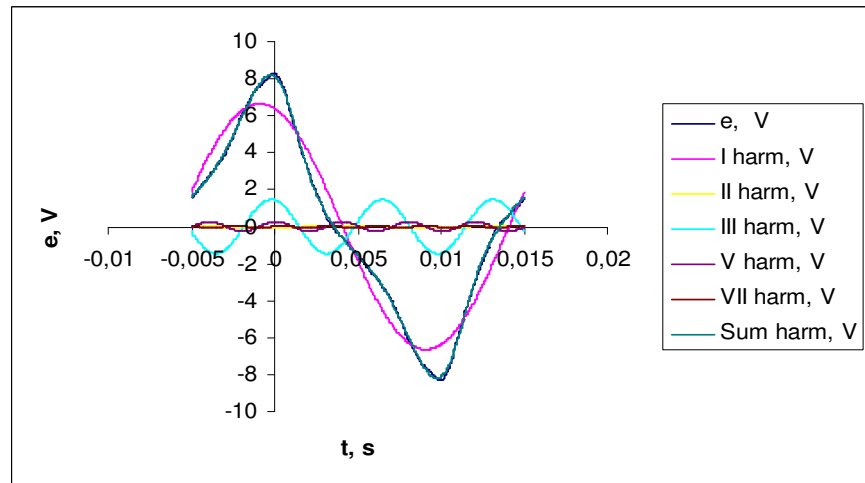




53 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

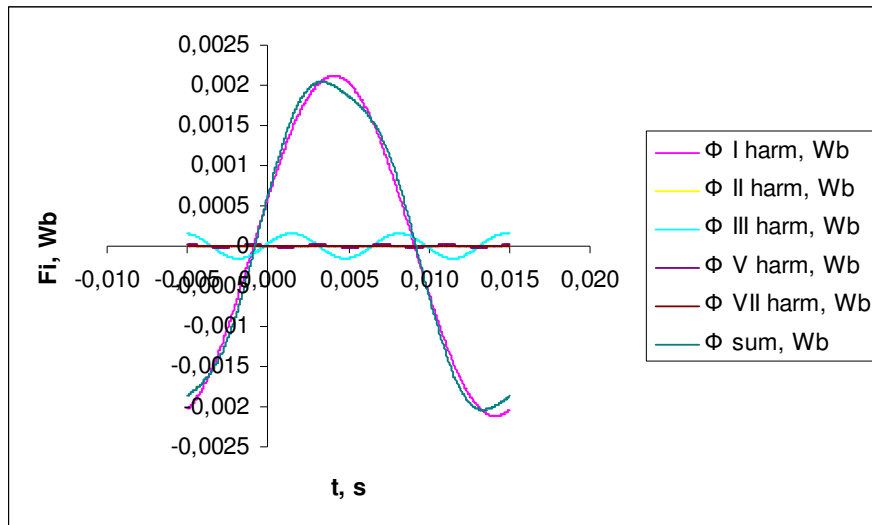
$$i = 3,81 \sin(\omega t - 29,20^\circ) + 0,02 \sin(2\omega t - 66,95^\circ) + 1,02 \sin(3\omega t + 79,7^\circ) + 0,14 \sin(5\omega t + 48,14^\circ) + 0,03 \sin(7\omega t - 18,87^\circ) A.$$



54 pav. Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,64 \sin(\omega t + 73,93^\circ) + 0,016 \sin(2\omega t - 64,19^\circ) + 1,46 \sin(3\omega t + 79,78^\circ) + 0,26 \sin(5\omega t + 82,19^\circ) + 0,07 \sin(7\omega t + 31,41^\circ) V.$$



55 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

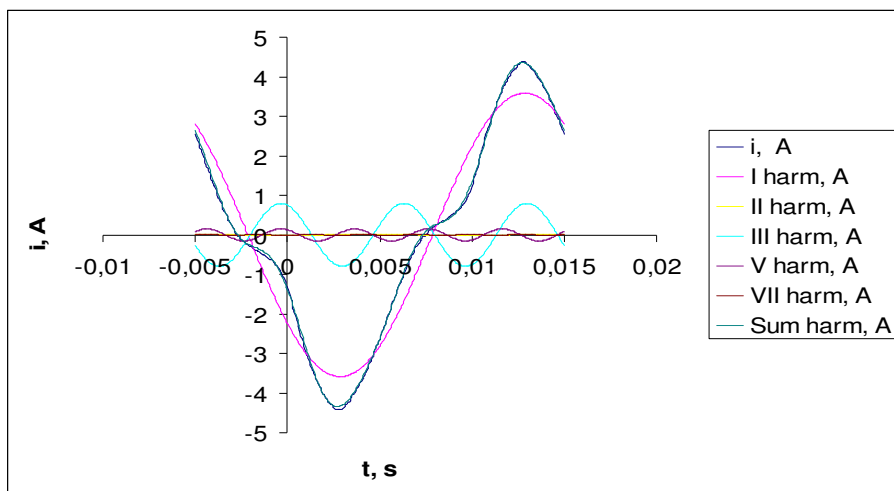
$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 163,93^{\circ}) + 2,5 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 25,81^{\circ}) + 1,6 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 169,78^{\circ}) + 1,6 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 172,19^{\circ}) + 0,3 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 121,41^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

37 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 15,22 \Omega$ ,  $I = 2,85 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>26,77</b>	<b>21,99</b>	<b>7,14</b>
5	<b>3,68</b>	<b>3,92</b>	<b>1,43</b>
7	<b>0,79</b>	<b>1,05</b>	<b>0,42</b>

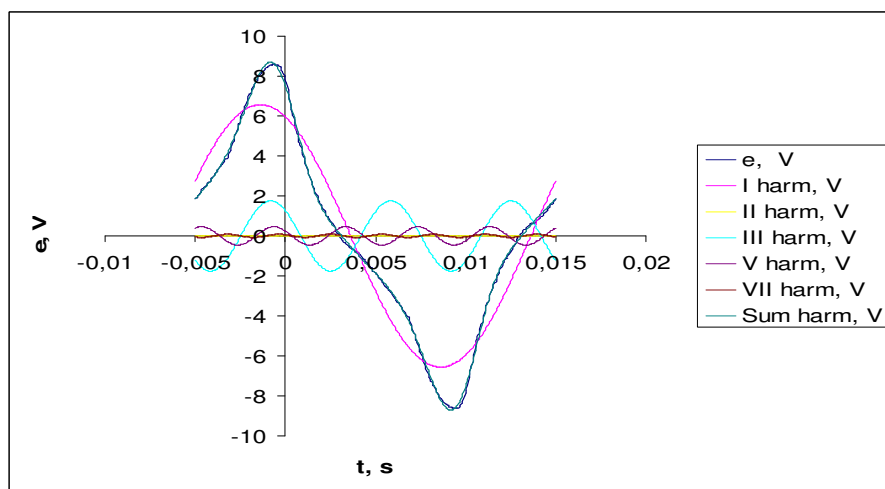
- **Penktas matavimas. Kai  $R_r = 20,8 \Omega$ ; ir  $I = 2,7 \text{ A}$ .**



56 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

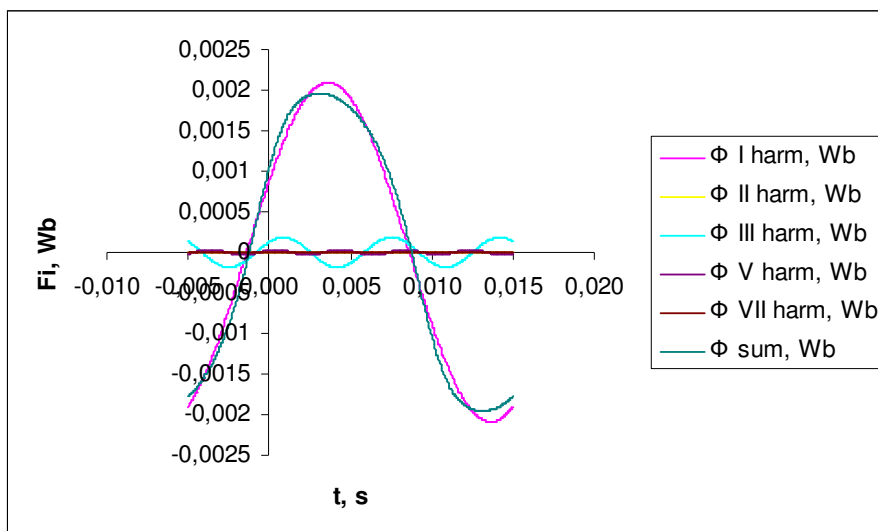
$$i = 3,59 \sin(\omega t - 38,52^\circ) + 0,015 \sin(2\omega t - 74,36^\circ) + 0,8 \sin(3\omega t + 70,86^\circ) + 0,15 \sin(5\omega t + 57,53^\circ) + 0,016 \sin(7\omega t - 69,93^\circ) \text{ A.}$$



57 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,56 \sin(\omega t + 65,22^\circ) + 0,0098 \sin(2\omega t - 58,43^\circ) + 1,76 \sin(3\omega t + 46^\circ) + 0,46 \sin(5\omega t + 32,03^\circ) + 0,079 \sin(7\omega t + 45,53^\circ) \text{ V.}$$



58 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

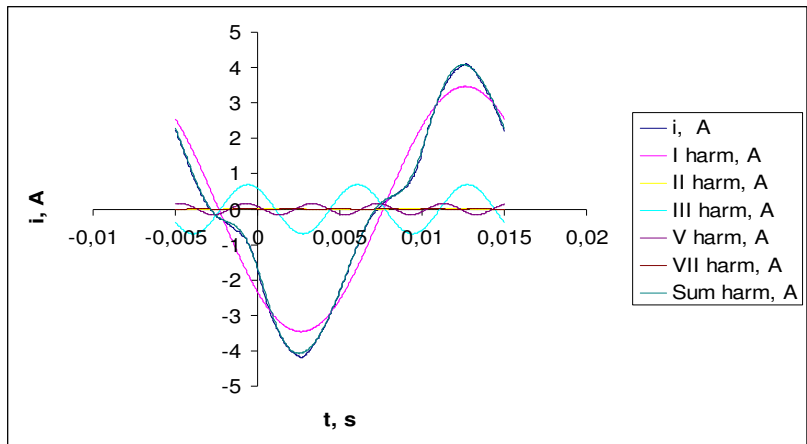
$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 155,22^\circ) + 1,6 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 31,57^\circ) + 1,9 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 136^\circ) + 0,3 \cdot 10^{-4} \sin(5\omega t + 122,02^\circ) + 3,6 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 135,53^\circ) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

38 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 20,8 \Omega$ ,  $I = 2,7 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>22,28</b>	<b>26,83</b>	<b>8,57</b>
5	<b>4,18</b>	<b>7,01</b>	<b>1,91</b>
7	<b>0,45</b>	<b>1,2</b>	<b>0,32</b>

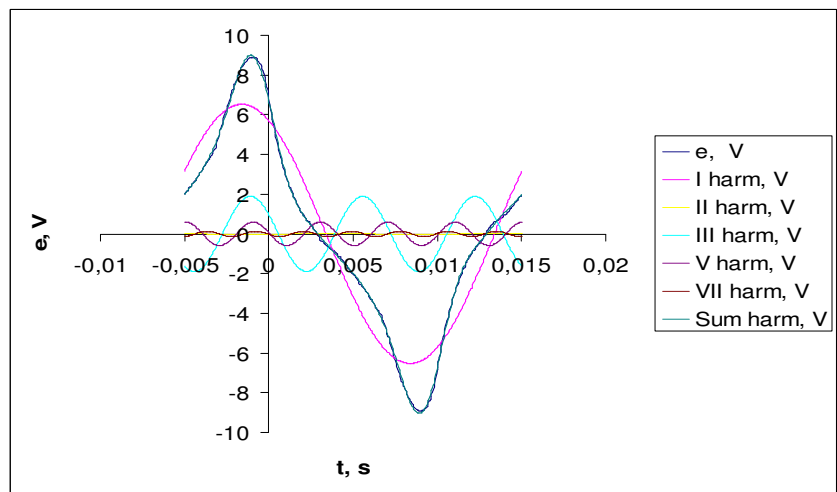
- Šeštas matavimas. Kai  $R_r = 25,51 \Omega$ ; ir  $I = 2,625 \text{ A}$ .



59 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

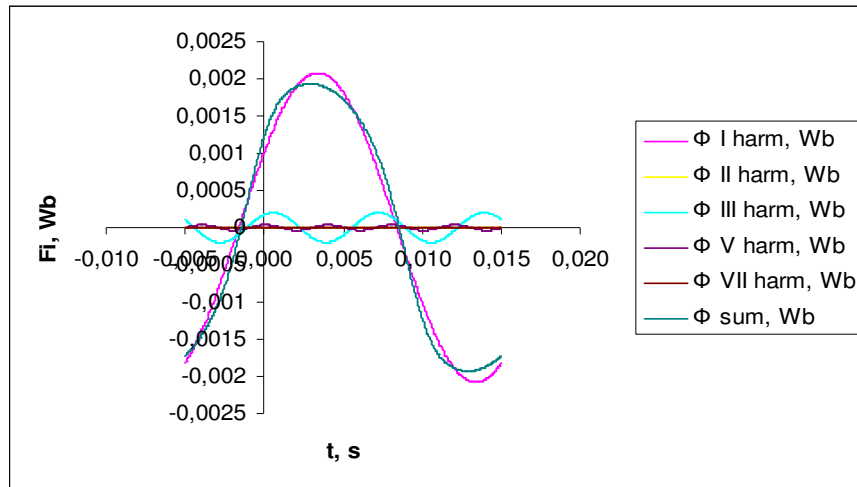
$$i = 3,46 \sin(\omega t - 42,7^\circ) + 0,009 \sin(2\omega t + 74,55^\circ) + 0,7 \sin(3\omega t + 57,88^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t + 27,12^\circ) + 0,025 \sin(7\omega t - 7,64^\circ) A.$$



60 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,53 \sin(\omega t + 61,05^\circ) + 0,014 \sin(2\omega t - 47,87^\circ) + 1,89 \sin(3\omega t + 30,70^\circ) + 0,59 \sin(5\omega t + 5,39^\circ) + 0,13 \sin(7\omega t - 10,04^\circ) V.$$



61 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

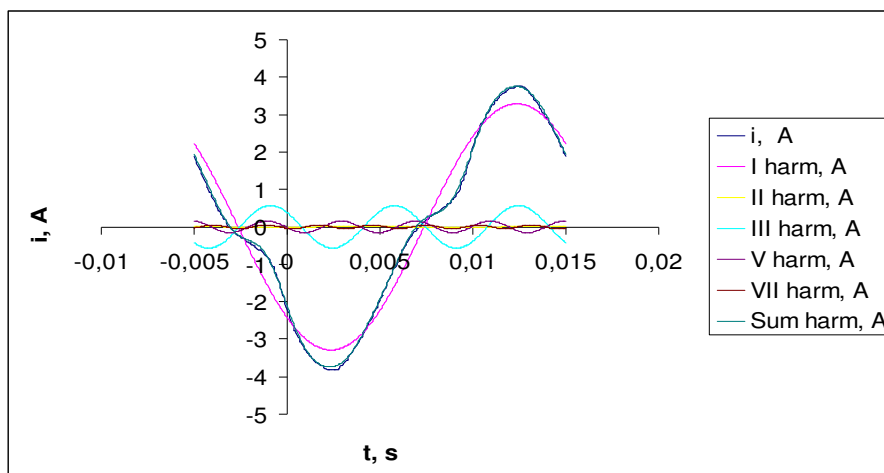
$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 151,05^\circ) + 2,2 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t - 42,13^\circ) + 0,2 \cdot 10^{-3} \sin(3\omega t + 120,7^\circ) + 3,8 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 95,39^\circ) + 6,1 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t - 79,96^\circ) \text{ Wb.}$$

- Suskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

39 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 25,5 \Omega$ ,  $I = 2,625 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>20,23</b>	<b>28,94</b>	<b>9,52</b>
5	<b>4,62</b>	<b>9,04</b>	<b>1,91</b>
7	<b>0,72</b>	<b>1,99</b>	<b>0,52</b>

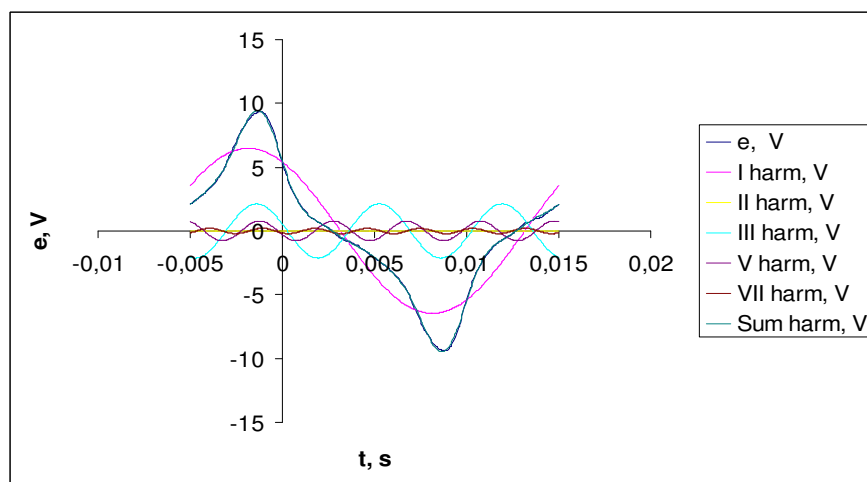
- **Septintas bandymas. Kai  $R_r=31,3 \Omega$ ; ir  $I=2,45 \text{ A}$ .**



62 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

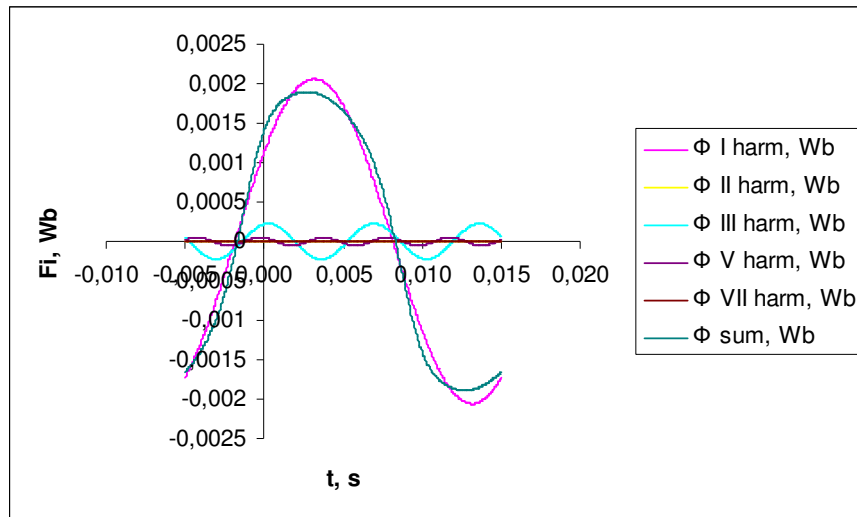
$$i = 3,29 \sin(\omega t - 47,39^\circ) + 0,0097 \sin(2\omega t - 56,19^\circ) + 0,57 \sin(3\omega t + 42,15^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 6,78^\circ) + 0,05 \sin(7\omega t - 51,96^\circ) A.$$



63 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,46 \sin(\omega t + 56,73^\circ) + 0,022 \sin(2\omega t - 69,65^\circ) + 2,12 \sin(3\omega t + 14,52^\circ) + 0,78 \sin(5\omega t - 22,52^\circ) + 0,21 \sin(7\omega t - 47,61^\circ) V.$$



64 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 146,73^\circ) + 3,4 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 20,35^\circ) + 2,3 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 104,52^\circ) + 0,5 \cdot 10^{-4} \sin(5\omega t + 67,48^\circ) + 9,5 \cdot 10^{-6} \sin(\omega t + 42,39^\circ) \text{ Wb.}$$

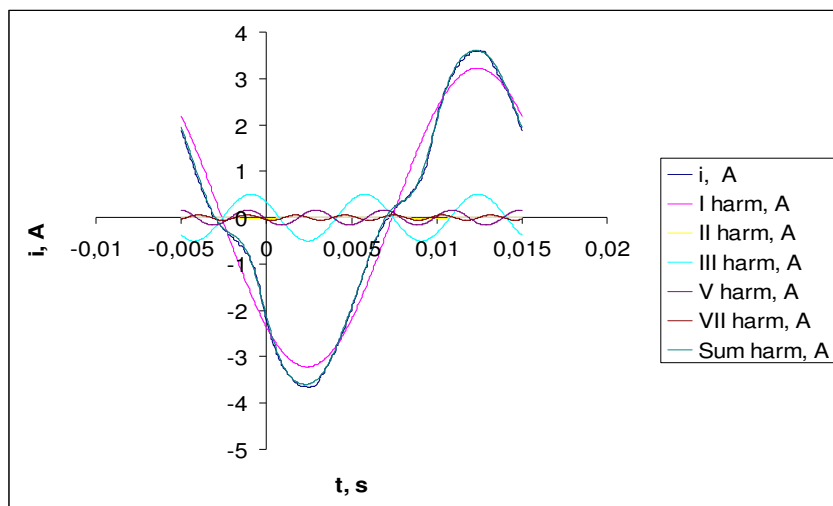
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

40 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 31,3\Omega$ ,  $I = 2,45\text{A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	Φ, %
1	100	100	100
3	17,33	32,82	10,48
5	4,86	12,07	2,29
7	1,52	3,25	0,76

- **Aštuntas matavimas. Kai  $R_r=36,67\ \Omega$ ; ir  $I=2,35\ \text{A}$ .**

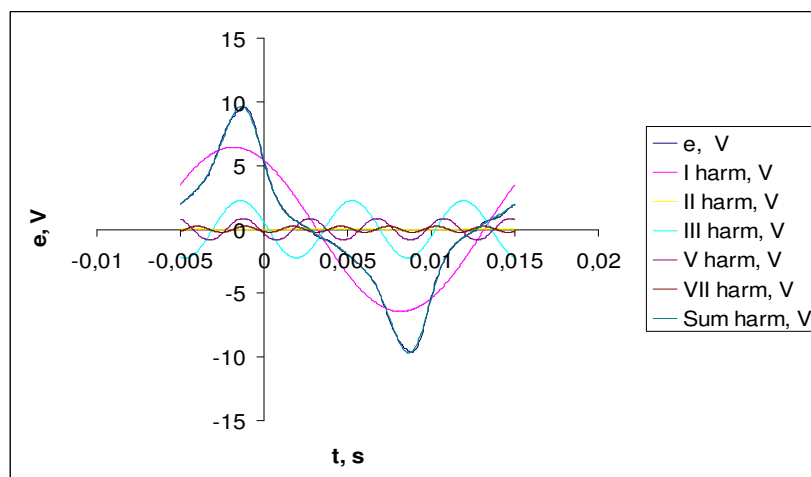




65 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

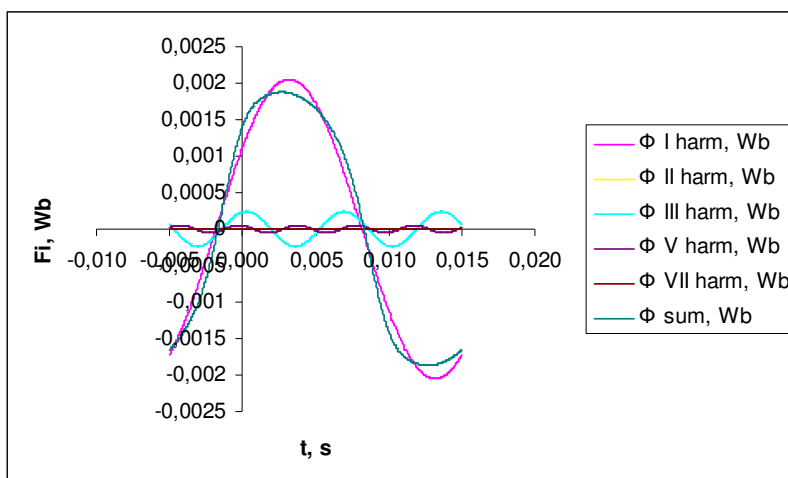
$$i = 3,22 \sin(\omega t - 47,14^\circ) + 0,01 \sin(2\omega t - 73,07^\circ) + 0,5 \sin(3\omega t + 41,39^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 9,98^\circ) + 0,06 \sin(7\omega t - 49,82^\circ) \text{ A.}$$



66 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 6,44 \sin(\omega t + 57,06^\circ) + 0,017 \sin(2\omega t - 67,23^\circ) + 2,25 \sin(3\omega t + 14,04^\circ) + 0,85 \sin(5\omega t - 22,74^\circ) + 0,23 \sin(7\omega t - 52,12^\circ) \text{ V.}$$



67 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

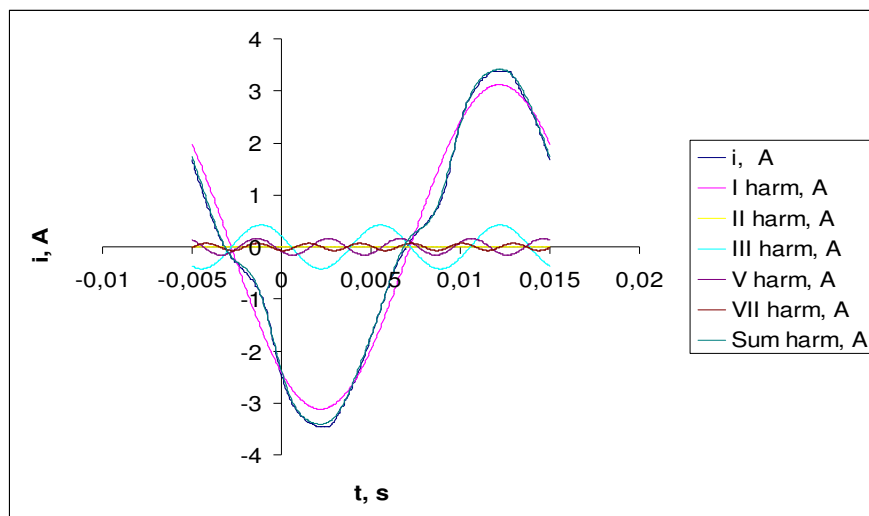
$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 147,06^\circ) + 2,7 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 22,77^\circ) + 2,4 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 104,04^\circ) + 5,4 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 67,26^\circ) + 1,1 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 37,88^\circ) \text{ Wb.}$$

- Suskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

41 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 36,67 \Omega$ ,  $I = 2,35 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>15,53</b>	<b>34,94</b>	<b>11,43</b>
5	<b>4,97</b>	<b>13,2</b>	<b>2,52</b>
7	<b>1,86</b>	<b>3,57</b>	<b>0,86</b>

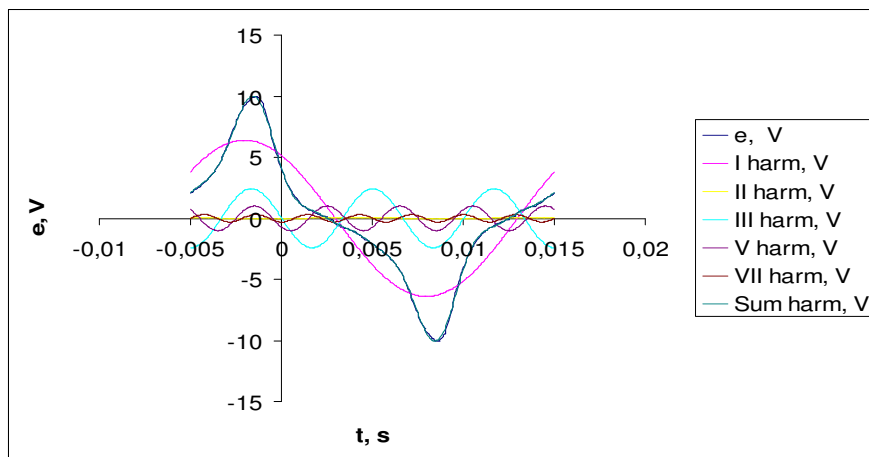
- **Devintas matavimas. Kai  $R_r=42,21 \Omega$ ; ir  $I=2,3 \text{ A}$ .**



68 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

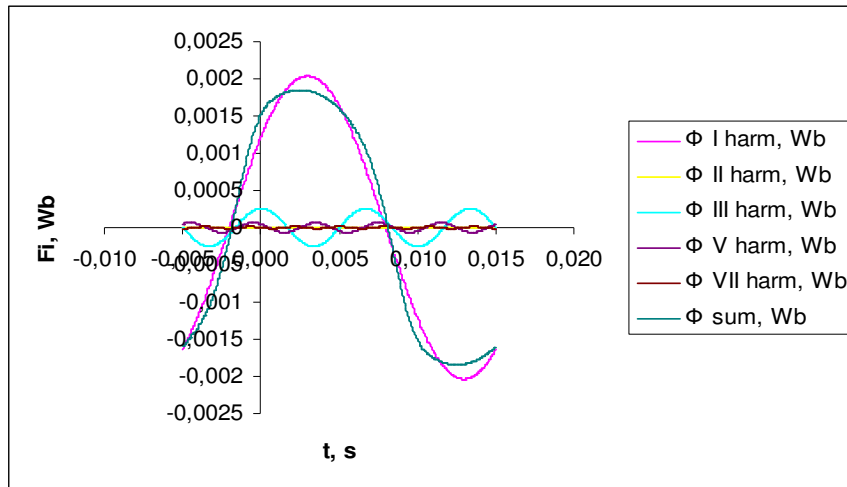
$$i = 3,12 \sin(\omega t - 50,72^\circ) + 0,0075 \sin(2\omega t - 76,92^\circ) + 0,42 \sin(3\omega t + 29,21^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t - 33,52^\circ) + 0,07 \sin(7\omega t - 77,76^\circ) \text{ A.}$$



69 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,39 \sin(\omega t + 53,52^\circ) + 0,018 \sin(2\omega t - 57,47^\circ) + 2,41 \sin(3\omega t + 1,33^\circ) + 1,01 \sin(5\omega t - 44,54^\circ) + 0,31 \sin(7\omega t - 86,49^\circ) \text{ V.}$$



70 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

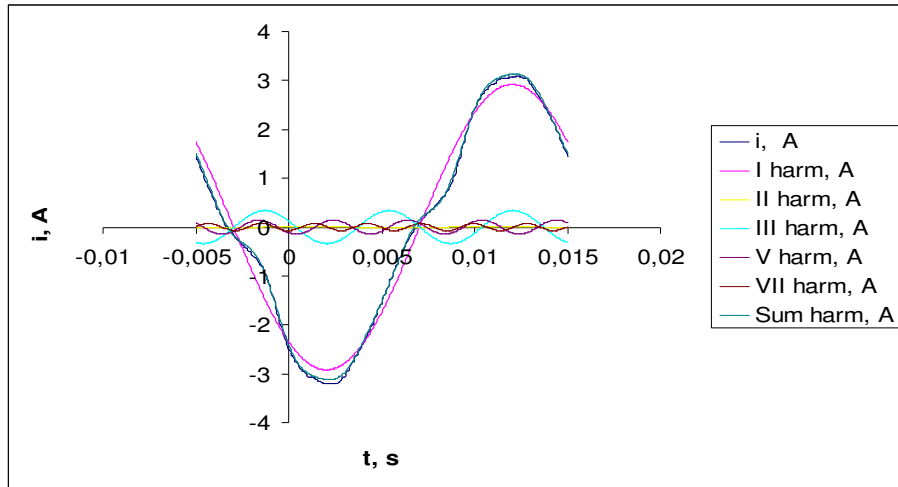
$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 143,52^{\circ}) + 2,9 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 32,53^{\circ}) + 2,6 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 91,33^{\circ}) + 6,4 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 45,46^{\circ}) + 1,4 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 3,51^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

