

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

Antanas Lingevičius

**ASINCHRONINIO VARIKLIO PALEIDIMO  
TRUKMĖS TYRIMAS**

**Magistro darbas**

**Vadovas**

**doc. T.Šimkevičius**

ŠIAULIAI, 2006

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGOJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

**TVIRTINU**

Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_ doc. T.Šimkevičius

2006 06

**ASINCHRONINIO VARIKLIO PALEIDIMO  
TRUKMĖS TYRIMAS**

Magistro darbas

**Vadovas**

\_\_\_\_\_ doc. T.Šimkevičius

2006 06

**Atliko**

EM-0 gr. stud.

\_\_\_\_\_A. Lingevičius

2006 06 06

**Recenzentas**

\_\_\_\_\_doc. Z. Turauskas

2006 06

ŠIAULIAI, 2006

Lingevičius A. Investigation time of start the asynchronous motor: Master thesis of electrical engineer/research advisor Assoc. Prof. T. Šimkevičius; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department.- Šiauliai, 2006.-51p.

### **SUMMARY**

The starting time of the three – phase asynchronous motors can be determined using the equation of the movement of the electric drive putting down into this equation the mechanical characteristics of the mechanism and motor. The mechanical characteristics of the motor often are expressed by the Kloss formula, but this formula can't be used for the up to date asynchronous motors, wich have very different mechanical characteristics. The analysis of the method letting to express the mechanical characteristics of the motor as the sum of two components: one according Kloss formula, another – as a power function, are carried out. Using this expression of the mechanical characteristics of the induction motor and the equation of the movement of the drive, the method for determination of the starting time is developed.

## TURINYS

1. Įvadas .....	3
<b>2. TEORINĖ DALIS</b> .....	4
2.1. Elektros pavaros judesio lygtis .....	4
2.2. Asinchroninio variklio dirbančio variklio režimu mechaninė charakteristika .....	5
2.3. Pereinamojo proceso nagrinėjimas elektros pavarose su asinchroniniu varikliu esant pastoviam statiniam apkrovos momentui .....	9
2.4. Grafinis pavaros judėjimo lygties sprendimas .....	11
2.5. Asinchroninio variklio $M=f(s)$ aprašymas matematine lygtimi .....	14
2.6. Asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas, apkrovus variklį tiesiškai kintama apkrova .....	18
<b>3. PRAKTINIAI SKAIČIAVIMAI</b> .....	21
3.1. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio mechaninė charakteristika, pagal Klosso formulę .....	21
3.2. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio $M=f(s)$ aprašymas matematine lygtimi .....	26
3.3. Asinchroninio variklio paskaičiuotų dydžių paklaidos .....	35
3.4. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas, apkrovus variklį kintama apkrova .....	37
IŠVADOS .....	40
LITERATŪRA .....	41
PRIEDAI .....	42
1. Asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas .....	42

## Įvadas

Elektros pavara šiandien – tai svarbi greitai besivystanti technikos sritis, užimanti vieną svarbiausių vietų pramonėje, žemės ūkyje, statyboje, buityje ir pan. Šiuolaikinėse pramoninėse pavarose naudojami plataus galingumų diapazono varikliai – nuo vieno iki dešimties tūkstančių kilovatų. Įrengimams su didelio galingumo pavara keliami labai dideli patikimumo ir našumo reikalavimai. Ypač tai aktualu kai variklis dirba trumpalaikiame kartotiniame darbo režime.

Kai elektros pavara dažnai paleidžiama, dėl didelio rotoriaus slydimo atsiranda stiprios paleidimo srovės, kurios sukelia dideles dinamines jėgas, dėl jų papildomai kaista variklio statoriaus ir rotoriaus apvijos, pablogėja įrenginio energetiniai rodikliai.

Asinchroninio variklio paleidimo savybės vertinamos jo paleidimo charakteristikomis. Viena iš šių charakteristikų yra asinchroninio variklio paleidimo trukmė, nes variklio paleidimo trukmė turi didelę įtaką gamybinių mechanizmų darbo našumui, ypač jeigu atliekamas dažnas paleidimas.

Norint išanalizuoti elektros pavaros darbą, būtina rasti variklio greičio ir momento priklausomybę nuo laiko. Turint šias priklausomybes galime rasti pereinamojo proceso trukmę ir pobūdį, taip pat patikrinti ar variklis tinka duotojo mechanizmo darbo technologiniam režimui, įvertinti dinaminio režimo metu susidarancio momento, pagreičio ir srovės reikšmes, kurios lemia elektros pavaros mechaninę ir elektrinę perkrovą, teisingai parinkti reikiamo galingumo variklį.

Tiriamajame darbe elektros mašinoms taikomi dėsniai, principai ir taisyklės lieka nepakitusios, o į pateiktą literatūros sąrašą yra įtraukta literatūra, kuria rementis buvo atliekami skaičiavimai tyriamajame darbe.

## 2. TEORINĖ DALIS

### 2.1. Elektros pavaros judesio lygtis

Asinchroninio variklio paleidimo trukmė nustatoma yra pasinaudojant pavaros judesio lygtimi [1]. Elektros pavaros judėjimą apibūdina du veikiantys momentai: variklio išvystomas momentas ir pasipriešinimo momentas. Kadangi elektros pavaros sistemose pagrindinis elektros mašinos darbo režimas – variklio režimas, tai pasipriešinimo momentas yra stabdančio pobūdžio rotorius atžvilgiu ir veikia prieš variklio momentą. Todėl pasipriešinimo momento  $M_s$  teigiama kryptimi laikoma kryptis, priešinga teigiamai variklio momento krypčiai.

Jei pavaros kampinis greitis yra pastovus, tai variklio momentas  $M$  lygus apkrovos momentui  $M_s$ :

$$M = M_s ,$$

arba

$$M - M_s = 0. \quad (2.1)$$

Kai elektros pavaros kampinis greitis kinta, (2.1) lygtis papildoma trečiu nariu - dinaminio momentu  $M_{din}$ :

$$M - M_s = M_{din} . \quad (2.2)$$

čia  $M$ - variklio sukimo momentas, Nm;

$M_s$ - apkrovos statinis pasipriešinimo momentas, Nm;

(2.2) lygtis vadinama pagrindine pavaros judėjimo lygtis.

Pakeitus (2.2) lygtyje  $M_{din}$  , išraiška  $M_{din} = \frac{Jd\omega}{dt}$  , pavaros judėjimo lygtis tampa tokio pavidalo [1]:

$$M - M_s = \frac{Jd\omega}{dt} . \quad (2.3)$$

čia  $J$ - pavaros inercijos momentas,  $\text{kgm}^2$ ;

$\omega$ - kampinis greitis, rad/s

## 2.2. Asinchroninio variklio dirbančio variklio režimu mechaninė charakteristika

Asinchroninio variklio elektromagnetinį momentą sukuria rotoriaus apvijų srovės ir sukamojo magnetinio lauko sąveika. Elektromagnetinis momentas proporcingas elektromagnetiniam galiui [2,3]:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1} \quad (2.4)$$

čia  $P_{em}$  – elektromagnetinė galia, kuri randama yra taip:

$$P_{em} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{s},$$

čia  $I_2'$  – redukuota rotoriaus srovė;

$m_1$  – statoriaus apvijų fazių skaičius;

$R_2'$  – rotoriaus apvijų redukuota aktyvioji varža.

$\omega_1$  – statoriaus magnetinio lauko sukimosi kampinis greitis, kuris randamas taip

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$$

Kadangi sinchroninis greitis  $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$ , tai

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1 \cdot 60}{60p} = \frac{2\pi f_1}{p},$$

čia  $p$  – variklio polių skaičius.

Į (2.4) lygtį įrašome elektromagnetinės galios išraišką:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s} \quad (2.5)$$

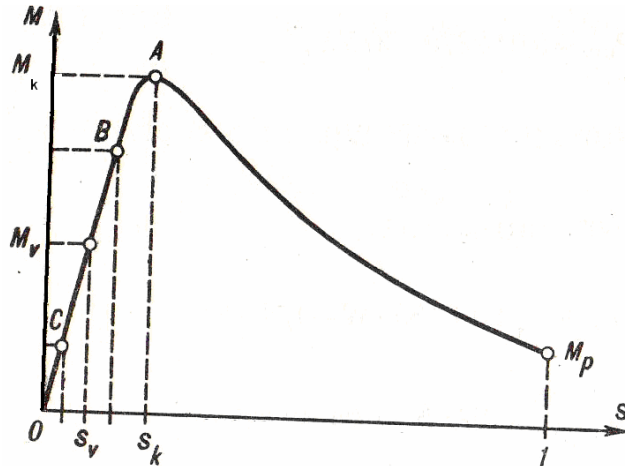
t.y. asinchroninio variklio elektromagnetinis momentas proporcingas elektrinių nuostolių rotoriaus apvijoje galiui.

Į (2.5) formulę įrašę srovės  $I_2'$  ir kampinio greičio  $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$  išraiškas gausime:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.6)$$

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (2.7)$$

Jei šitos formulės vardiklyje įrašysime skaičių 9,81, tai momentą gausime išreikštą Nm.