42 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 42,21 \Omega$ ,  $I = 2,3 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	$i$ , %	$e$ , %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>13,46</b>	<b>37,72</b>	<b>12,5</b>
5	<b>5,13</b>	<b>15,81</b>	<b>3</b>
7	<b>2,24</b>	<b>4,85</b>	<b>1,1</b>

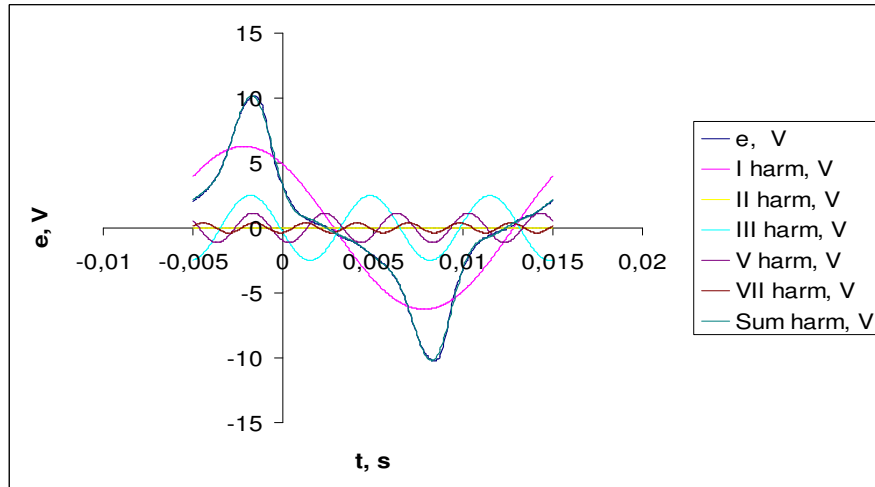
- **Dešimtas matavimas. Kai  $R_r = 52,37 \Omega$ ; ir  $I = 2,14 \text{ A}$ .**



71 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

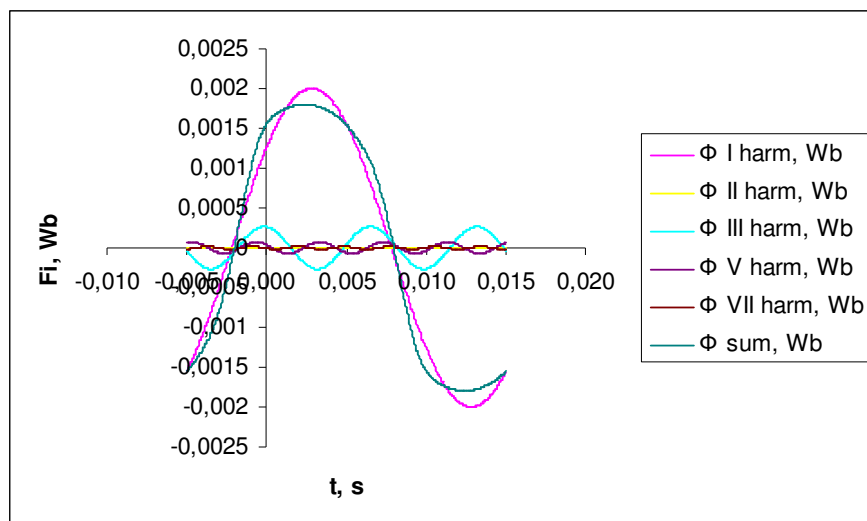
$$i = 2,92 \sin(\omega t - 53,41^\circ) + 0,0078 \sin(2\omega t + 50,62^\circ) + 0,34 \sin(3\omega t + 21,08^\circ) + 0,15 \sin(5\omega t - 53,92^\circ) + 0,074 \sin(7\omega t - 84,18^\circ) \text{ A.}$$



72 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 6,28 \sin(\omega t + 51,01^\circ) + 0,014 \sin(2\omega t - 39,29^\circ) + 2,5 \sin(3\omega t - 8,34^\circ) + 1,13 \sin(5\omega t - 60,34^\circ) + 0,38 \sin(7\omega t - 69,63^\circ) \text{ V.}$$



73 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

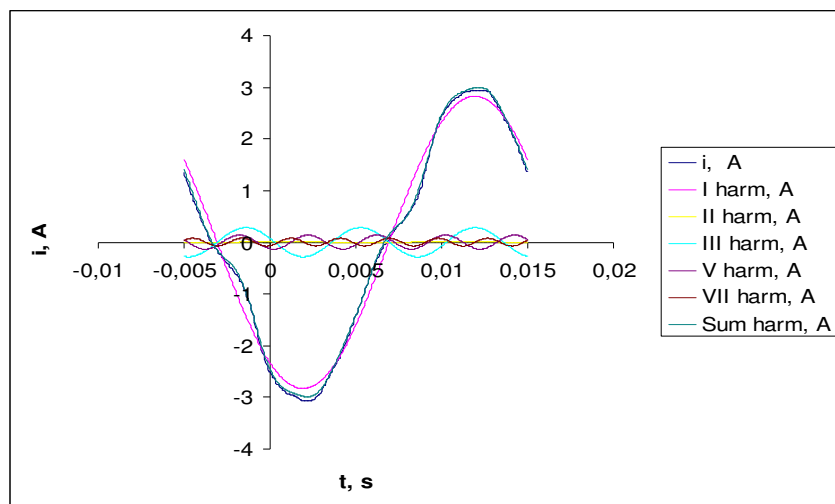
$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 141,01^\circ) + 2,2 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 50,71^\circ) + 2,7 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 81,66^\circ) + 7,2 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 29,66^\circ) + 1,7 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 20,37^\circ) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

43 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 52,37 \Omega$ ,  $I = 2,14 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>11,64</b>	<b>39,8</b>	<b>13</b>
5	<b>5,14</b>	<b>18</b>	<b>3,5</b>
7	<b>2,53</b>	<b>6,05</b>	<b>1,25</b>

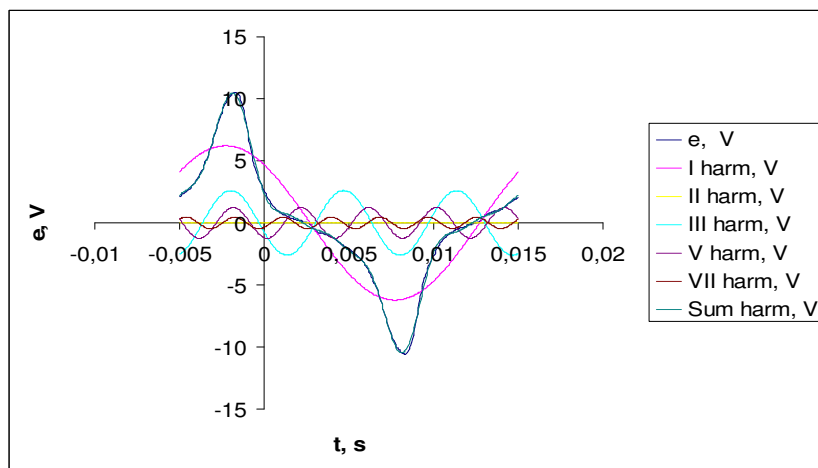
- **Vienuoliktas bandymas. Kai  $R_r=60,62 \Omega$ ; ir  $I=2,075 \text{ A}$ .**



74 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

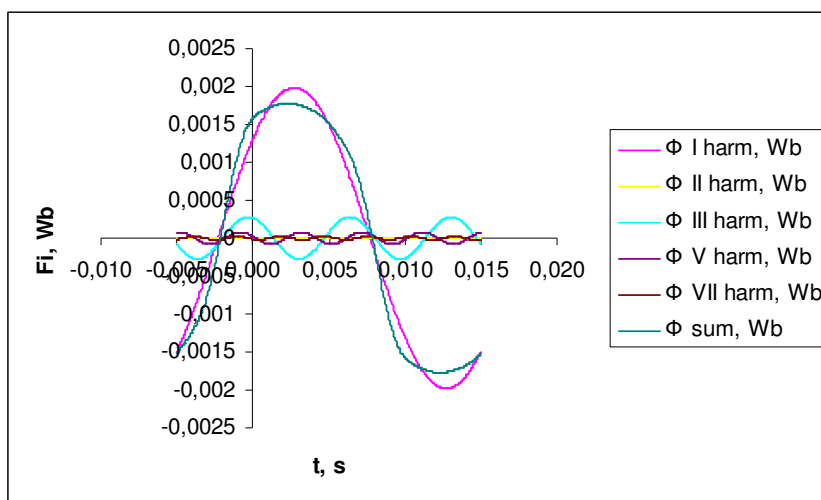
$$i = 2,83 \sin(\omega t - 55,56^\circ) + 0,0068 \sin(2\omega t + 63,49^\circ) + 0,28 \sin(3\omega t + 14,4^\circ) + 0,14 \sin(5\omega t - 69,96^\circ) + 0,08 \sin(7\omega t - 64,76^\circ) A.$$



75 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 6,22 \sin(\omega t + 48,85^\circ) + 0,019 \sin(2\omega t - 44,88^\circ) + 2,61 \sin(3\omega t - 16,55^\circ) + 1,25 \sin(5\omega t - 74,32^\circ) + 0,46 \sin(7\omega t - 49,41^\circ) V.$$



76 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 138,85^{\circ}) + 3 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 45,12^{\circ}) + 3 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 73,45^{\circ}) + 8 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 15,68^{\circ}) + 2,1 \cdot 10^{-5} \sin(\omega t + 40,59^{\circ}) \text{ Wb.}$$

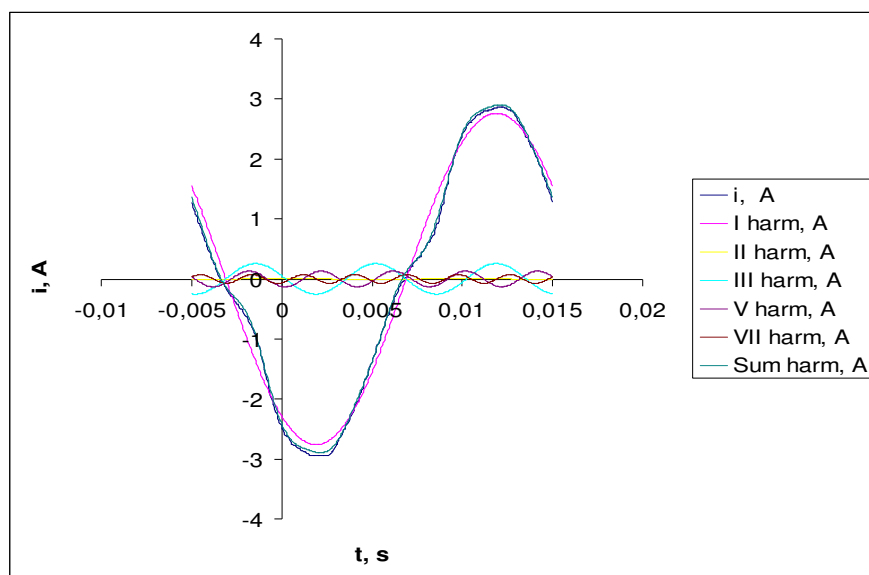
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

44 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 60,62 \Omega$ ,  $I = 2,075 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	$i, \%$	$e, \%$	$\phi, \%$
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>9,89</b>	<b>41,96</b>	<b>14</b>
5	<b>4,95</b>	<b>20,1</b>	<b>3,6</b>
7	<b>2,83</b>	<b>7,4</b>	<b>1,35</b>

- Dvyliktas bandymas. Kai  $R_r = 68,31 \Omega$ ; ir  $I = 2,025 \text{ A}$ .

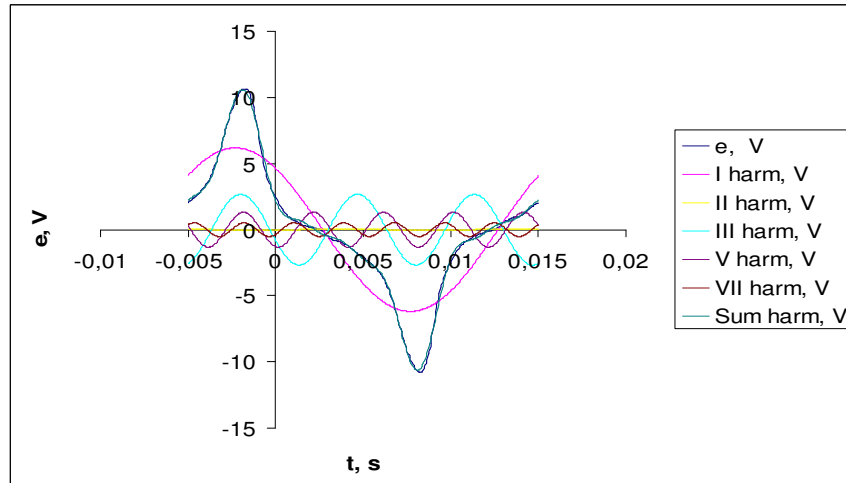




77 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

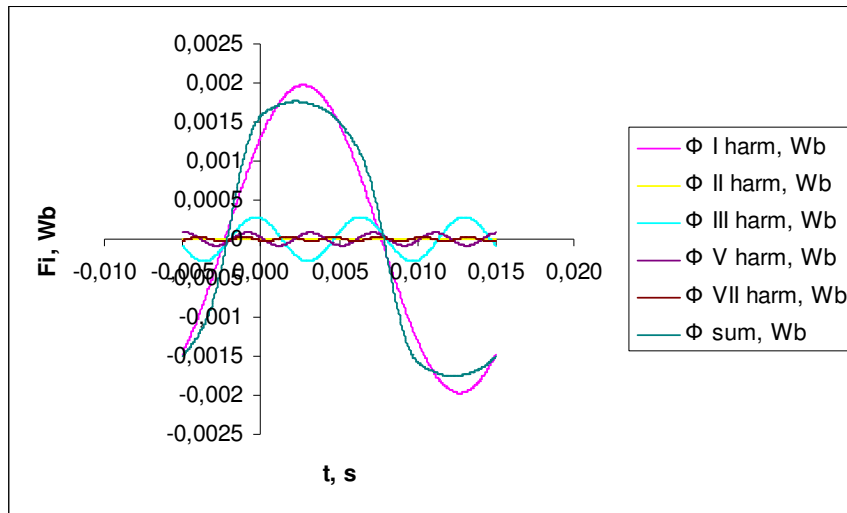
$$i = 2,76 \sin(\omega t - 55,9^\circ) + 0,0063 \sin(2\omega t + 82,05^\circ) + 0,25 \sin(3\omega t + 11,73^\circ) + 0,13 \sin(5\omega t - 73,28^\circ) + 0,07 \sin(7\omega t - 62,05^\circ) \text{ A.}$$



78 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 6,18 \sin(\omega t + 48,66^\circ) + 0,019 \sin(2\omega t - 51,09^\circ) + 2,67 \sin(3\omega t - 17,38^\circ) + 1,32 \sin(5\omega t - 76,11^\circ) + 0,52 \sin(7\omega t - 43,94^\circ) \text{ V.}$$



79 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 138,66^\circ) + 3 \cdot 10^{-6} \sin(2\omega t + 38,91^\circ) + 3 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 72,62^\circ) + 8,4 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 13,89^\circ) + 2,4 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 46,06^\circ) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

45 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $R_r = 68,31\Omega$ ,  $I = 2,025A$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>9,06</b>	<b>43,2</b>	<b>14</b>
5	<b>4,71</b>	<b>21,36</b>	<b>3,85</b>
7	<b>2,54</b>	<b>8,41</b>	<b>1,5</b>

- **Srauto tankio skaičiavimas.**

Transformatorius toks pat kaip ir 3.1 skyriuje.