2.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

Naudodamiesi momento išraiška (2.7), galime nubraižyti variklio elektromagnetinio momento priklausomybės nuo slydimo grafiką  $M=f(s)$ , kuris vadinamas mechanine variklio charakteristika (2.1 pav) [2]. Ji sudaroma, tarus, kad visi (2.7) formulės dydžiai, išskyrus slydimą  $s$ , yra pastovūs, nes dydžiai  $m_1, R_1, R_2', X_1, X_2'$  yra gaunami, konstruojant variklį, o  $f_1$  ir  $U_1$  yra tinklo, kuris maitina variklį, nekintami parametrai.

Variklio paleidimo momentu  $n_2=0$ , ir  $s=1$ . Taigi išvystomas paleidimo momentas yra gaunamas iš (2.7) lygties ir jo išraiška yra užrašoma taip:

$$M_p = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 \left( (R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 \right)} \quad (2.8)$$

Variklio rotorius, veikiamas momento  $M_p$ , ima sukintis, slydimas mažėja, o momentas didėja. Kai slydimas pasiekia savo vertę  $s_k$ , momentas pasiekia maksimalinę reikšmę. Kritinį slydimą  $s_k$ , atitinkantį maksimalų momentą, galime rasti, paėmę iš (2.7) lygties momento išvestinę pagal  $s$  prilyginę ją nuliui:

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

Iš čia gauname:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.9)$$

Čia pluso ženklas atitinka asinchroninės mašinos darbą variklio režimu.

Nepaisydami varžos  $R_1$ , kuri paprastai nebūna didesnė kaip 10-12% nuo  $(X_1 + X_2')$ , gauname paprastesnę kritinio slydimo formulę:

$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (2.10)$$



Irašę (2.9) išraišką į (2.7) formulę, gausime maksimalų asinchroninio variklio elektromagnetinį momentą:

$$M_k = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (2.11)$$

Mechaninės charakteristikos lygtį (2.7) galime užrašyti paprastesniu ir patogesniu skaičiavimo pavidalu, paėmus  $M$  ir  $M_k$  santykį. Atitinkamai pertvarę, gausime šitokią mechaninės charakteristikos lygtį:

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k} \quad (2.12)$$

čia  $M_k$ ,  $s_k$ , ir  $a = \frac{R_1}{R_2'}$  yra nekintami parametrai, o  $s$  - kintamas.

Variklio režimo maksimalų momentą galima rasti pagal kataloginį dydį  $k_M = M_k / M_{\text{vard}}$ , vadinamą variklio perkrovimo koeficientu (leistinos apkrovos koeficientu):

$$M_k = k_M \cdot M_{\text{vard}} \quad (2.13)$$

Kadangi  $s_k$  reikšmė kataloguose nepateikiama, ją galime rasti iš (2.12) išraiškos, išsprendus pastarąją  $s_k$  atžvilgiu ir įrašius  $M = P_{\text{vard}} / \omega_{\text{vard}}$  bei  $s_{\text{vard}} = (\omega_0 - \omega_{\text{vard}}) / \omega_0$ . Tada iš (2.12) gauname  $s_k$ :

Mažos galios variklių:

$$s_k = s_{\text{vard}} \frac{k_M + \sqrt{k_M^2 - 1 + 2s_{\text{vard}}(k_M - 1)}}{1 - 2s_{\text{vard}}(k_M - 1)}; \quad (2.14)$$

Vidutinės ir didesnės galios variklių

$$s_k = s_{\text{vard}}(k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}). \quad (2.15)$$

Didelės galios variklių statoriaus apvijos varža nedidelė. Todėl praktiškai  $R_1 \ll X_k$  ir  $as_k \ll 1$ . Įvertinus tai, mechaninė charakteristika darosi dar paprastesnė (Klosso lygtis):

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.16)$$

1 pav. charakteristikos ruožas nuo  $s=0$  iki  $s=s_k$  vadinama stabiliaja charakteristikos dalimi. Šiame ruože nuo  $M=0$  ir  $M=M_k$  dydis  $s \ll s_{kr}$ , tuomet mechaninės charakteristikos tos dalies lygtis bus tiesės lygtis:

$$M = (2M_k / s_k) s. \quad (2.17)$$

Charakteristikos ruožas nuo  $s_k$  iki  $s=1$  panaudojamas tik paleidžiant variklį ir vadinamas nestabiliaja charakteristikos dalimi.

Asinchroninio variklių paleidimo savybės vertinamos pagal paleidimo momentą  $M_p$  ir pradinę  $I_{pal}$ , kai  $s=1$ . Paleidimo etapą atitinkančioje charakteristikos dalyje momentas ir srovė nėra proporcingi: tai paaiškinama geroku galios koeficiento sumažėjimu.

### 2.3. Matematinis pereinamojo proceso nagrinėjimas elektros pavarose su asinchroniniu varikliu esant pastoviam statiniam momentui

Pagal [4], kai  $M_s = \text{const}$  pavaros judesio lygtis su asinchroniniu varikliu turi tokį pavidalą:

$$\frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - M_s = -J\omega_0 \frac{ds}{dt} \quad (2.18)$$

Iš (2.18) lygties išsireiškus  $dt$  gauname išraišką:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \frac{(s^2 + s_k^2)}{s^2 - 2\frac{M_k}{M_s}ss_k + s_k^2} ds \quad (2.19)$$

Dėl to, kad privesti šią išraišką prie pavidalo, patogaus integruoti, suvienodiname skaitiklį ir vardiklį. Rezultate gauname išraišką:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \frac{(s^2 - 2\frac{M_k}{M_s}s_k s + s_k^2 + 2\frac{M_k}{M_s}s_k s)}{s^2 - 2\frac{M_k}{M_s}ss_k + s_k^2} ds \quad (2.20)$$

Supaprastinus (2.20) išraišką gauname:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot \frac{M_k}{M_s}ss_k}{s^2 - 2\frac{M_k}{M_s}ss_k + s_k^2} \right) ds \quad (2.21)$$

Toliau suskaidome gautą trukmeną į paprastesnes trukmenas. Randame vardiklyje esančios išraiškos šaknis spręsdami lygtį:

$$s^2 - 2\frac{M_k}{M_s}ss_k + s_k^2 = 0 \quad (2.22)$$

Šita lygtis charakterizuoja nusistovėjusį pavaros režimą ir gali būti gauta iš (2.18), jei sakysime, kad  $ds/dt = 0$ .

Išspręsta lygtis duoda dvi šaknis:

$$s_{c1,c2} = s_k \left[ \frac{M_k}{M_s} \pm \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_s}\right)^2 - 1} \right] \quad (2.23)$$

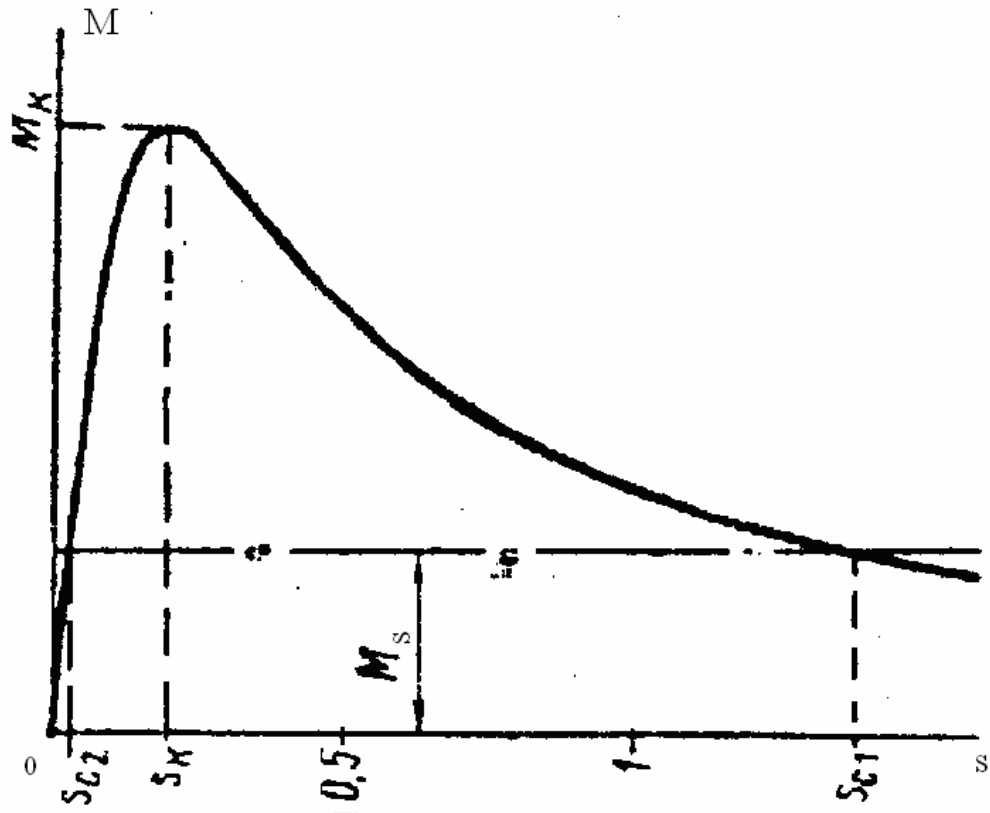
Teigiamo ženklo atveju  $M_s$  šaknis  $s_{c2}$  reiškia nusistovėjusią slidimo reikšmę. Antru atveju  $s_{c1}$  atitinka nenusistovėjusį režimą prie slydimo, viršijanti  $s_k$ , ir daugelyje atvejų aptinkami labai didelių slydimų zonoje 2.2 pav.