- **Skaičiavimas:**
- Kadangi žinome magnetolaidžio medžiagos magnetinį srautą, o sklaidos magnetinius srautus galime paneigti, skaičiuojame taip:
- Apskaičiuojame skerspjūvio plotą:

$$S = 31\text{mm} \cdot 57\text{mm} \cdot \mu = 1767\text{mm}^2 \cdot 0,97 = 0,001713\text{m}^2.$$

$\mu$  - koeficientas (įvedamas dėl susidariusių oro tarpų tarp elektrotechninių plieno lakštų).

- Apskaičiuojame srauto tankį magnetolaidžio dalyje. Kai sklaidos srautas  $\Phi_d = 0$ , magnetinis srautas visose magnetolaidžio dalyse yra vienodas. Todėl grandinės srauto tankį galime rasti padaliję srautą  $\Phi_{m,n}$  iš tos grandinės dalies skerspjūvio ploto  $S$ , (46) formulė :

Pavyzdys:

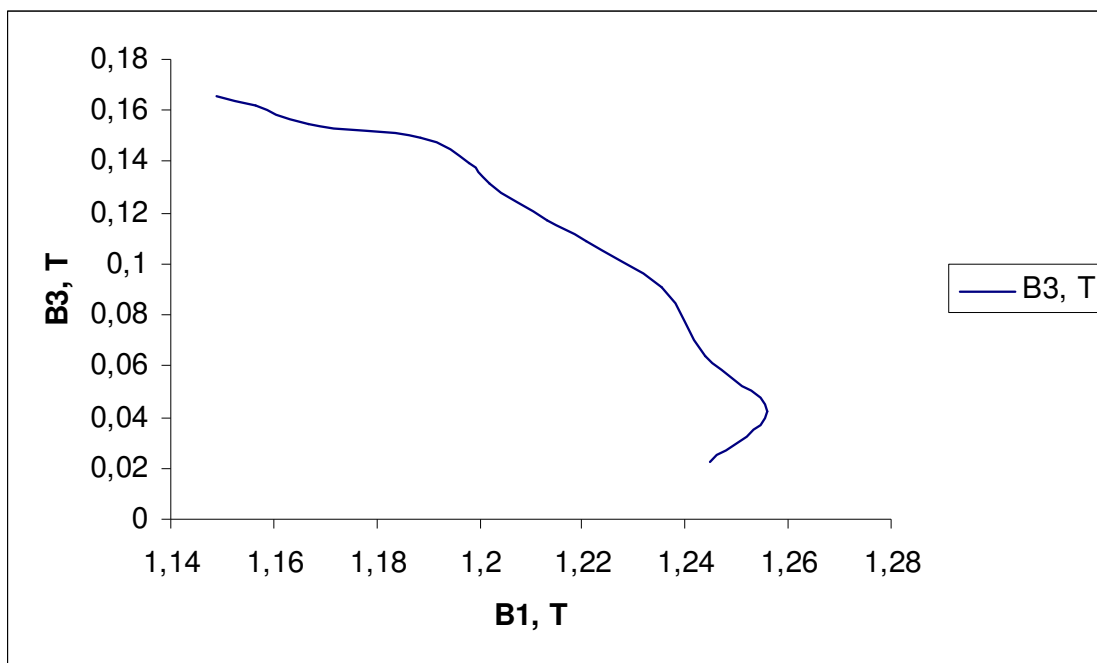
$$B_{1,U=40V} = \frac{0,002132}{0,001713} = 1,245 \text{ T.}$$

- Analogiškai apskaičiuojama indukcija kiekvienai harmonikai atskirai, prie skirtingų sąlygų. Skaičiavimo duomenys pateikti 46 lentelėje.

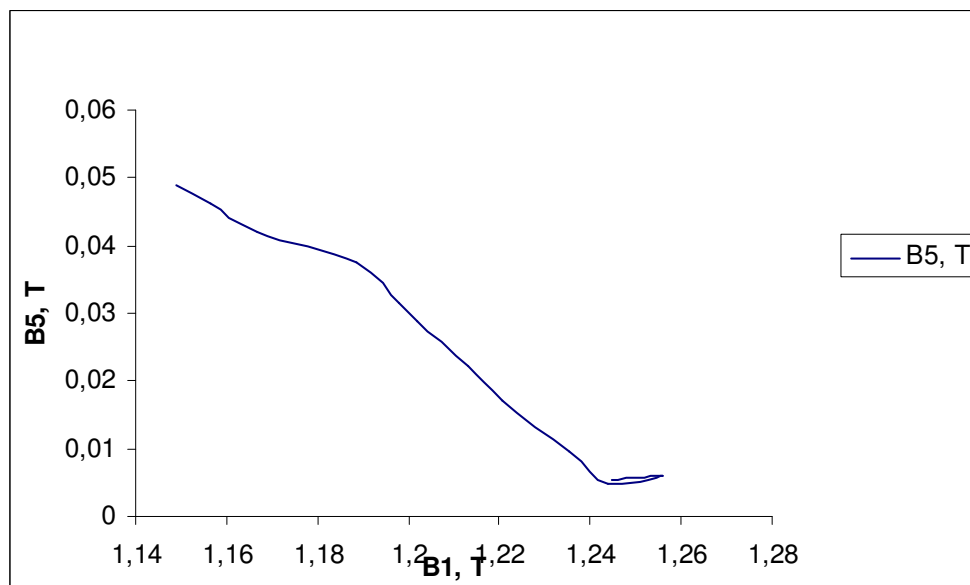
46 lentelė. Srauto tankis

Harmonikos eilės numeris	Kai $R_r=0 \Omega$ ; ir $I=3,3 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=6,06\Omega$ ir $I=3,4 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=9,38\Omega$ ir $I=3,2 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=15,22\Omega$ ir $I=2,85 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=20,8\Omega$ ir $I=2,7 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=25,51\Omega$ ir $I=2,625 \text{ A}$ . B, T
1	<b>1,245</b>	<b>1,25604</b>	<b>1,244066</b>	<b>1,23547</b>	<b>1,220613</b>	<b>1,213285</b>
3	<b>0,022207</b>	<b>0,042365</b>	<b>0,063712</b>	<b>0,090714</b>	<b>0,108811</b>	<b>0,11737</b>
5	<b>0,005507</b>	<b>0,005942</b>	<b>0,004755</b>	<b>0,00954</b>	<b>0,017102</b>	<b>0,022084</b>
7	<b>0,000902</b>	<b>0,001104</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,001752</b>	<b>0,00209</b>	<b>0,003542</b>
Harmonikos eilės numeris	Kai $R_r=31,3\Omega$ ir $I=2,45 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=36,7\Omega$ ir $I=2,35 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=42,21\Omega$ ir $I=2,3 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=52,37\Omega$ ir $I=2,14 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=60,62\Omega$ ir $I=2,075 \text{ A}$ . B, T	Kai $R_r=68,31\Omega$ ir $I=2,025 \text{ A}$ . B, T
1	<b>1,2019</b>	<b>1,197941</b>	<b>1,18873</b>	<b>1,166797</b>	<b>1,156584</b>	<b>1,149134</b>
3	<b>0,131567</b>	<b>0,13946</b>	<b>0,149189</b>	<b>0,15486</b>	<b>0,161794</b>	<b>0,165418</b>
5	<b>0,028879</b>	<b>0,031637</b>	<b>0,037576</b>	<b>0,042041</b>	<b>0,046315</b>	<b>0,048978</b>
7	<b>0,005529</b>	<b>0,006222</b>	<b>0,008146</b>	<b>0,010155</b>	<b>0,012235</b>	<b>0,013872</b>

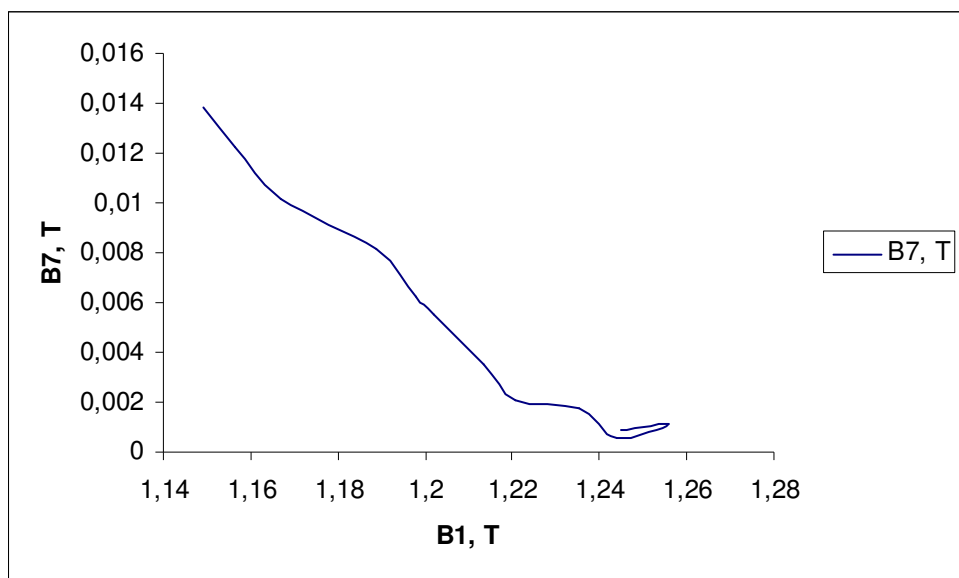
- Grafiškai pavaizduosiu  $B_3, B_5, B_7 = f(B_1)$ .



80 pav.  $B_3 = f(B_1)$



81 pav.  $B_5 = f(B_1)$



82 pav.  $B_7 = f(B_1)$

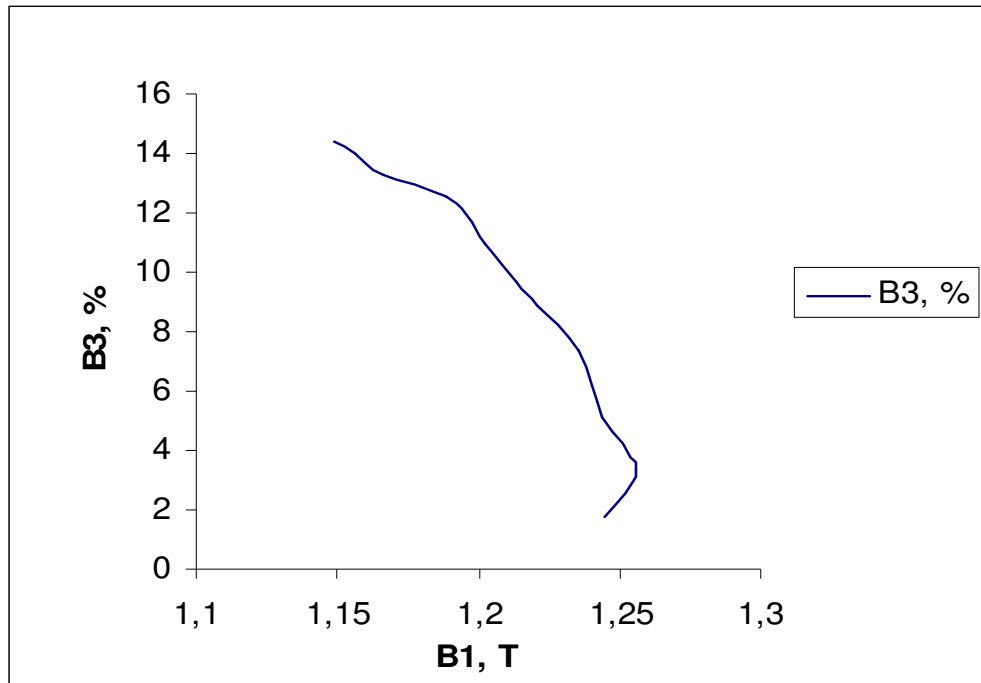
- Apskaičiuojame kiek procentų sudaro aukštesnės eilės harmonikos nuo pirmosios harmonikos, pagal (47) formulę:

- Duomenis pateikti 47 lentelėje.

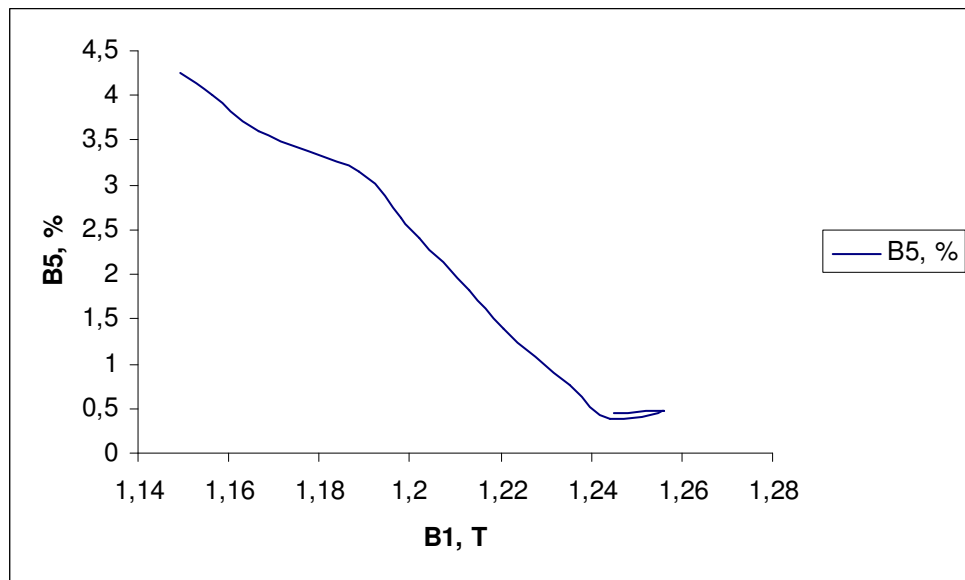
47 lentelė. Procentinė srauto tankio išraiška

Harmonikos eilės numeris	Kai $R_f=0 \Omega$ ; ir $I=3,3 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=6,06\Omega$ ir $I=3,4 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=9,38\Omega$ ir $I=3,2 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=15,22\Omega$ ir $I=2,85 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=20,8\Omega$ ir $I=2,7 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=25,51\Omega$ ir $I=2,625 \text{ A.}$ B, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>1,78</b>	<b>3,37</b>	<b>5,12</b>	<b>7,34</b>	<b>8,91</b>	<b>9,67</b>
5	<b>0,44</b>	<b>0,47</b>	<b>0,38</b>	<b>0,77</b>	<b>1,4</b>	<b>1,82</b>
7	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>0,048</b>	<b>0,14</b>	<b>0,17</b>	<b>0,29</b>
Harmonikos eilės numeris	Kai $R_f=31,3\Omega$ ir $I=2,45 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=36,7\Omega$ ir $I=2,35 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=42,21\Omega$ ir $I=2,3 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=52,37\Omega$ ir $I=2,14 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=60,62\Omega$ ir $I=2,075 \text{ A.}$ B, %	Kai $R_f=68,31\Omega$ ir $I=2,025 \text{ A.}$ B, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>10,95</b>	<b>11,64</b>	<b>12,55</b>	<b>13,27</b>	<b>13,99</b>	<b>14,4</b>
5	<b>2,4</b>	<b>2,64</b>	<b>3,16</b>	<b>3,60</b>	<b>4</b>	<b>4,26</b>
7	<b>0,46</b>	<b>0,52</b>	<b>0,69</b>	<b>0,87</b>	<b>1,1</b>	<b>1,21</b>

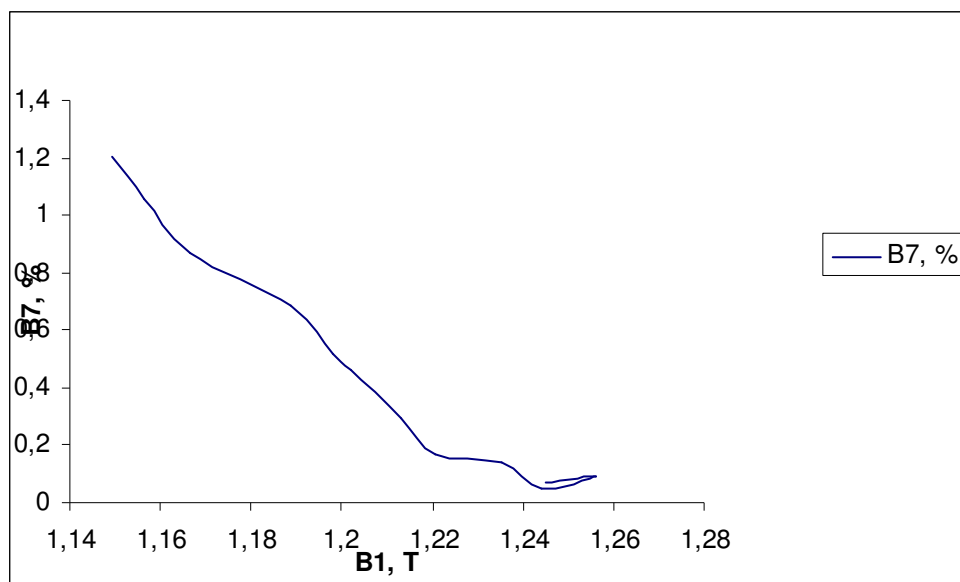
- Parodome 47 lentelę grafiškai  $B_3\%, B_5\%, B_7\% = f(B_1)$ .