Dėl galimybės paleisti variklį, turime priimti tam tikras sąlygas:

$$s_{c1} > s_1,$$

čia  $s_1$ -pradinis slydimas, lygus vienetui.

Kai  $s_{c1} < 1$  variklio paleidimo momentas pasidaro mažesnis statinio momento, ir įsibėgėjimas variklio pasidaro neįmanomas 2.2 pav.



2.2 pav Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos taškai, atitinkantys nusistovėjusį darbo režimą.

Naudojant lygties (2.22) šaknis, išraišką (2.21) galime užrašyti sekančią išraišką:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \left( 1 + \frac{2M_k s_k}{M_s} \left( \frac{A}{s-s_{c1}} + \frac{B}{s-s_{c2}} \right) \right) ds \quad (2.24)$$

Dėl koeficientų A ir B išreiškimo galioja lygybė :

$$\frac{s}{(s-s_{c1})(s-s_{c2})} = \frac{A}{(s-s_{c1})} + \frac{B}{(s-s_{c2})}$$

iš kurios gauname:

$$s = A(s-s_{c2}) + B(s-s_{c1})$$

Priimame kad  $s=s_{c1}$ , gauname :

$$A(s_{c1} - s_{c2}) = s_{c1}$$

kur

$$A = \frac{s_{c1}}{(s_{c1} - s_{c2})} \quad (2.25)$$

Priėmus, kad  $s = s_{c2}$  gauname  $B(s_{c2} - s_{c1}) = s_{c2}$  ir

$$B = -\frac{s_{c2}}{(s_{c1} - s_{c2})} \quad (2.26)$$

Įstačius gautus koeficientus A ir B į (2.24) išraišką, gauname:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \left( 1 + \frac{2 \frac{M_k}{M_s} s_k}{(s_{c1} - s_{c2})} \left( \frac{s_{c1}}{(s - s_{c1})} - \frac{s_{c2}}{(s - s_{c2})} \right) \right) ds \quad (2.27)$$

Suintegravus (2.27) išraišką, intervale nuo  $s_1$  iki  $s_2$  gausime asinchroninio variklio paleidimo laiko trukmės išraišką:

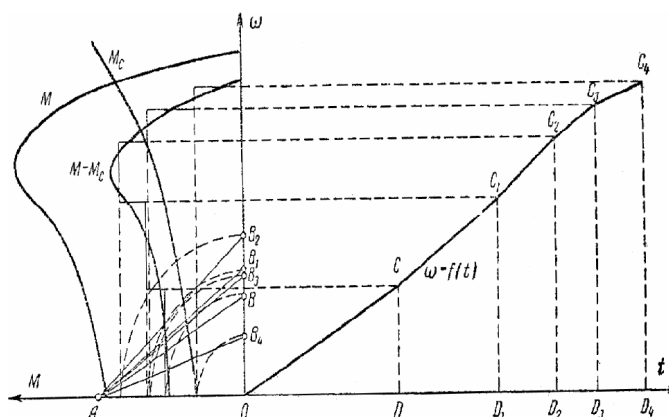
$$t = T_M \cdot \frac{M_K}{M_s} \left( \frac{s_2 - s_1}{s_k} + \frac{2 \frac{M_k}{M_s} s_k}{(s_{c1} - s_{c2})} \left( s_{c1} \ln \frac{s_{c1} - s_2}{(s_{c1} - s_1)} - s_{c2} \ln \frac{s_{c2} - s_2}{(s_{c2} - s_1)} \right) \right) \quad (2.28)$$

Kadangi paleidimo laikas teoriškai lygus begalybei, tai praktiškai, kad gauti realę reikšmę reikia vietoj  $s_{c2}$  įrašyti:

$$s_2 = s_{c2} + 0.05(s_1 - s_{c2}) = 0.95s_{c2} + 0.05s_1$$

## 2.4. Grafinis pavaros judėjimo lygties sprendimas

Jei negalime matematiškai išspręsti pavaros judesio lygties, tai sprendžiame pavyzdžiui, taip vadinamu proporcijų metodu arba baigtinio padidėjimo metodu [5]. Esmė šio metodo ta, kad be galo mažus greičio padidėjimus  $d\omega$  bei laiko  $dt$  pakeičiame mažais baigtiniais padidėjimais  $\Delta\omega$ ,  $\Delta t$ . Yra skaitoma, kad elektros pavaros lygtyje yra vidutinės variklio momento ir pasipriešinimo momento reikšmės, kiekvienam greičio pasikeitimo periodui. Šios vidutinės momento reikšmės paprastai randamos grafiniu būdu, pasinaudojant variklio bei gamybinio mechanizmo mechaninių charakteristikų kreivėmis.



2.3 pav. Grafinis greičio kreivės  $\omega=f(t)$  radimas proporcijų metodu

Proporcijų metodas remiasi elektros pavaros judesio lygtimi.

$$M - M_C = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (2.29)$$

Skaitant, kad kai kuriuose laiko intervaluose  $\Delta t$ , momentų skirtumas  $M - M_C$  lieka pastovus dydis, tai gauname proporciją.

$$\frac{M - M_C}{J} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (2.30)$$

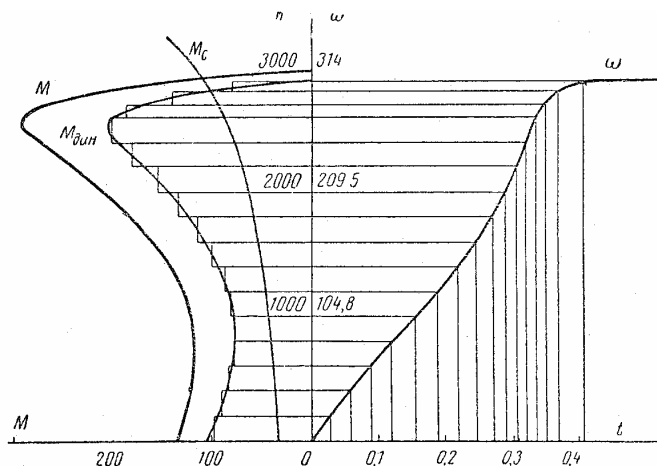
2.3 pav. pateikta greičio priklausomybė nuo laiko  $\omega=f(t)$  ir variklio paleidimo laikas surandamas proporcijų (2.30) pagrindu. Kairiajame 2.3 pav. kvadrate braižomos  $M=f(\omega)$  ir  $M_C=f(\omega)$  charakteristikos. Grafiškai randamas jų skirtumas. Skirtumas  $M - M_C=f(\omega)$  – dinaminio momento kreivė pavaizduota tame pačiame kvadrate. Paskutinę kreivę pakeičiame laiptuota su ruožais  $M - M_C = \text{const}$ . Nuo ruožų skaičiaus priklauso nubraižymo tikslumas ir galutiniai rezultatai. Tikslumas tuo didesnis kuo daugiau yra suskaidyta kreivė  $M - M_C=f(\omega)$ .

Gautus atskiruose ruožuose dinaminio momento reikšmės yra atidedamos į viršų pagal ordinačių ašį. Taip 1-am ruožui gauname atkarpą  $OB$ , 2-am  $OB_1$  ir t.t. Pažymėti ordinačių ašyje taškai  $B, B_1, B_2$  sujungiami su tašku  $A$ , kuris yra nuo ordinačių ašies nutolęs atstumu proporcingu dydžiui  $J$ . Po to, iš ordinačių pradžios brėžiame tiesę  $OC$  lygiagrečia  $AB$ . Paskutinė tiesė

charakterizuoja ieškomą funkciją  $\omega=f(t)$  1-am momentų ruožui. Tai yra iš trikampio panašumo AOB ir ODC.

Iš tikrųjų  $\frac{OB}{OA} = \frac{CD}{OD}$ , bet  $OB = M - M_C$ ;  $OA = J$ ,  $CD = \Delta\omega$ , todėl atkarpa OD pagal lygtį

(2.30) atitinka paleidimo laiką 1-ame ruože, t.y  $OD = \Delta t_1$ .



2.4 pav. Grafinis greičio kreivės  $\omega=f(t)$  radimas ploto metodu

Pravedant analogišką darbą kitiems ruožams  $M-M_C$ , brėžiame variklio sukimosi greičio kreivę ir randame ieškomą pavaros paleidimo laiką.

Braižant reikia įvertinti mastelio dydžius surištus tarpusavyje:

$$\frac{m_M}{m_J} = \frac{m_\omega}{m_t}$$

čia  $m_M$ - momento mastelis;  
 $m_J$ - mastelis inercijos momento;  
 $m_\omega$ - variklio sukimosi greičio mastelis;  
 $m_t$ - laiko mastelis.

Jeigu pasirinkus trejų dydžių mastelius: momento, greičio, laiko, tai iš parodyto santykio randame ketvirtą dydį – inercijos momentą. Panašus greičio kreivės braižymas paleidimo laiko nustatymui tinka ir nuolatinės srovės varikliui. Jeigu mechaninė charakteristika negali būti išreikšta analitiškai.

Be proporcijų metodo greičio kreivės sukūrimui  $\omega=f(t)$  ir variklio paleidimo laiko nustatymui naudojamas ploto metodas, kuris privedamas prie grafo-analitinio judesio lygties integravimo.

Yra braižomos mechaninės variklio ir mechanizmo charakteristikos. Po to iš šių dviejų charakteristikų yra randama dinaminio momento kreivė  $M_{dim}=M-M_c$  (2.4pav.).

Dinaminio momento kreivė daloma į eilę atkarpų, ir kiekvienoje atkarpų momentas sąlyginai pastovus ir lygus vidutinei reikšmei.

Kiekvienam atkarpos ruožui bus teisinga sekanti išraiška.

$$\Delta t = \frac{\Delta \omega}{M - M_C}.$$

Prie vienodų  $\Delta \omega$  reikšmių, visose ruožuose (tarpuose) paleidimo laikas bus randamas, pagal formulę.

$$t = \sum_1^m \Delta t = J \Delta \omega \sum_1^m \frac{1}{M - M_C}.$$

čia  $m$ - atkarpų skaičius;

$\Delta \omega = \text{const}$  greičio pokytis kiekviename ruože;

$M - M_C$  – atitinkama dinaminio momento reikšmė kiekviename ruože.



## 2.5. Asinchroninio variklio $M=f(s)$ aprašymas matematine lygtimi

Šiuolaikinių trifazių asinchroninių variklių gamintojai, savo kataloguose pateikia ne tik gaminamų trifazių asinchroninių variklių nominaliuosius duomenis ir santykinės paleidimo bei maksimaliojo momento vertes, bet ir variklių mechaninių charakteristikų  $M=f(s)$  grafikus. Grafiniams pereinamųjų procesų skaičiavimams kataloge duotų  $M=f(s)$  kreivių visiškai pakanka, tačiau tiksliesiems skaičiavimams reikia turėti šios kreivės matematinę išraišką. Tam dažniausiai naudojama Klossio formulė:

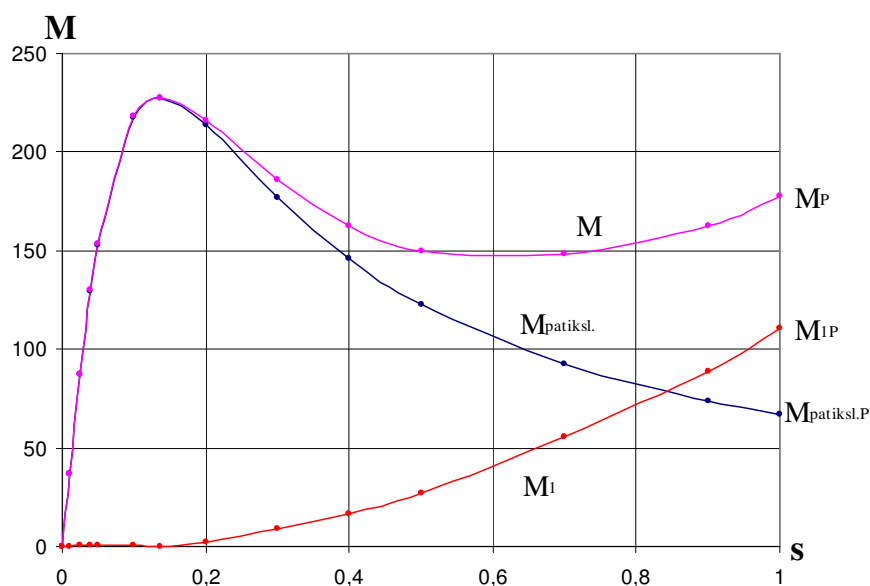
Patikslinta Klossio (2.12) formulė:

$$M_{\text{patiksl.}} = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k};$$

arba pagal paprastesnę Klossio (2.16) formulę:

$$M_{\text{paprast.}} = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}.$$

Tarkime, kad  $M$  kreivė 2.5 pav. yra realaus asinchroninio variklio mechaninė charakteristika, kurią galime gauti iš katalogo. Iš katalogo kreivės suradę  $s_k$  bei  $M_k$  ir apskaičiavę pagal (2.12) arba (2.16), gauname  $M_{\text{patiksl.}}$  arba  $M_{\text{paprast.}}$  kreivę. Kreivės  $M=f(s)$  ir  $M_{\text{patiksl.}}=f(s)$  sutampa slydimų diapazone  $0 < s < s_k$  ir gerokai skiriasi, kai  $s_k < s < 1$ ; skirtumas didėja, didėjant slydimui. Skaičiuojant pereinamąjį procesą pagal  $M_{\text{patiksl.}}=f(s)$  arba  $M_{\text{paprast.}}=f(s)$  kreivę, rezultatai labai skiriasi nuo tikrųjų, todėl būtina kaip galima tiksliau matematiškai išreikšti momento priklausomybę nuo slydimo.



2.5 pav.  $M$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{\text{patiksl.}}=f(s)$ -momentas, apskaičiuotas pagal patikslintą Klossio formulę; momentas  $M_1$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{\text{patiksl.}}$  skirtumui.

Asinchroninio variklio momentą galime išreikšti kaip dviejų dedamųjų sumą:

$$M = M_{patiksl.} + M_1 \quad (2.31)$$

čia  $M$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;

$M_{patiksl.} = f(s)$ - momentas, apskaičiuotas pagal patikslintą Klosso formulę; momentas  $M_1$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{patiksl.}$  skirtumui:

$$M_1 = M - M_{patiksl.} \quad (2.32)$$

Momento  $M_1$  priklausomybę nuo slydimo galime išreikšti taip:

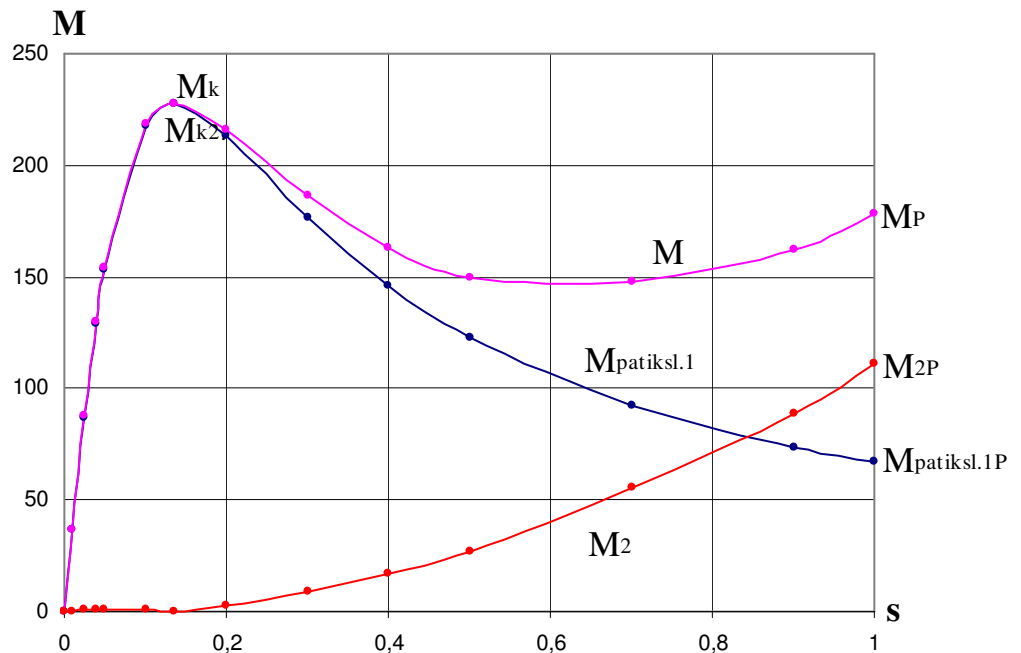
$$M_1 = M_{1P} \cdot \frac{(s - s_k)^u}{(1 - s_k)^u} \quad (2.33)$$

čia  $M_{1P} = M_P - M_{patiksl.P}$ ,

$M_P$  – tikrasis variklio paleidimo momentas;

$M_{patiksl.P}$  – paleidimo momentas apskaičiuotas pagal patikslintą Klosso formulę;

$u$  – skaičius, nuo kurio priklauso  $M_1=f(s)$  pobūdis.



2.6 pav. Asinchroninio variklio mechaninių charakteristikų modifikavimas

Taigi atstojamasis variklio momentas:

$$M_{atstoj.} = \frac{2 \cdot M_k (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{1P} \cdot \frac{(s - s_k)^u}{(1 - s_k)^u} \quad (2.34)$$

Gautoji momento  $M_{atstoj.}$  išraiška nepatogi naudotis, nes  $M_1$  galioja slydimų diapazone nuo  $s_k$  iki 1 ir negalioja kai  $0 < s < s_k$ . Todėl lygtį  $M=f(s)$  reikia pertvarkyti taip, kad abi momento dedamosios galiotų slydimo diapazone nuo 0 iki 1. Tam tikslui momentą  $M_1$  reikia pakeisti taip, kad prasidėtų iš taško  $s=0$ .