83 pav. Trečios harmonikos srauto tankio procentinė priklausomybė nuo  $B_1$



84 pav. Penktos harmonikos srauto tankio procentinė priklausomybė nuo  $B_1$



85 pav. Septintos harmonikos srauto tankio procentinė priklausomybė nuo  $B_1$

- Grafiškai pavaizduosime indukcijos priklausomybę nuo aktyvios varžos  $R_r$ .
- Nustatome, varžos  $R_r$  dydį prie skirtingų sąlygų, skaičiavimo duomenys pateikti 48 lentelėje.

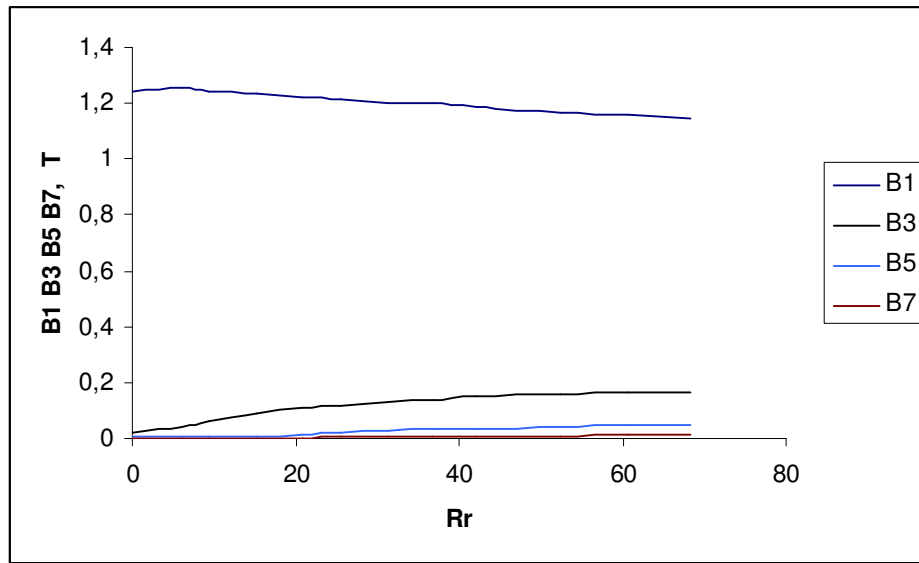
$$U_r = \sqrt{U^2 - U_2^2}, \quad (49)$$

$$R_r \cong \frac{U_r}{I}. \quad (50)$$

48 lentelė.  $R_r$  dydžiai prie skirtingų sąlygų.

Kai $U=40$ V; ir $I=3,3$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=45$ V; ir $I=3,4$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=50$ V; ir $I=3,2$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=59$ V; ir $I=2,85$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=69$ V; ir $I=2,7$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=78$ V; ir $I=2,625$ A. $R_r, \Omega$
<b>0</b>	<b>6,06</b>	<b>9,38</b>	<b>15,22</b>	<b>20,8</b>	<b>25,51</b>
Kai $U=86,5$ V; ir $I=2,45$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=95$ V; ir $I=2,35$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=105$ V; ir $I=2,3$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=119$ V; ir $I=2,14$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=132$ V; ir $I=2,075$ A. $R_r, \Omega$	Kai $U=144$ V; ir $I=2,025$ A. $R_r, \Omega$
<b>31,3</b>	<b>36,67</b>	<b>42,21</b>	<b>52,37</b>	<b>60,62</b>	<b>68,31</b>

- Priklausomybė  $B_{1,3,5,7} = f(R_r)$ , pavaizduota 86 pav.



86 pav.  $B_{1,3,5,7} = f(R_r)$ .

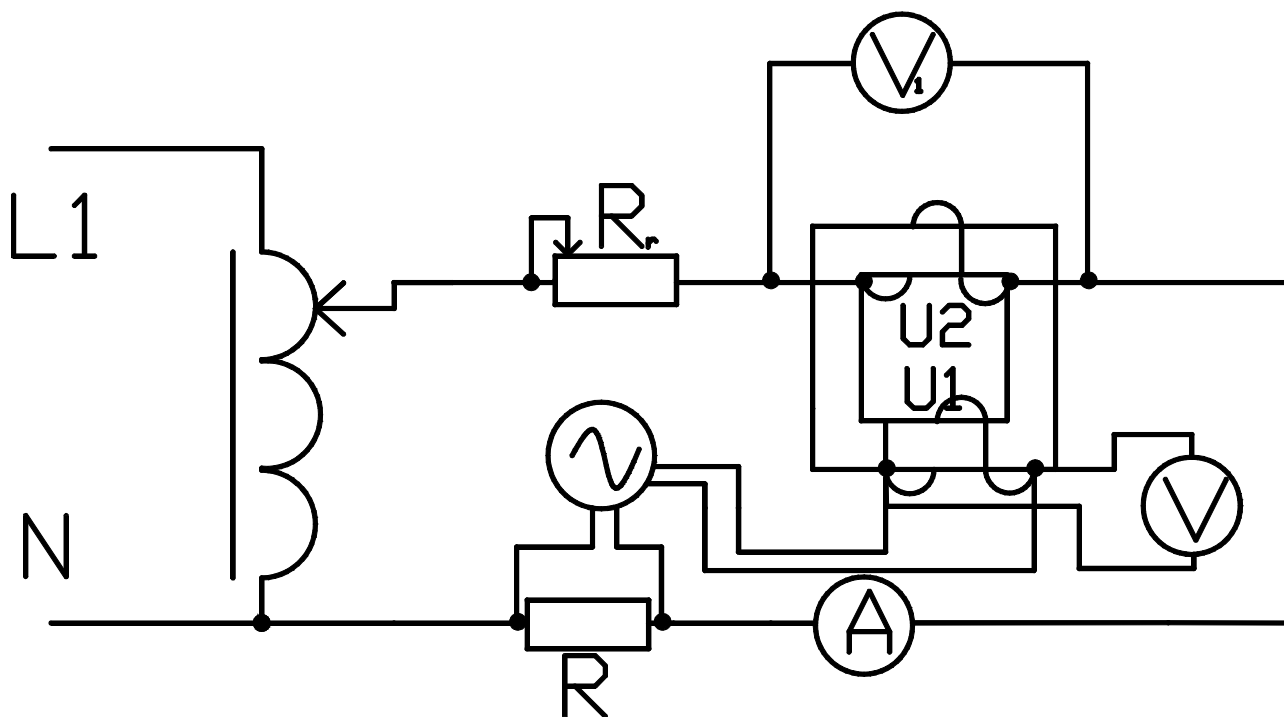
### 3.3 Magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros tyrimas, kai transformatorius maitinamas $+5\% \cdot U_v$

- Šio eksperimento tikslas:

Palaikant pastovaus dydžio  $+5\% \cdot U_v$  įtampą ant transformatoriaus apvijos, keisti įvedama aktyvios varžos dydį ir ištirti magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros harmonikų dydžių kitimą.

Grandinės schema pavaizduota 87 pav. Oscilografas analogiškai kaip ir prieš tai prijungtas prie transformatoriaus antrinės grandinės ir prie varžos R, kuria mes žinome  $R=0,25\Omega$ .





87 pav. Eksperimentinės grandinės schema

**Darbo eiga:**

Atlikta 9 matavimai, palaikant ant transformatoriaus apvijos  $U_1 \cong 42V$ .

- **Pirmas matavimas, reostatas išvestas:** Kai  $I=3,9$  A.
- Srovės kreivę  $i = f(t)$ , skaidome harmonikomis, kaip 3.1 skyriuje:
- Periodas susideda iš 240 laiko ir srovės momentinių reikšmių, laiko žingsnis  $t = 0,000084$  s.

49 lentelė. Srovės ir laiko momentinės reikšmės per periodą

Eil. Nr.	t, s	i, A
1	0	-0,26544
2	0,000084	-0,30841
---	---	---
239	0,019992	-0,26544
240	0,020076	-0,3045

- Apskaičiuojame kampą alfa  $\alpha_{1..240}$ , rad, pagal (48) formulę.
- Išskaidome srovės kreivę į sinusines ir kosinusines harmonikų dedamąsias, 50 lentelė.

50 lentelė. Skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	$\alpha$ , rad	1 harm.		3 harm.		5 harm.		7 harm.	
		$i_{I.\sin.harm}$ , A	$i_{I.\cos.harm}$ , A	$i_{III.\sin.harm}$ , A	$i_{III.\cos.harm}$ , A	$i_{V.\sin.harm}$ , A	$i_{V.\cos.harm}$ , A	$i_{VII.\sin.harm}$ , A	$i_{VII.\cos.harm}$ , A
1	0	0	-0,265438	0	-0,265438	0	-0,265438	0	-0,2654375
2	0,026	-0,00814	-0,308299	-0,024391	-0,307440	-0,04058	-0,305726	-0,05665	-0,3031592
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
239	6,281	0,000667	-0,265437	0,0020013	-0,26543	0,003335	-0,265417	0,00467	-0,265396
240	6,307	-0,00727	-0,304413	-0,021792	-0,303719	-0,03627	-0,302333	-0,05066	-0,3002570
$\Sigma$	---	-574,49	93,121111	157,71808	-136,4147	-17,6708	17,05766	3,945304	-3,2881894

- Apskaičiuojame koeficientus, pagal (35), (36) formules:
- Rezultatai pateikti 51 lentelėje.

51 lentelė. Koeficiento K reikšmės.

$K_{I.\sin.harm}$ , A	$K_{I.\cos.harm}$ , A	$K_{III.\sin.harm}$ , A	$K_{III.\cos.harm}$ , A	$K_{V.\sin.harm}$ , A	$K_{V.\cos.harm}$ , A	$K_{VII.\sin.harm}$ , A	$K_{VII.\cos.harm}$ , A
4,79	0,78	1,31	-1,14	0,15	0,14	0,03	-0,03

- Srovės kreivių harmonikų amplitudės pateiktos 52 lentelėje.

52 lentelė. Srovės kreivės harmonikų amplitudės.

$I_{m.I.harm}$ , A	$I_{m.III.harm}$ , A	$I_{m.V.harm}$ , A	$I_{m.VII.harm}$ , A
4,85	1,74	0,21	0,04

- Fazės kampo skaičiavimo duomenis pateikti 53 lentelėje.

53 lentelė. Harmonikų fazės kampas, radianais.

$\psi_{I.harm}$	$\psi_{III.harm}$	$\psi_{V.harm}$	$\psi_{VII.harm}$
0,161	-0,713	0,768	-0,695

- Perskaičiuojame radianus į laipsnius:

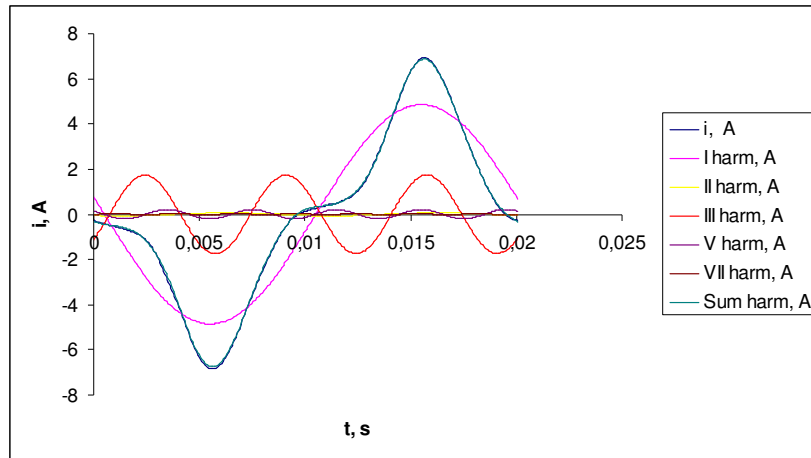
54 lentelė. Harmonikų fazės kampas, laipsniais

$\varphi_{I.harm}$	$\varphi_{III.harm}$	$\varphi_{V.harm}$	$\varphi_{VII.harm}$
9,21 <sup>0</sup>	-40,86 <sup>0</sup>	43,99 <sup>0</sup>	-39,81 <sup>0</sup>

- Kreivės išskaidome harmonikomis:

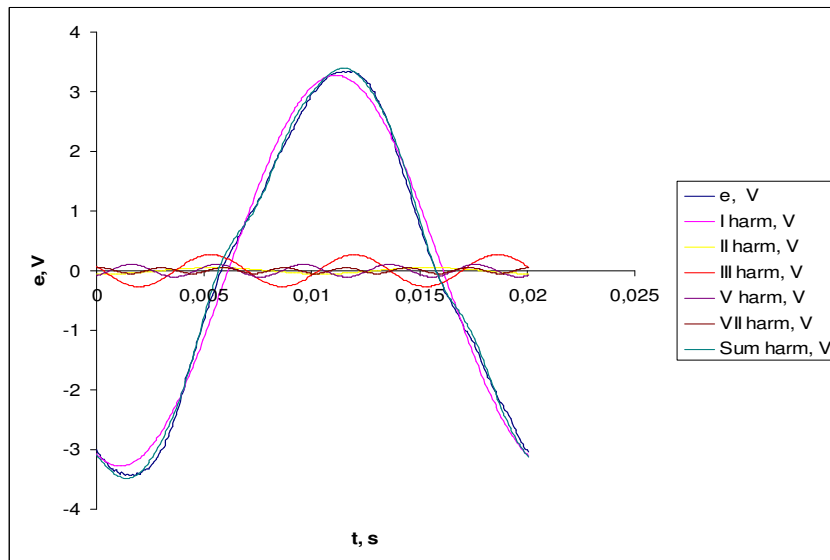
$$i = 4,85 \sin(\omega t + 9,21^\circ) + 0,066 \sin(2\omega t - 42,56^\circ) + 1,74 \sin(3\omega t - 40,86^\circ) + 0,21 \sin(5\omega t + 43,99^\circ) + 0,04 \sin(7\omega t - 39,81^\circ) A.$$

- Srovės kreivė ir jos harmonikos parodyta 50.1 pav.



88 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Analogiškai atliekame skaičiavimus elektrovarai, kurios kreivė išskaidyta harmonikomis pavaizduota 89 pav.

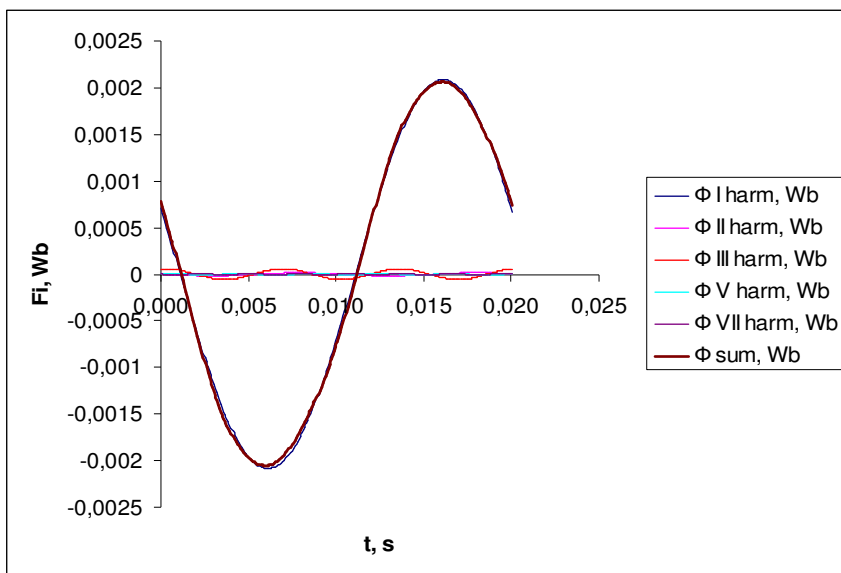


89 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 3,27 \sin(\omega t - 70,14^\circ) + 0,053 \sin(2\omega t - 73,08^\circ) + 0,27 \sin(3\omega t + 16,41^\circ) + 0,11 \sin(5\omega t - 54,87^\circ) + 0,052 \sin(7\omega t + 70,17^\circ).V$$

- Srauto  $\phi$  skaidymas harmonikomis atliekamas analogiškai kaip ir prieš tai



90 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 19,86^\circ) + 1,7 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 16,92^\circ) + 5,68 \cdot 10^{-5} \sin(3\omega t + 106,41^\circ) + 1,35 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 35,13^\circ) + 4,71 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 160,17^\circ) \text{ Wb.}$$

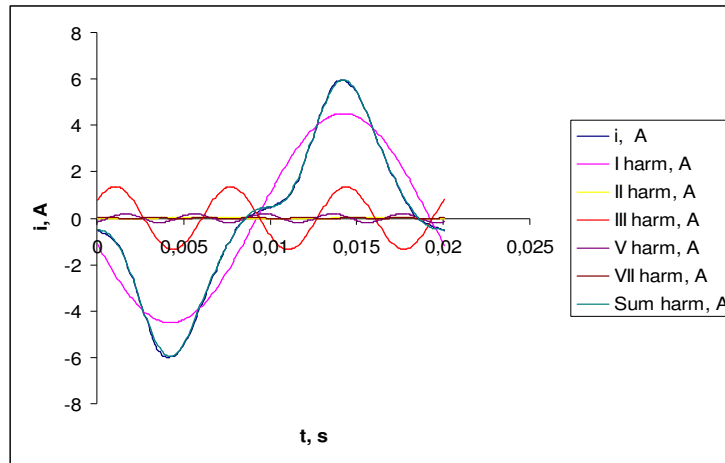
- **Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos, sudarys aukštesnės eilės harmonikos, pagal (45) formulę:**

Skaičiavimo rezultatai pateikti 55 lentelėje.

55 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 3,9 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>35,83</b>	<b>8,17</b>	<b>2,72</b>
5	<b>4,22</b>	<b>3,23</b>	<b>0,65</b>
7	<b>0,88</b>	<b>1,58</b>	<b>0,23</b>

- **Antras matavimas, įvedama varža. Kai  $I=3,6 \text{ A}$ .**

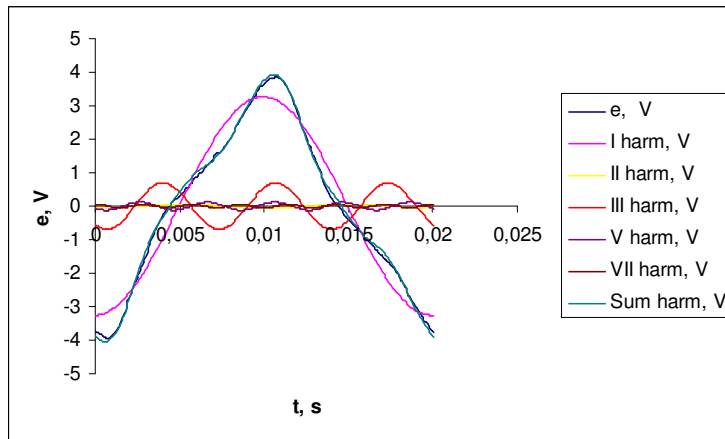


91 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$i = 4,51 \sin(\omega t - 13,82^\circ) + 0,0072 \sin(2\omega t - 50,8^\circ) + 1,35 \sin(3\omega t + 33,2^\circ) + 0,19 \sin(5\omega t - 57,26^\circ) + 0,03 \sin(7\omega t + 24,82^\circ) \text{ A.}$$

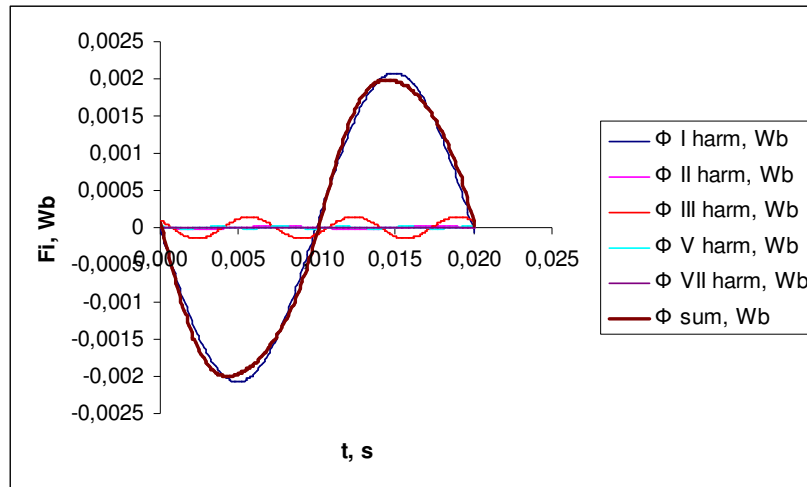
- Taip pat atliekame skaičiavimus elektrovarai ir magnetiniam srautui.



92 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,26 \sin(\omega t - 89,13^\circ) + 0,063 \sin(2\omega t - 89,39^\circ) + 0,69 \sin(3\omega t - 52,68^\circ) + 0,12 \sin(5\omega t - 29,78^\circ) + 0,056 \sin(7\omega t + 86,46^\circ) \text{ V.}$$



93 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

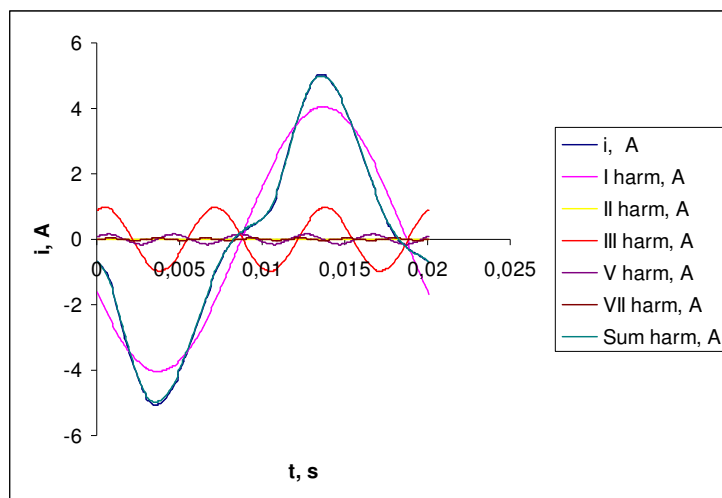
$$\phi = 2,1 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 0,87^{\circ}) + 2 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 0,61^{\circ}) + 1,4 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 37,32^{\circ}) + 1,52 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 60,22^{\circ}) + 5,13 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 176,46^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

56 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 3,6 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	$i, \%$	$e, \%$	$\phi, \%$
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>29,83</b>	<b>21,20</b>	<b>7,07</b>
5	<b>4,18</b>	<b>3,65</b>	<b>0,73</b>
7	<b>0,66</b>	<b>1,73</b>	<b>0,25</b>

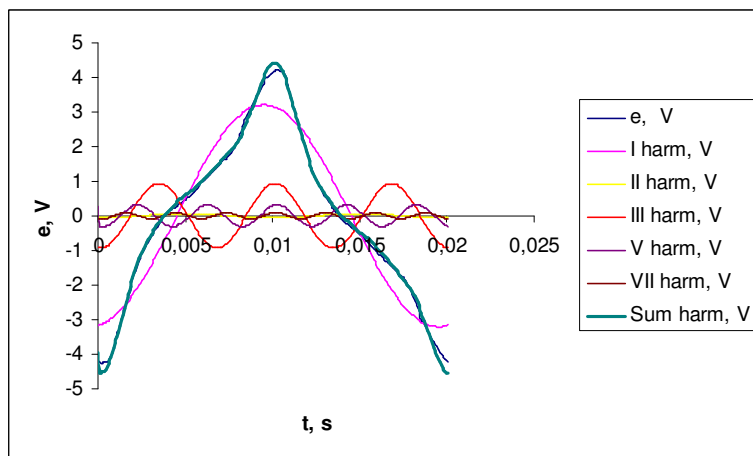
- Trečias matavimas. Kai  $I=3,125 \text{ A}$ .



94 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

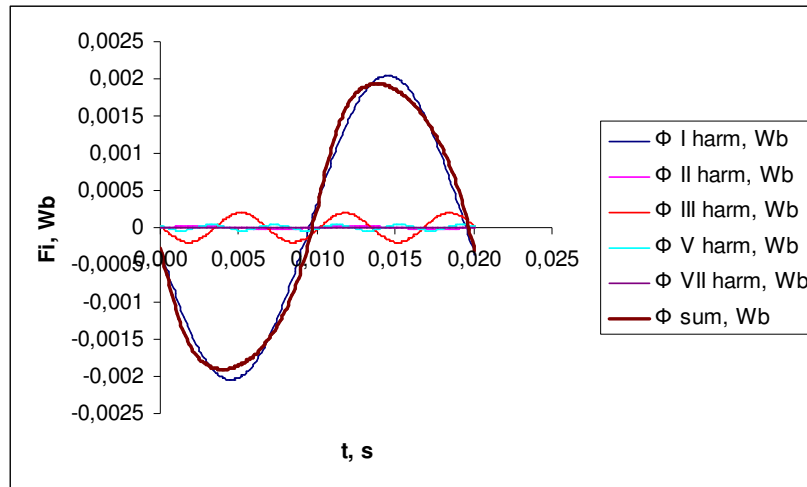
$$i = 4,04 \sin(\omega t - 23,03^\circ) + 0,017 \sin(2\omega t - 83,26^\circ) + 0,97 \sin(3\omega t + 63,73^\circ) + 0,16 \sin(5\omega t + 28,24^\circ) + 0,03 \sin(7\omega t - 21,4^\circ) A.$$



95 pav. Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,21 \sin(\omega t - 81,15^\circ) + 0,067 \sin(2\omega t - 88,64^\circ) + 0,93 \sin(3\omega t - 82,12^\circ) + 0,31 \sin(5\omega t + 65,8^\circ) + 0,094 \sin(7\omega t - 62,46^\circ) V.$$



96 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 2,04 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 8,85^{\circ}) + 2,14 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 1,36^{\circ}) + 1,98 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t + 7,88^{\circ}) + 4 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 155,8^{\circ}) + 8,51 \cdot 10^{-6} \sin(7\omega t + 27,54^{\circ}) \text{ Wb.}$$

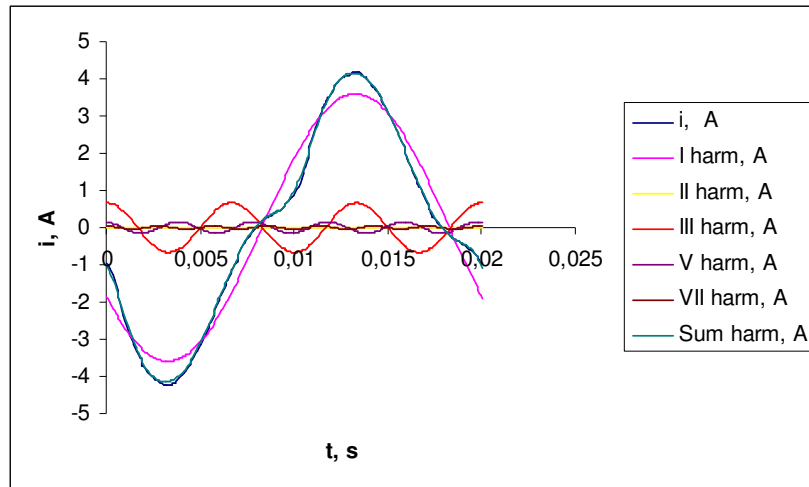
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

57 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 3,125 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	100	100	100
3	24,07	29,03	9,68
5	3,89	9,77	1,96
7	0,77	2,91	0,42

- **Ketvirtas matavimas. Kai  $I=2,775 \text{ A}$ .**

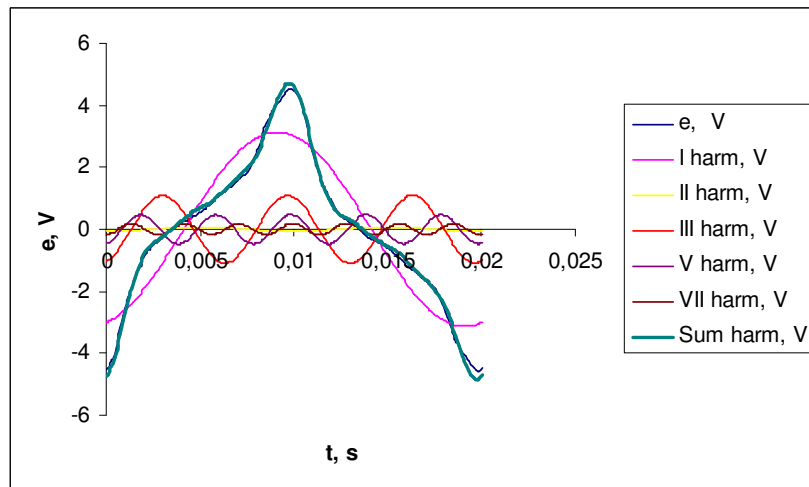




97 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

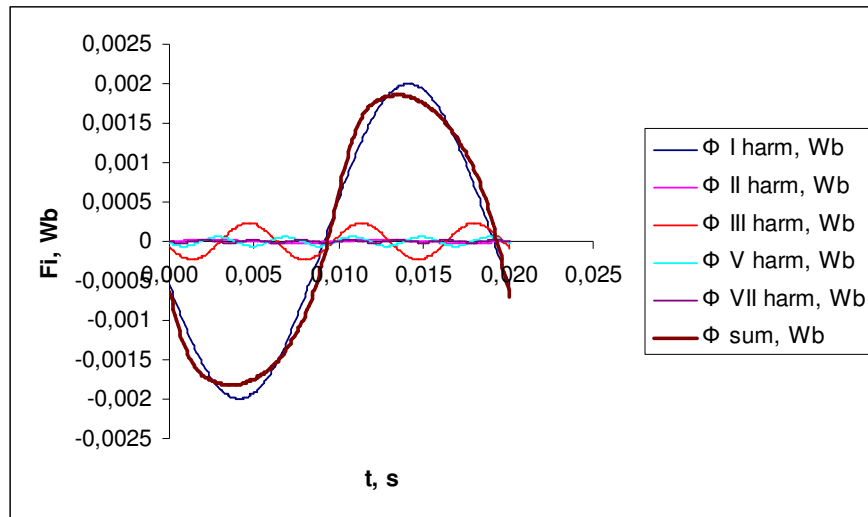
$$i = 3,6 \sin(\omega t - 30,9^\circ) + 0,017 \sin(2\omega t - 83,55^\circ) + 0,67 \sin(3\omega t + 89,34^\circ) + 0,15 \sin(5\omega t + 76,77^\circ) + 0,04 \sin(7\omega t + 89,04^\circ) \text{ A.}$$