Momento  $M_2$  lygtis šiuo atveju

$$M_2 = M_{2P} \cdot s^u \quad (2.35)$$

Ši  $M_2$  išraiška pakeičia ir maksimalųjį  $M_k$  ir  $M_{k2}$ .  $M_2=f(s)$  momentą paleidimo taške nustatome taip:

$$M_{2P} = M_{1P} + \Delta M \quad (2.36)$$

čia  $\Delta M$  yra kreivių  $M_{patiksl.} = f(s)$  ir  $M_{patiksl.1} = f(s)$  paleidimo momentų skirtumas, kuris gaunamas dėl pasikeitusio maksimaliojo momento  $M_{k2}$ .

Dydį  $\Delta M$  nustatome pasinaudoję (2.12) lygtimi, imdami paleidimo momentų skirtumą, kai  $s=1$ , kai maksimalieji momentai  $M_k$  ir  $M_{k2}$ . (2.5 pav).

$$\Delta M = \frac{2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k}{1 + 3 \cdot s_k^2} \cdot (M_k - M_{k2}) \quad (2.37)$$

Kadangi momento  $M_2$  kreivė prasideda iš taško  $s=0$ , tai maksimaliojo momento pasikeitimą galime išreikšti taip:

$$M_{k2} = M_k - M_{2P} \cdot s_k^u \quad (2.38)$$

Įrašę (2.38) į (2.37) gauname

$$\Delta M = \frac{2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}}{1 + 3 \cdot s_k^2} \cdot M_{2P} \quad (2.39)$$

o iš (2.36) lygties tą patį momentų skirtumą  $\Delta M$  išreiškiame taip:

$$\Delta M = M_{2P} - M_{1P} \quad (2.40)$$

Prilyginę (2.39) ir (2.40) lygčių dešines puses ir iš gautos lygybės išreiškę  $M_{2P}$ , gauname:

$$M_{2P} = \frac{1 + 3 \cdot s_k^2}{1 + 3 \cdot s_k^2 - 2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}} \cdot M_{1P} \quad (2.41)$$

Laipsnio rodiklį  $u$  galime nustatyti iš formulės:

$$u = \frac{1}{\ln s} \ln \frac{M_1}{M_{1P}} \quad (2.42)$$

Norint gauti tikslesnį rezultatą,  $u$  apskaičiuojamas keletui slydimo taškų, imant  $s > s_k$ ; paskui apskaičiuojama vidutinė laipsnio reikšmė ir kaip  $u$  imamas artimiausias skaičius.

Įvertinę (2.36) ir (2.38), gauname tokią asinchroninio variklio išraišką:

$$M_{atstoj.} = \frac{2 \cdot M_{k2} (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{2P} \cdot s^u \quad (2.43)$$

Gautoje asinchroninio variklio momento  $M$  išraiškoje (2.43) abi momento dedamosios yra slydimo  $s$  funkcijos ir jos galioje visame variklio slydimų diapazone nuo 0 iki 1. Tokia išraiška yra patogi naudoti skaičiuojant pereinamuosius procesus.

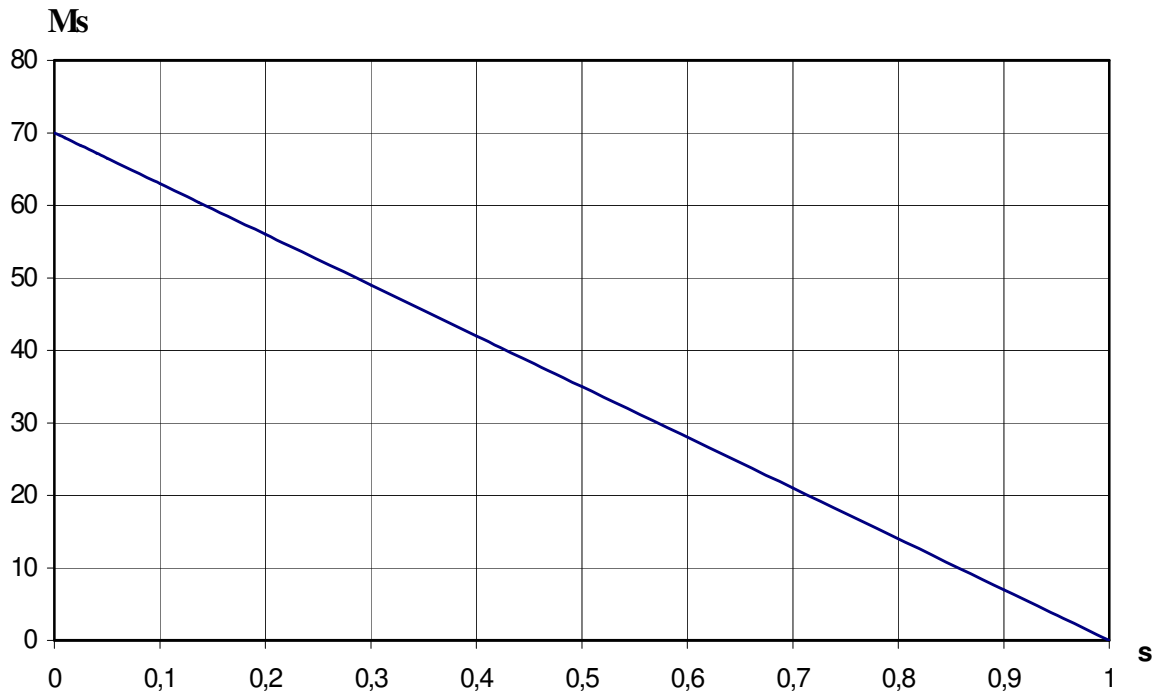
Analogiški veiksmai būtų atliekami vietoj  $M_{patiksl.}$  išraiškos įrašius  $M_{paprast.}$  išraišką.

## 2.6. Asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas, apkrovus variklį tiesiškai kintama apkrova

Matematiškai aprašius 2.5 poskyriuje asinchroninio variklio  $M=f(s)$ , paleidimo laiką apskaičiuosime pasinaudodami (2.3) pavaros judesio lygtimi:

$$M = M_s + \frac{Jd\omega}{dt};$$

Asinchroninio variklio apkrovos momentas kinta tiesine priklausomybe nuo slydimo  $M_s=f(s)$ .  $M_s=f(s)$  priklausomybė pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 Tiesinė apkrovos momento priklausomybė nuo slydimo  $M_s=f(s)$ .

(2.7) paveiksle tiesine  $M_s=f(s)$  priklausomybe nuo slydimo, aprašome lygtimi:

$$M_s = M_v(1 - s) \quad (2.44)$$

čia  $M_v$ - apkrovos vardinis momentas

Įrašius į (2,3) lygtį gautas (2.43) ir (2.44) išraiškas, gauname bendrą pavaros judesio lygtį, tokio pavidalo:

$$\frac{2 \cdot M_{k2}(1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{2P} \cdot s^u - M_v \cdot (1 - s) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.45)$$

Kadangi kairėje lygties pusėje turime slydimus, o dešinėje- variklio kampinį sūkių greitį  $\omega$ , tai  $d\omega/dt$  išreiškiame per slydimą s:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega_1 ds}{dt} \quad (2.46)$$

Irašę šią išraišką į (2.45) lygtį gauname:

$$\frac{2 \cdot M_{k2}(1+s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{2P} \cdot s^u - M_v \cdot (1-s) = -J\omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (2.47)$$

Lygtyje (2.47) atlikus matematinius pertvarkymus, gauname diferencialinę lygtį:

$$dt = -J \cdot \omega_1 \left( \frac{s^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s + s_k^2}{M_{2P} \cdot s^{u+2} + 2 \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^{u+1} + M_v \cdot s^3 + M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^u - M_v \cdot s^2 + 2M_v \cdot s_k^2 \cdot s^2 +} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{+ [2 \cdot M_{k2} \cdot (1+s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2] \cdot s - M_v \cdot s_k^2} \right) ds \quad (2.48)$$

(2.48) lygtį galima užrašyti taip:

$$dt = -J \cdot \omega_1 \frac{G(s)}{H(s)} ds \quad (2.49)$$

čia

$$G(s) = s^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s + s_k^2$$

$$H(s) = M_{2P} \cdot s^{u+2} + 2 \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^{u+1} + M_v \cdot s^3 + M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^u - M_v \cdot s^2 + 2M_v \cdot s_k^2 \cdot s^2 + \\ + [2 \cdot M_{k2} \cdot (1+s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2] \cdot s - M_v \cdot s_k^2$$

Integruodami (2.49) lygtį, kai slydimas s kinta nuo 1 iki s, gauname įsibigėjimo trukmės iki variklis pasieks slydimą s, t.y.

$$t = -J\omega_1 \int_1^s \frac{G(s)}{H(s)} ds \quad (2.50)$$

Lygčiai (2.50) integruoti, polinomų santikį išskaidome į dedamųjų sumą:

$$\frac{G(s)}{H(s)} = \frac{A_1}{s-s_1} + \frac{A_2}{s-s_2} + \dots + \frac{A_i}{s-s_i} + \dots + \frac{A_{u+2}}{s-s_{u+2}} \quad (2.51)$$

čia

$s_1; s_2; \dots; s_i; \dots; s_u; s_{u+1}; s_{u+2}$  - vardiklio polinomo  $H(s)=0$  šaknys;

$A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{u+2}$  - skaidymo koeficientai.