98 pav. Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,14 \sin(\omega t - 74,1^\circ) + 0,066 \sin(2\omega t - 88,1^\circ) + 1,087 \sin(3\omega t - 71,79^\circ) + 0,47 \sin(5\omega t - 76,02^\circ) + 0,18 \sin(7\omega t - 81,98^\circ) \text{ V.}$$



99 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

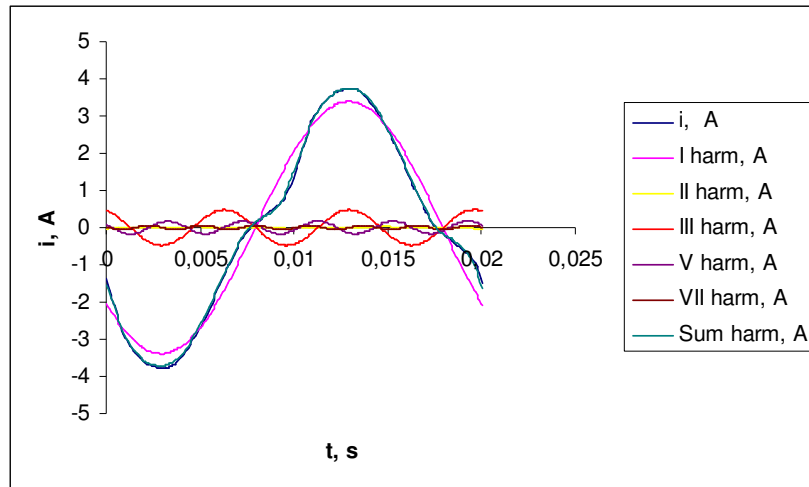
$$\phi = 1,997 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 15,9^{\circ}) + 2,12 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 1,9^{\circ}) + 2,31 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 18,21^{\circ}) + 5,99 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t + 13,98^{\circ}) + 1,61 \cdot 10^{-5} \sin(\omega t + 8,02^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

58 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,775 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>18,52</b>	<b>34,67</b>	<b>11,56</b>
5	<b>4,29</b>	<b>14,99</b>	<b>3</b>
7	<b>1,07</b>	<b>5,62</b>	<b>0,8</b>

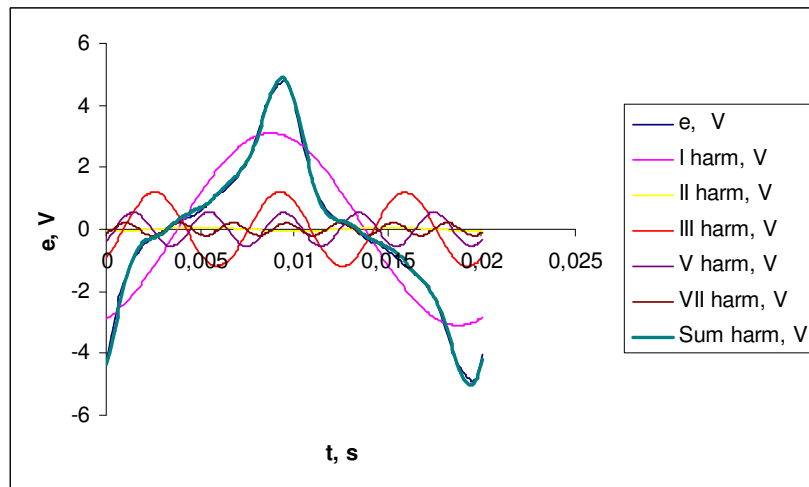
- **Penktas matavimas. Kai  $I=2,55 \text{ A}$ .**



100 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

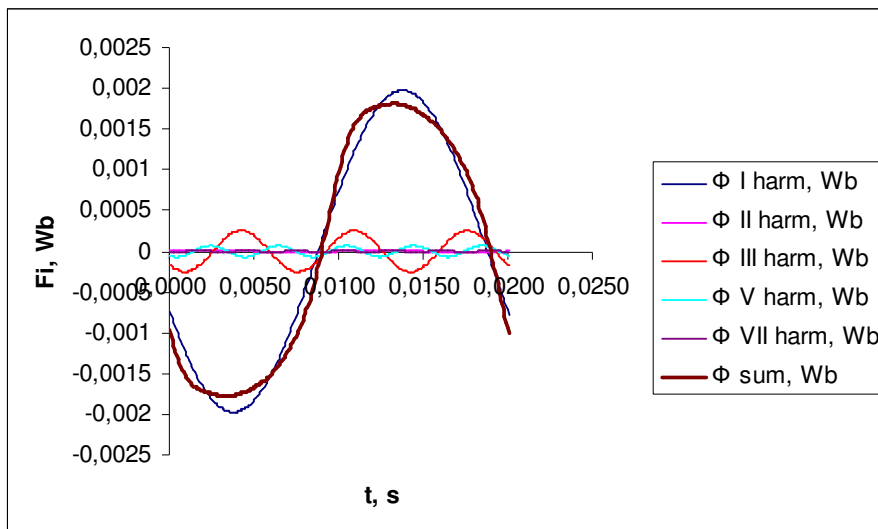
$$i = 3,39 \sin(\omega t - 37,18^\circ) + 0,023 \sin(2\omega t - 83,84^\circ) + 0,49 \sin(3\omega t + 69,41^\circ) + 0,17 \sin(5\omega t + 26,40^\circ) + 0,064 \sin(7\omega t + 10,83^\circ) \text{ A.}$$



101 pav. Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,1 \sin(\omega t - 68,18^\circ) + 0,065 \sin(2\omega t - 88,52^\circ) + 1,19 \sin(3\omega t - 49,49^\circ) + 0,54 \sin(5\omega t - 41,11^\circ) + 0,21 \sin(7\omega t - 39,59^\circ) \text{ V.}$$



102 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

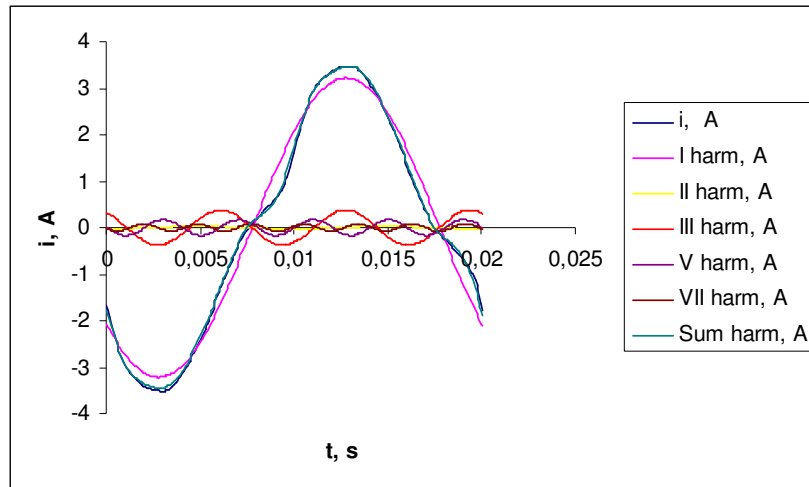
$$\phi = 1,98 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 21,82^{\circ}) + 2,06 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 1,48^{\circ}) + 2,5 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 40,51^{\circ}) + 6,92 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 48,89^{\circ}) + 1,89 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t + 50,41^{\circ}) \text{ Wb}.$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

59 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,55 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>14,10</b>	<b>38,52</b>	<b>12,84</b>
5	<b>5,01</b>	<b>17,52</b>	<b>3,50</b>
7	<b>1,87</b>	<b>6,71</b>	<b>0,96</b>

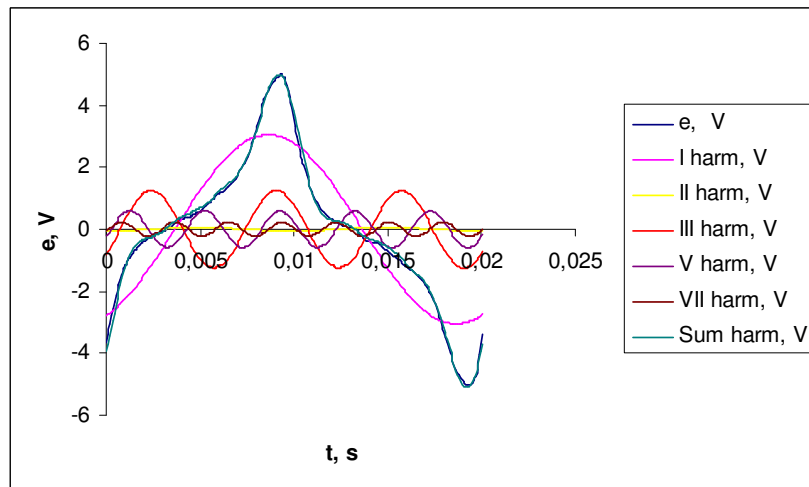
- Šeštas matavimas. Kai  $I=2,45 \text{ A}$ .



103 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

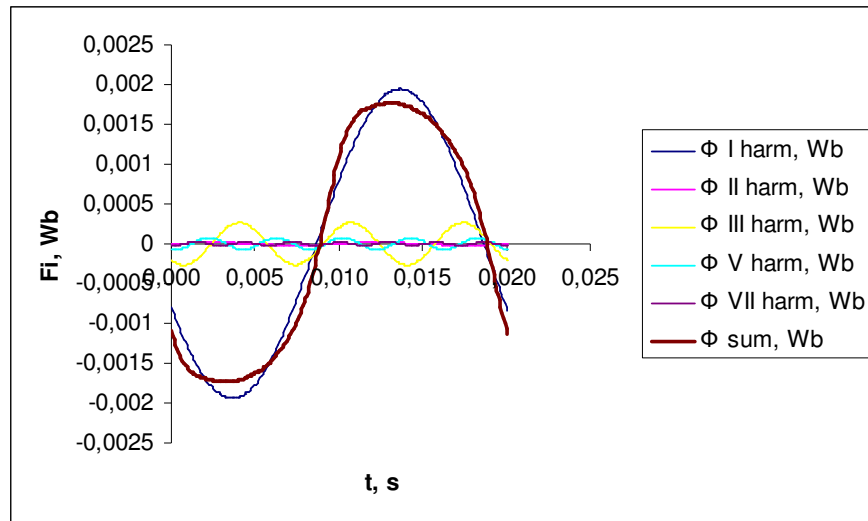
$$i = 3,22 \sin(\omega t - 39,91^\circ) + 0,028 \sin(2\omega t - 89,38^\circ) + 0,38 \sin(3\omega t + 58,76^\circ) + 0,17 \sin(5\omega t + 5,3^\circ) + 0,077 \sin(7\omega t - 15,88^\circ) \text{ A.}$$



104 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,05 \sin(\omega t - 65,66^\circ) + 0,056 \sin(2\omega t - 88,3^\circ) + 1,25 \sin(3\omega t - 39,66^\circ) + 0,59 \sin(5\omega t - 23,38^\circ) + 0,22 \sin(7\omega t - 11,96^\circ) \text{ V.}$$



105 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

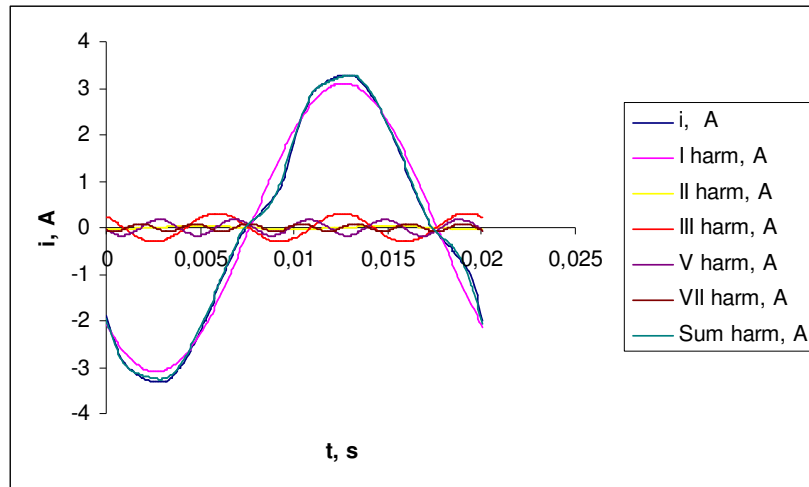
$$\phi = 1,94 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 24,34^{\circ}) + 1,78 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 1,7^{\circ}) + 2,65 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 50,34^{\circ}) + 7,5 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 66,62^{\circ}) + 2,03 \cdot 10^{-5} \sin(\omega t + 78,04^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Suskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

60 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,45 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>11,76</b>	<b>40,85</b>	<b>13,62</b>
5	<b>5,26</b>	<b>19,28</b>	<b>3,86</b>
7	<b>2,4</b>	<b>7,3</b>	<b>1,04</b>

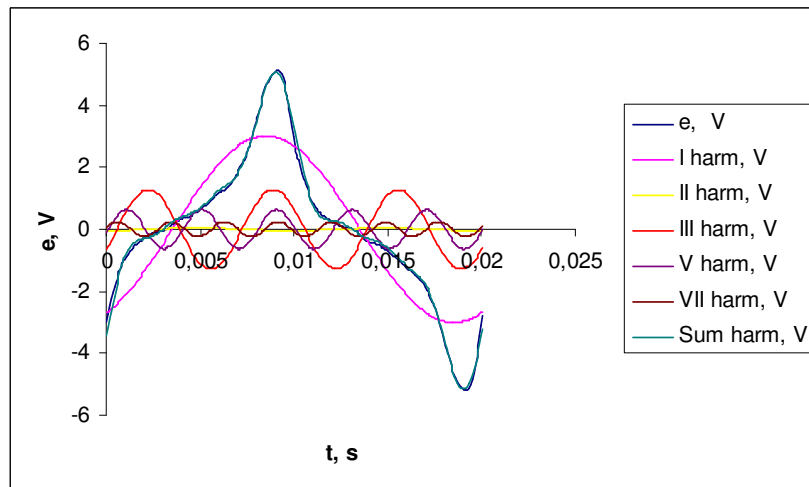
- **Septintas matavimas. Kai  $I=2,35 \text{ A}$ .**



106 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

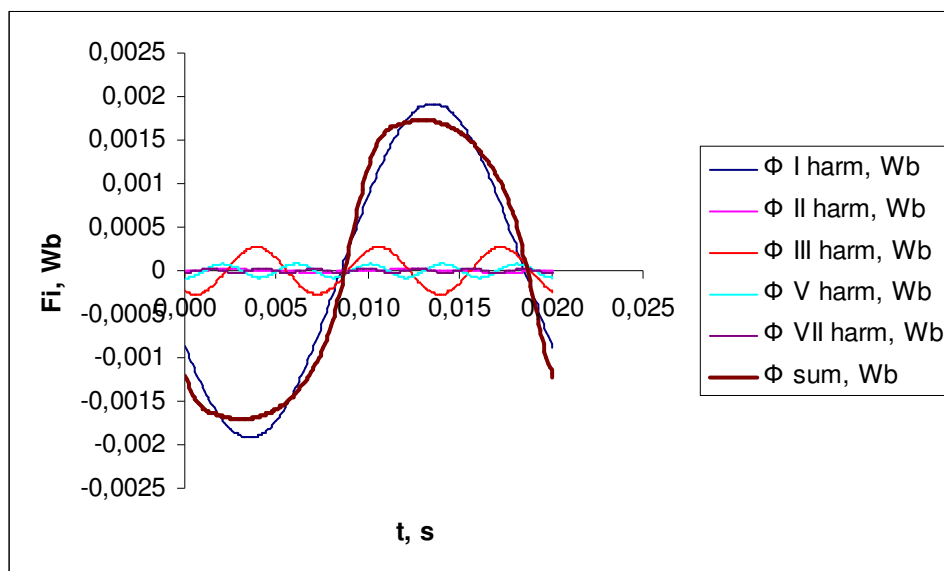
$$i = 3,1 \sin(\omega t - 42,36^\circ) + 0,035 \sin(2\omega t - 87,33^\circ) + 0,31 \sin(3\omega t + 49,45^\circ) + 0,17 \sin(5\omega t - 13,95^\circ) + 0,09 \sin(7\omega t - 34,62^\circ) A.$$