Skaidymo koeficientus galime rasti taip:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} \quad (2.52)$$

čia

$G(s_i)$ - yra skaitiklio polinomo vertė, kai  $s=s_i$ ;

$H'(s_i)$ - vardiklio polinomo išvestinė

$$H'(s) = (u+2) \cdot M_{2P} \cdot s^{u+1} + 2 \cdot (u+1) \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^u + 3 \cdot M_v \cdot s^2 + u \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s^{u-1} - \\ - 2 \cdot M_v \cdot s + 4 \cdot M_v \cdot s_k^2 \cdot s + 2 \cdot M_{k2} \cdot (1+s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2$$

Gavus reikiamus duomenis, atliekame (2.50) lygties integravimą:

$$t = -J\omega_1 \int_1^s \left[ \frac{A_1}{s-s_1} + \frac{A_2}{s-s_2} + \dots + \frac{A_{u+2}}{s-s_{u+2}} \right] ds = -J\omega_1 \left( A_1 \int_1^s \frac{ds}{s-s_1} + A_2 \int_1^s \frac{ds}{s-s_2} + \dots + A_{u+2} \int_1^s \frac{ds}{s-s_{u+2}} \right) =$$

$$= -J\omega_1 \left( (A_1 (\ln(s-s_1) - \ln(1-s_1))) + (A_2 (\ln(s-s_2) - \ln(1-s_2))) + (A_{u+2} (\ln(s-s_{u+2}) - \ln(1-s_{u+2}))) \right)$$

Suintegravę (2.50) lygybę intervale nuo 1 iki s, gauname kintama apkrova apkrauto variklio paleidimo laiką:

$$t = -J\omega_1 \left[ A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + \dots + A_{u+2} \ln \frac{s-s_{u+2}}{1-s_{u+2}} \right] \quad (2.53)$$

Rotoriaus slydimą s pakeičiame, sukimosi greičiu:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.54)$$

čia  $n_2$ -rotoriaus sukimosi greitis;

$n_1$ -oro tarpo magnetinio lauko sukimosi greitis

kur

$$n_2 = n_1 - s \cdot n_1 \quad (2.55)$$

Taigi iš gautųjų (2.53) ir (2.55) išraiškų galime sudaryti greičio priklausomybę nuo laiko  $n_2=f(t)$ .

Teoriškai pilnas pereinamojo proceso laikas yra lygus begalybei. Kol pereinamasis procesas baigiasi prie gautos momentų lygybės ( $M=M_s$ ), tai dydis, stovintis po integralo ženklų siekia begalybę. Praktiniuose skaičiavimuose paprastai skaitoma, kad paleidimo trukmė baigiasi, kai greitis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ( $0,95n_2$ ), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę.

### 3. PRAKTINIAI SKAIČIAVIMAI

#### 3.1. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio mechaninė charakteristika, pagal Klosso formulę

Asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi, mechaninė charakteristika skaičiuojama ir braižoma pagal variklio katalogo duomenis. Iš (2.9) ir (2.15) formulių apskaičiuojamas  $s_k$ . Po to, imant įvairias  $s$  reikšmes nuo 0 iki 1 pagal (2.12) arba (2.16) formules apskaičiuojama momento  $M$  reikšmė variklio režimui. Tačiau daugelis šiuolaikinių asinchroninių variklių yra pateikiami jau su nubrėžta mechanine charakteristika.

Todėl šiame skyriuje atlieku skaičiavimus, kurie leis patikrinti ar duota asinchroninio variklio su trumpai sujungtu rotoriumi mechaninė charakteristika sutampa lyginant su charakteristikomis apskaičiuotomis pagal (2.12) ir (2.16) formules naudojant šio variklio duomenis.

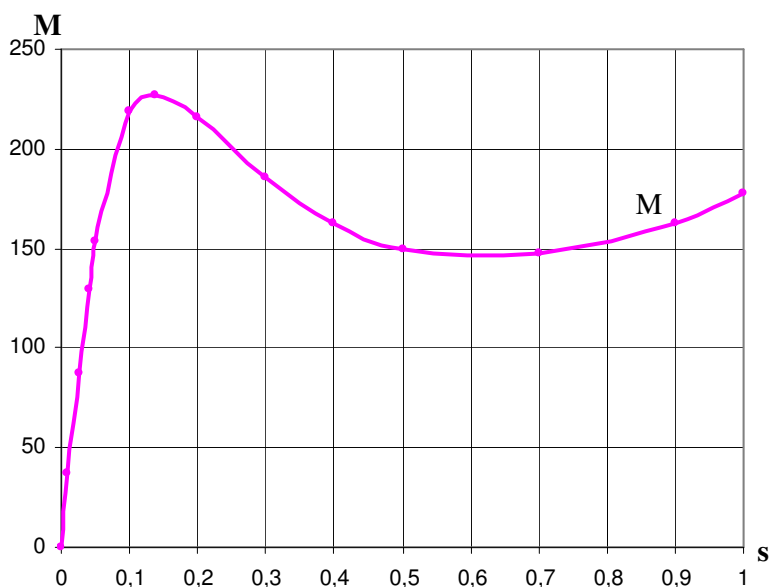
Skaičiavimuose naudojamo variklio duomenis pateikti 3.1 lentelėje, variklio mechaninė charakteristika pateikta 3.1 paveiksle.

3.1 Lentelė

Variklio duomenys

Variklio tipas	$P_N$	$M_{vard.}$	$n_N$	$s_k$	$J_N$	$M_0/M_N$	$M_k/M_{vard.}$
1LA5-183-2AA-11	22 kW	71 Nm	2940 aps./min	0,137	0,077	2,5	3,2

Šio variklio mechaninė charakteristika 3.1 paveiksle:



3.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika



Iš 3.1 pav. duotas variklio momento reikšmes surašau į 3.2 lentelę, imant įvairias  $s$  reikšmes nuo 0 iki 1.

### 3.2 Lentelė

#### Variklio mechaninė charakteristika iš katalogo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$s$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_k$ Nm	0	37	87,5	130	153,7	218,5	227,2	216	186	163	150	148	162,5	178

Pasinaudodamas duotais variklio duomenimis iš 3.1 lentelės apskaičiuoju variklio momentą. Skaičiavimai atliekami naudojant (2.12) formulę t.y patikslintą Klosso formulę:

$$M_{patiksl.} = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}$$

čia  $a=1$ , nes  $a = \frac{R_1}{R_2}$ , o  $R_1$  galingsiems varikliams yra visai nedidelis.  $s$  reikšmės į formulę įrašomos yra iš 3.2 lentelės, o  $s_k$  iš 3.1.

Kad apsiskaičiuoti variklio momentą, apskaičiuoju variklio režimo maksimalų momentą. Variklio režimo maksimalų momentą galima rasti pagal kataloginį dydį  $k_M = M_k / M_{vard}$ , vadinamą variklio perkrovimo koeficientu (leistinos apkrovos koeficientu). Iš šios išraiškos išsireiškiame  $M_k$ :

$$M_k = k_M \cdot M_{vard} = 3,2 \cdot 71 = 227,2 \text{ Nm}$$

čia  $k_M$  iš 3.1 lentelės yra lygus  $M_k / M_{vard}$  o t.y. 3,2.

Gautą  $M_k$  rezultatą įrašau į (2.12) formulę ir apskaičiuoju momento reikšmę variklio režimui, kai  $s = 0,01$ :

$$M_{patiksl.} = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k} = \frac{2 \cdot 227,2 \cdot (1 + 0,137)}{\frac{0,01}{0,137} + \frac{0,137}{0,01} + 2 \cdot 0,137} = 36,78 \text{ Nm}$$

Toliau atliekami analogiški skaičiavimai su pasirinktomis  $s$  reikšmėmis. Rezultatai atitinkantys  $s$  reikšmes pateikti 3.3 lentelėje.

### 3.3 Lentelė

#### Variklio mechaninė charakteristika, apskaičiuota pagal patikslintą Klosso formulę

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$s$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_{patiksl.}$ Nm	0	36,78	87,03	129,46	152,9	217,64	227,2	213,59	176,91	146,10	123,08	92,60	73,85	67,01

Analogiškai skaičiavimai atliekami naudojant (2.16) formulę t.y paprastesnę Klosso formulę:

$$M_{\text{paprast.}} = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Skaičiavimo pavyzdyje apskaičiuoju momento reikšmę variklio režimui, kai  $s = 0,01$ :

$$M_{\text{paprast.}} = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} = \frac{2 \cdot 227,2}{\frac{0,01}{0,137} + \frac{0,137}{0,01}} = 32,99 \text{ Nm}$$

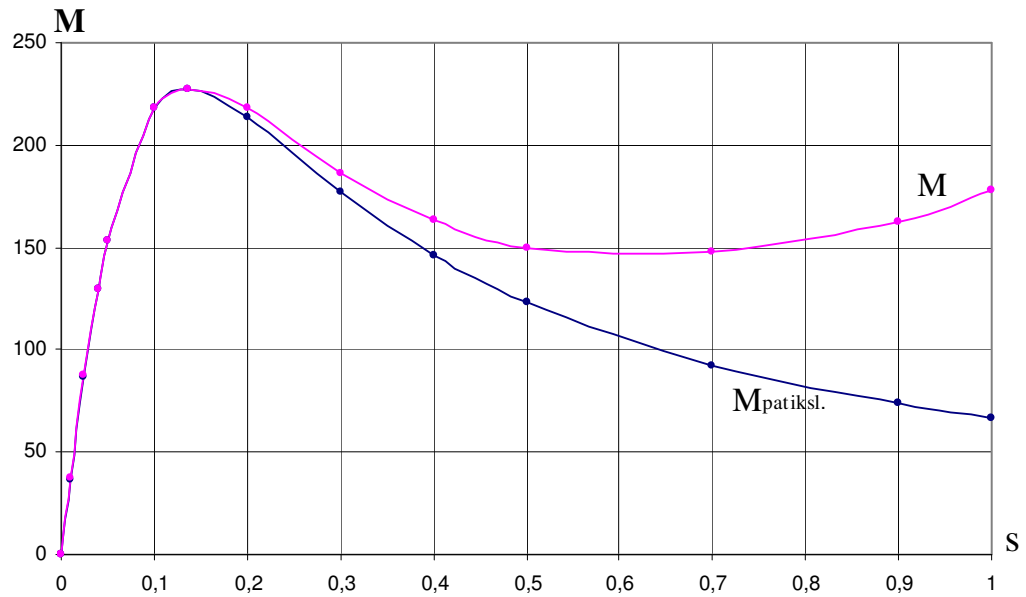
Toliau atliekami analogiški skaičiavimai su pasirinktomis  $s$  reikšmėmis. Rezultatai atitinkantys  $s$  reikšmes pateikti 3.4 lentelėje.

### 3.4 Lentelė

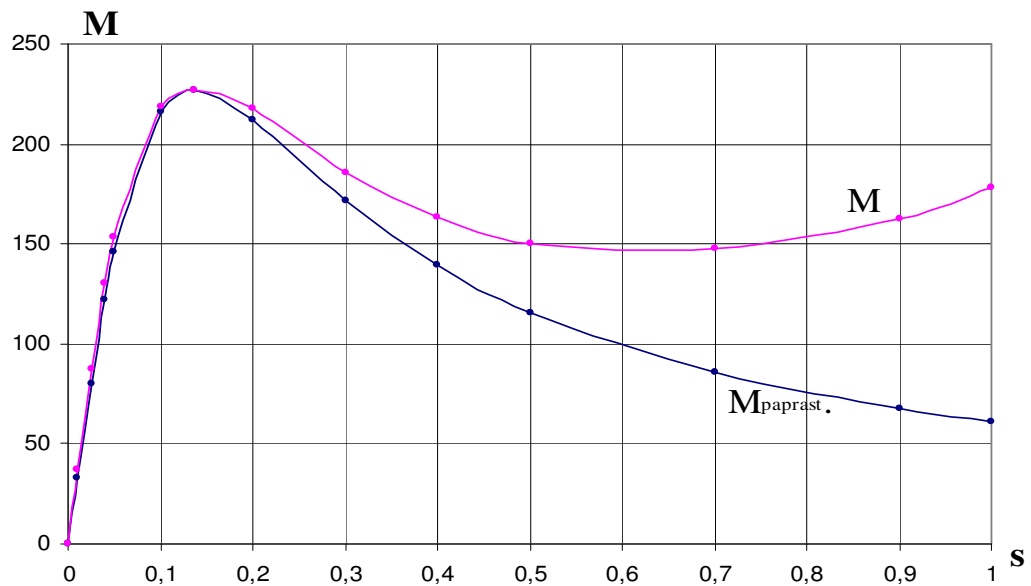
#### Variklio mechaninė charakteristika, apskaičiuota pagal paprastą Klosso formulę

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$s$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_{\text{paprast.}}$ Nm	0	32,99	80,25	122,25	146,35	216,39	227,2	211,86	171,70	139,29	115,81	85,65	67,60	61,11

Gautus rezultatus 3.2 ir 3.3 lentelėse, atidedu 3.2 ir 3.3 paveiksle.



3.2 pav. Asinchroninio variklio  $M$ ,  $M_{\text{patiksl.}}$  mechaninės charakteristikos



3.3 pav. Asinchroninio variklio  $M$ ,  $M_{\text{paprast.}}$  mechaninės charakteristikos

Atlikus skaičiavimus matome, kad apskaičiuotos variklio mechaninės charakteristikos  $M_{\text{patiksl.}}$ ,  $M_{\text{paprast.}}$  nesutampa su duota  $M$  variklio mechanine charakteristika. Tačiau šių Klosso išraiškų pakaktų variklio momentui aprašyti, jei pereinamuosius procesus skaičiuotume tik variklio stabiliam darbo režime, kai slydimas  $s < s_k$ . Kadangi paleidimo trukmės skaičiavimui svarbi yra

nestabilios variklio mechaninės charakteristikos darbo dalis, kai slydimas  $s > s_k$ , tai būtinas tikslesnis variklio mechaninės charakteristikos matematinės išraiškos aprašymas.

### 3.2. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio $M=f(s)$ aprašymas matematine lygtimi

Atlikus 3.1. poskyriuje skaičiavimus, matome, kad duota asinchroninio variklio mechaninė charakteristika nesutampa su apskaičiuotomis t.y.  $M=f(s)$  nesutampa su  $M_{patiksl.}=f(s)$  ir  $M_{paprast.}=f(s)$ . Skaičiuojant pereinamąjį procesą pagal  $M_{patiksl.}$  ir  $M_{paprast.}$  kreivę, rezultatai labai skirtusi nuo tikrųjų, todėl būtina kaip galima tiksliau matematiškai išreikšti momento priklausomybę nuo slydimo.

Pasinaudodami 3.2 paveikslu pagal (2.31) formulę asinchroninio variklio momentą galime išreikšti kaip dviejų dedamųjų sumą:

$$M = M_{patiksl.} + M_1$$

čia-  $M$  - momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{patiksl.}=f(s)$ - momentas, apskaičiuotas pagal patikslintą Klosso formulę; pagal 2.33 formulę momentas  $M_1$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{patiksl.}$  skirtumui.  $M$ ,  $M_{patiksl.}$  reikšmės paimtos iš 3.2, 3.3 lentelių.

$$M_1 = M - M_{patiksl.} = 37 - 36.78 = 0.22 \text{ Nm}$$

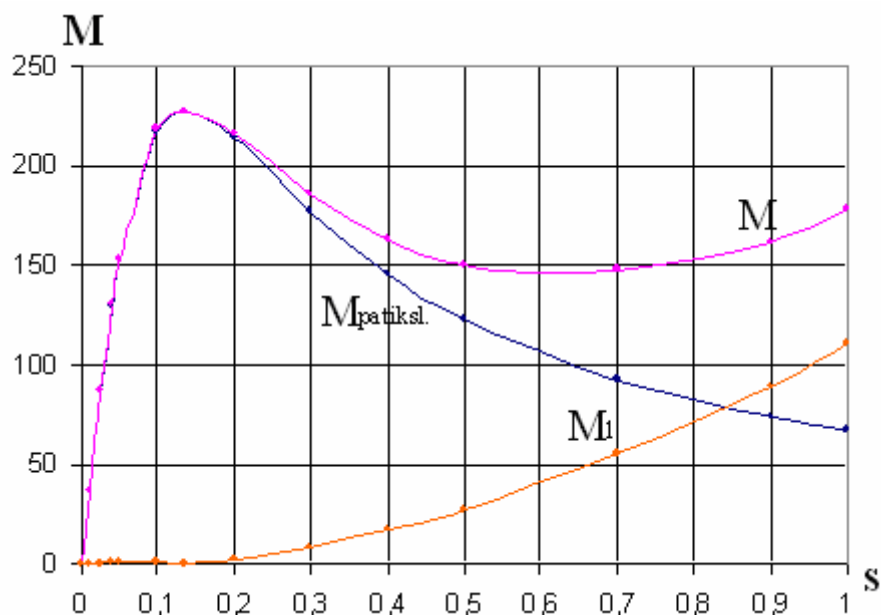
Gautus rezultatus surašau į 3.5 lentelę.