107 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 3,01 \sin(\omega t - 63,33^\circ) + 0,045 \sin(2\omega t - 84,13^\circ) + 1,28 \sin(3\omega t - 30,86^\circ) + 0,63 \sin(5\omega t - 7,71^\circ) + 0,25 \sin(7\omega t + 13,58^\circ) V.$$



108 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 1,92 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 26,67^\circ) + 1,44 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 5,87^\circ) + 2,72 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 59,14^\circ) + 8,03 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 82,29^\circ) + 2,23 \cdot 10^{-5} \sin(7\omega t - 76,42^\circ) \text{ Wb.}$$

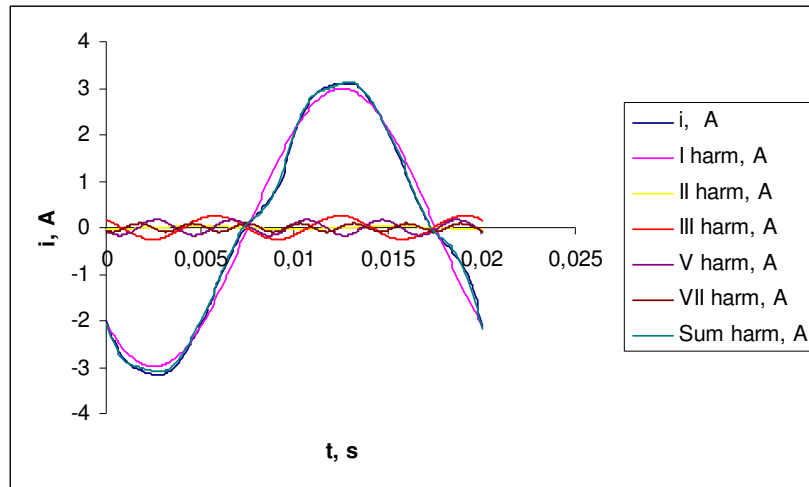
- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

61 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,35 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	Φ, %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>9,96</b>	<b>42,51</b>	<b>14,17</b>
5	<b>5,60</b>	<b>20,91</b>	<b>4,18</b>
7	<b>2,89</b>	<b>8,12</b>	<b>1,16</b>

- **Aštuntas matavimas. Kai  $I=2,25 \text{ A}$ .**

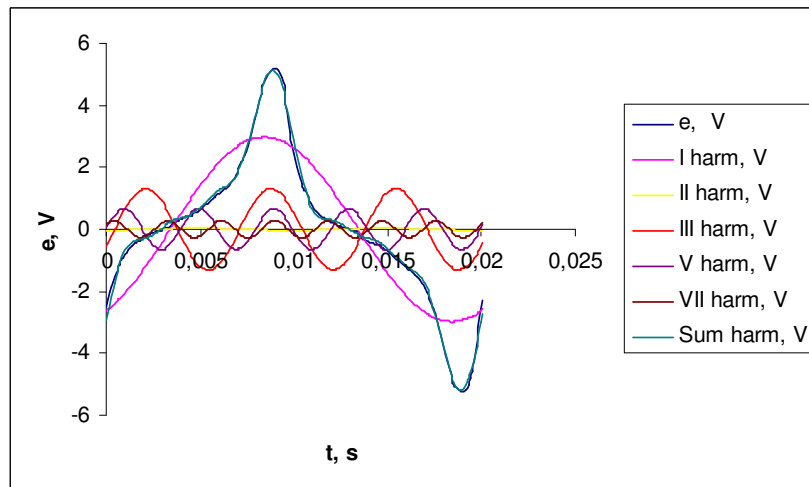




109 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

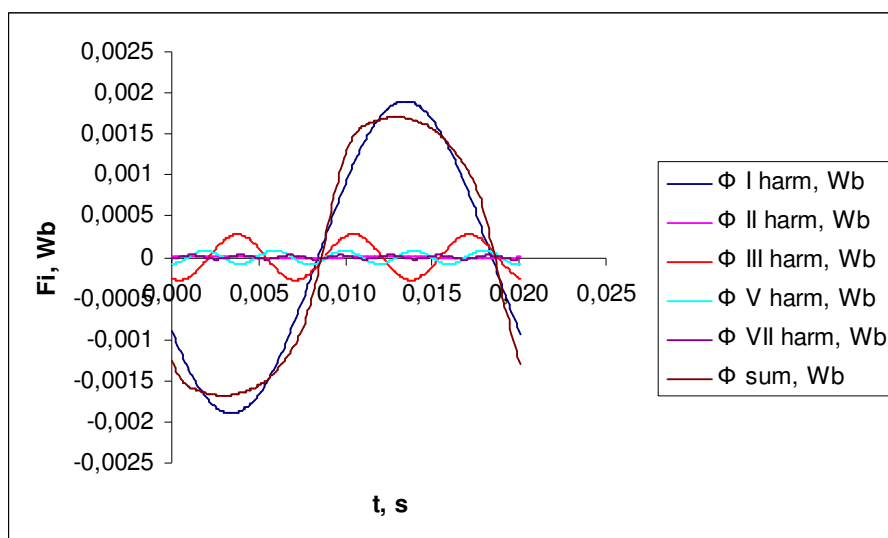
$$i = 2,99 \sin(\omega t - 44,04^\circ) + 0,033 \sin(2\omega t - 89,4^\circ) + 0,25 \sin(3\omega t + 43,33^\circ) + 0,17 \sin(5\omega t - 26,06^\circ) + 0,09 \sin(7\omega t - 47,99^\circ) \text{ A.}$$



110 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskaidyta harmonikomis:

$$e = 2,98 \sin(\omega t - 61,57^\circ) + 0,039 \sin(2\omega t - 84,94^\circ) + 1,31 \sin(3\omega t - 23,76^\circ) + 0,67 \sin(5\omega t + 5,98^\circ) + 0,27 \sin(7\omega t + 36,96^\circ) \text{ V.}$$



111 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

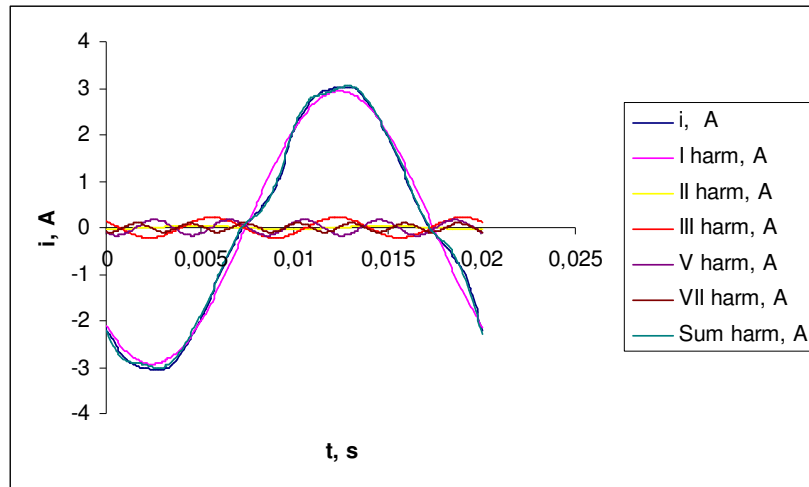
$$\phi = 1,9 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 28,43^{\circ}) + 1,24 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t - 5,06^{\circ}) + 2,78 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 66,24^{\circ}) + 8,4 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 84,02^{\circ}) + 2,41 \cdot 10^{-5} \sin(\omega t - 53,04^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Suskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

62 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,25 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>8,48</b>	<b>43,91</b>	<b>14,64</b>
5	<b>5,64</b>	<b>22,13</b>	<b>4,43</b>
7	<b>3,05</b>	<b>8,9</b>	<b>1,27</b>

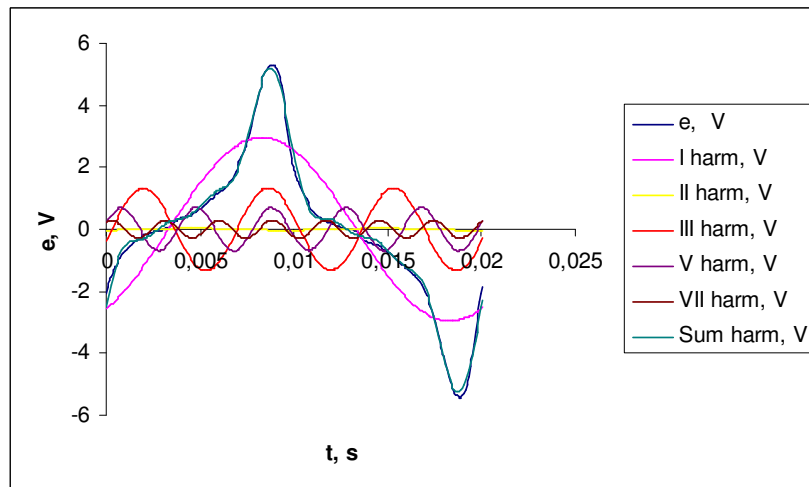
- Devintas matavimas. Kai  $I=2,2 \text{ A}$ .



112 pav. Srovės kreivė ir jos harmonikos

- Srovės kreivė išskaidyta harmonikomis:

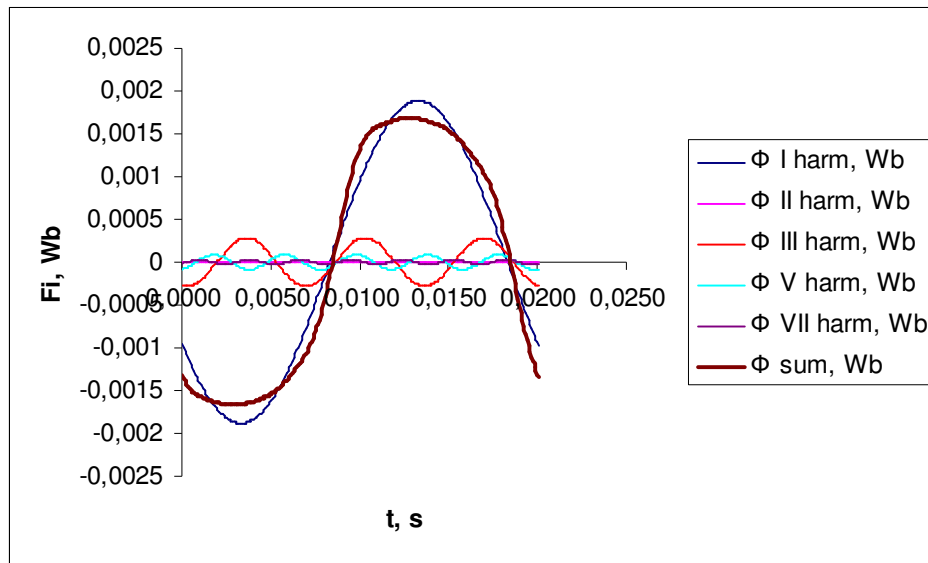
$$i = 2,93 \sin(\omega t - 45,97^\circ) + 0,039 \sin(2\omega t - 82,13^\circ) + 0,22 \sin(3\omega t + 36,33^\circ) + 0,17 \sin(5\omega t - 38,38^\circ) + 0,1 \sin(7\omega t - 61,18^\circ) A.$$



113 pav. Elektrovaros kreivė ir jos harmonikos

- Elektrovaros kreivė išskleista harmonikomis:

$$e = 2,96 \sin(\omega t - 59,61^\circ) + 0,033 \sin(2\omega t - 75,74^\circ) + 1,33 \sin(3\omega t - 16,45^\circ) + 0,69 \sin(5\omega t + 18,32^\circ) + 0,3 \sin(7\omega t + 55,71^\circ) V.$$



114 pav. Srauto kreivė susumavus harmonikas

- Magnetinio srauto kreivė išskleista harmonikomis:

$$\phi = 1,88 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t - 30,39^{\circ}) + 1,06 \cdot 10^{-5} \sin(2\omega t + 14,26^{\circ}) + 2,82 \cdot 10^{-4} \sin(3\omega t - 73,55^{\circ}) + 8,78 \cdot 10^{-5} \sin(5\omega t - 71,68^{\circ}) + 2,7 \cdot 10^{-5} \sin(\omega t - 34,29^{\circ}) \text{ Wb.}$$

- Apskaičiuojame, kokia dalį procentų nuo pirmos harmonikos sudarys aukštesnės eilės harmonikos:

63 lentelė. Procentinė srovės, elektrovaros ir srauto harmonikų išraiška. Kai  $I = 2,2 \text{ A}$

Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	<b>7,42</b>	<b>44,95</b>	<b>14,98</b>
5	<b>5,79</b>	<b>23,31</b>	<b>4,66</b>
7	<b>3,29</b>	<b>10,02</b>	<b>1,43</b>

- Palyginsime kaip pasikeitė magnetinio srauto, srovės ir elektrovaros harmonikų amplitudės prie  $R=0 \ \Omega$ .

64 lentelė. Procentinių išraiškų palyginimas. Kai  $R = 0\Omega$ .

<b>Kai transformatorius maitinamas <math>U_v</math></b>	Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
	1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	3	<b>36</b>	<b>5,38</b>	<b>2,2</b>
	5	<b>4,55</b>	<b>2,24</b>	<b>0,57</b>
	7	<b>0,96</b>	<b>0,51</b>	<b>0,44</b>
<b>Kai transformatorius maitinamas <math>+5\% \cdot U_v</math></b>	Harmonikos eilės numeris	i, %	e, %	$\phi$ , %
	1	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	3	<b>35,83</b>	<b>8,17</b>	<b>2,72</b>
	5	<b>4,22</b>	<b>3,23</b>	<b>0,65</b>
	7	<b>0,88</b>	<b>1,58</b>	<b>0,23</b>

#### 4. Išvados

- Didinant magnetinėje grandinėje aktyvią varžą, feromagnetinės šerdies apvijoje

nesinusinė srovė sukelia nesinusinius įtampos kritimus aktyviojoje varžoje, todėl kuo didesnė aktyvioji varža grandinėje tuo labiau iškraipyta magnetinio srauto ir elektrovaros kreivės, didėja aukštesniųjų nelyginių eilių harmonikų amplitudės.

- Grandinėje esant netiesiniam induktyvumui, kai aktyvioji varža lygi nuliui, tai srovės kreivės forma yra nesinusinė, įvedant ir didinant aktyviają varžą magnetinėje grandinėje, srovės kreivė artėja prie sinusinės.
- Kai padidinama vardinė įtampa penkiais procentais, didėja magnetinio srauto ir elektrovaros aukštesniųjų eilių harmonikų amplitudės, todėl kreivės dar labiau išsikraipo.

## 5. LITERATŪRA

1. Povilas Pukys, Jonas Stonys, Arvydas Virbalis “Teorinė elektrotechnika”, 2004 m., Kaunas.

2. P. Pukys “Teorinė elektrotechnika II” 1996 m., Kaunas.
3. J. Matulionis „Aukštoji matematika II“ 1968 m., Vilnius.
4. А. И. Вольдек “Электрические машины”, 1978 m.
5. S. Marazas “Elektros mašinos”, 1989 m., Vilniu.