### 3.5 Lentelė

#### Variklio momento $M$ ir $M_{patiksl.}$ skirtumas

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$s$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M$ , Nm	0	37	87,5	130	153,7	218,5	227,2	216	186	163	150	148	162,5	178
$M_{patiksl.}$ , Nm	0	36,78	87,03	129,46	152,9	217,64	227,2	213,59	176,91	146,10	123,08	92,60	73,85	67,01
$M_1$ , Nm	0	0,22	0,47	0,54	0,79	0,86	0	2,40	9,09	16,89	26,91	55,39	88,64	110,99

Gautus rezultatus atidedu 3.4 paveiksle.



3.4 pav. M-momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{\text{patiksl.}} = f(s)$ - momentas, apskaičiuotas pagal patikslintą Klosso formulę; momentas  $M_1$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{\text{patiksl.}}$  skirtumui

Variklio mechaninę charakteristiką aprašysime pasinaudodami (2.43) formule:

$$M_{\text{astoj.}} = \frac{2 \cdot M_{k2} (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{2P} \cdot s^u$$

$M_1$  momentą pakeičiame taip, kad jis prasidėtų iš taško  $s=0$ . Momentų pasikeitimui įvedame naują žymėjimą  $M_2$ . Pagal (2.35) formulę momento  $M_2$  lygtis bus tokia:

$$M_2 = M_{2P} \cdot s^u$$

Naudodamiesi (2.42) formulę apskaičiuoju laipsnio rodiklį  $u$ . Siekiant gauti tikslesnį rezultatą,  $u$  apskaičiuoju keletui slydimo taškų, imant  $s > s_k$ , kai  $s=0.3; 0.5; 0.7; 0.9$ . Paskui apskaičiuojama vidutinė laipsnio reikšmė ir  $u$  imamas artimiausias sveikas skaičius.

$$u = \frac{1}{\ln s} \ln \frac{M_1}{M_{1P}} = \frac{1}{\ln 0.3} \cdot \ln \frac{9.09}{110.99} = 2.001$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.5} \cdot \ln \frac{26.91}{110.99} = 2.040$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.7} \cdot \ln \frac{55.39}{110.99} = 1.947$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.9} \cdot \ln \frac{88.64}{110.99} = 2.14$$

$$u = \frac{2.001 + 2.040 + 1.947 + 2.14}{4} = 2.032$$

tai

$$u=2$$

čia  $M_1$  reikšmės paimtos iš 3.5 lentelės;  $M_{1P}$ -tai paleidimo momentas, kai  $s=1$  ir paimtas iš 3.5 lentelės.

$M_{2P}$  momentą paleidimo taške nustatome pagal (2.41) formulę:

$$M_{2P} = \frac{1 + 3 \cdot s_k^2}{1 + 3 \cdot s_k^2 - 2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}} \cdot M_{1P} = \frac{1 + 3 \cdot 0.137^2}{1 + 3 \cdot 0.137^2 - 2 \cdot (1 + 0.137) \cdot 0.137^{2+1}} \cdot 110.99 = 111.6 \text{ Nm}$$

čia  $s_k$  reišmė paimta iš 3.1 lentelės.

Radę reikiamus duomenis galime apskaičiuoti  $M_2$ , esant atitinkamoms  $s$  reikšmėms, kurios paimtos iš 3.4 lentelės:

$$M_2 = M_{2P} \cdot s^u = 111.6 \cdot 0.01^2 = 0.0112 \text{ Nm}$$

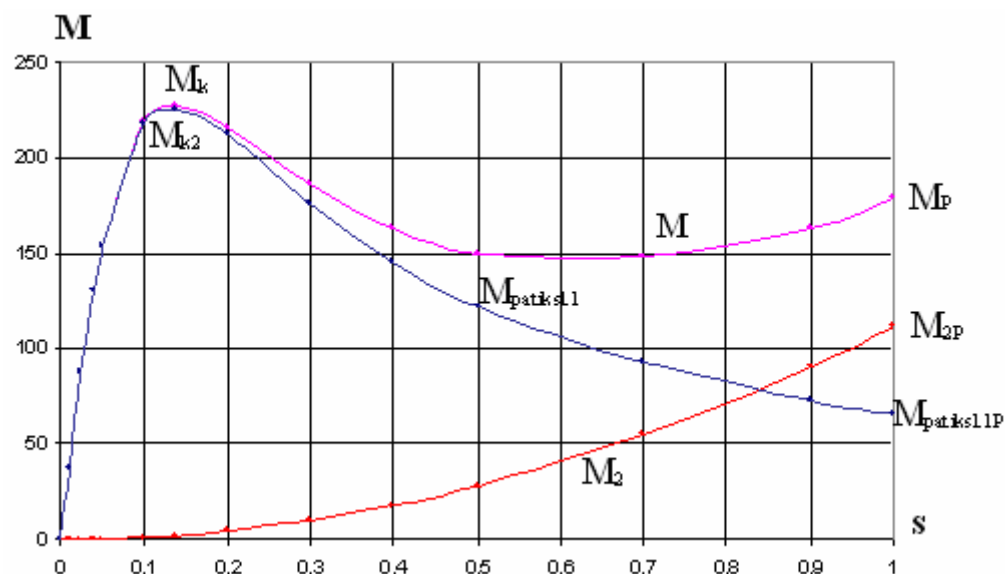
Gautus rezultatus surašau 3.6 lentelę

### 3.6 Lentelė

#### Momento $M_1$ pakeitimas į $M_2$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
s	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_2$ , Nm	0	0,011	0,07	0,179	0,279	1,116	2,095	4,464	10,044	17,856	27,9	54,684	90,396	111,6

Gautus rezultatus atidedu 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Asinchroninio variklio mechaninių charakteristikų modifikavimas

Kadangi  $M_2$  išraiška pakeičia ir maksimalų  $M_k$  į  $M_{k2}$ , tai  $M_{k2}$  apskaičiuojame pagal (2.38) formulę:

$$M_{k2} = M_k + M_{2P} \cdot s_k'' = 227.2 + 111.6 \cdot 0.137^2 = 225.105 \text{ Nm}$$

Apskaičiuotas  $M_{k2}$ ,  $u$  ir  $M_{2P}$  reikšmes įrašome į (2.43) formulę:

$$M_{atstoj.1} = \frac{2 \cdot M_{k2} (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{2P} \cdot s'' = \frac{2 \cdot 225.11 \cdot (1 + 0.137)}{\frac{0.01}{0.137} + \frac{0.137}{0.01} + 2 \cdot 0.137} + 111.6 \cdot 0.01^2 = 36.45 \text{ Nm}$$

Rezultatus surašau į 3.7 lentelę.

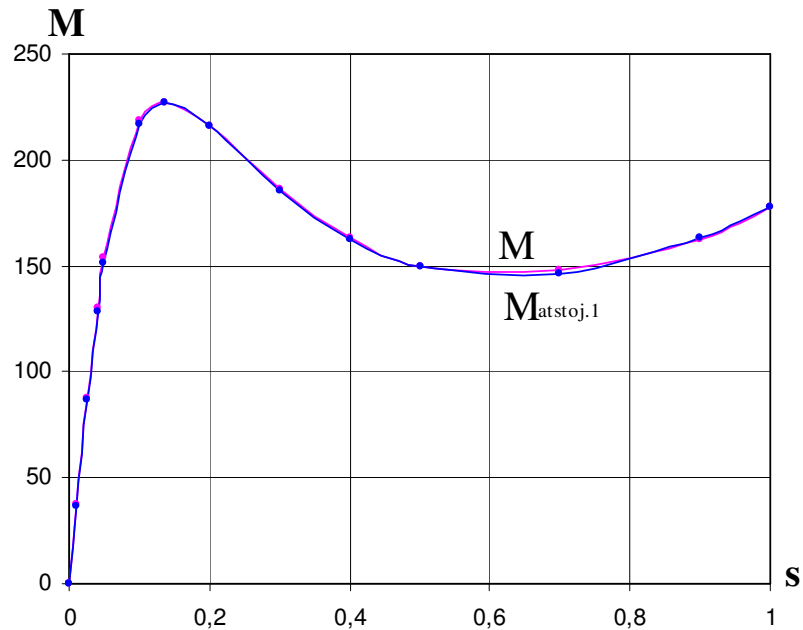
### 3.7 Lentelė

#### Apskaičiuotas variklio $M_{atstoj.1}$ atstojamasis momentas

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
s	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_{atstoj.1}$ , Nm	0	36,45	86,32	128,44	151,78	216,75	227,2	216,09	185,33	162,62	149,85	146,44	163,57	177,99



Gautus rezultatus atidedu 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika.  $M$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{atstoj.1}$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gauta atlikus  $M_1$  pakeitimą.

Analogiškus skaičiavimus atliekame 3.3 paveikslui. Pagal (2.31) formulę asinchroninio variklio momentą galime išreikšti kaip dviejų dedamųjų sumą::

$$M = M_{paprast.} + M_3$$

čia-  $M$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{paprast.} = f(s)$ - momentas, apskaičiuotas pagal paprastesnę Klosso formulę; pagal (2.33) formulę momentas  $M_3$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{paprast.}$  skirtumui.  $M$ ,  $M_{paprast.}$  reikšmės paimtos iš 3.2, 3.4 lentelių.

$$M_3 = M - M_{paprast.} = 37 - 32.99 = 4.01 \text{ Nm}$$

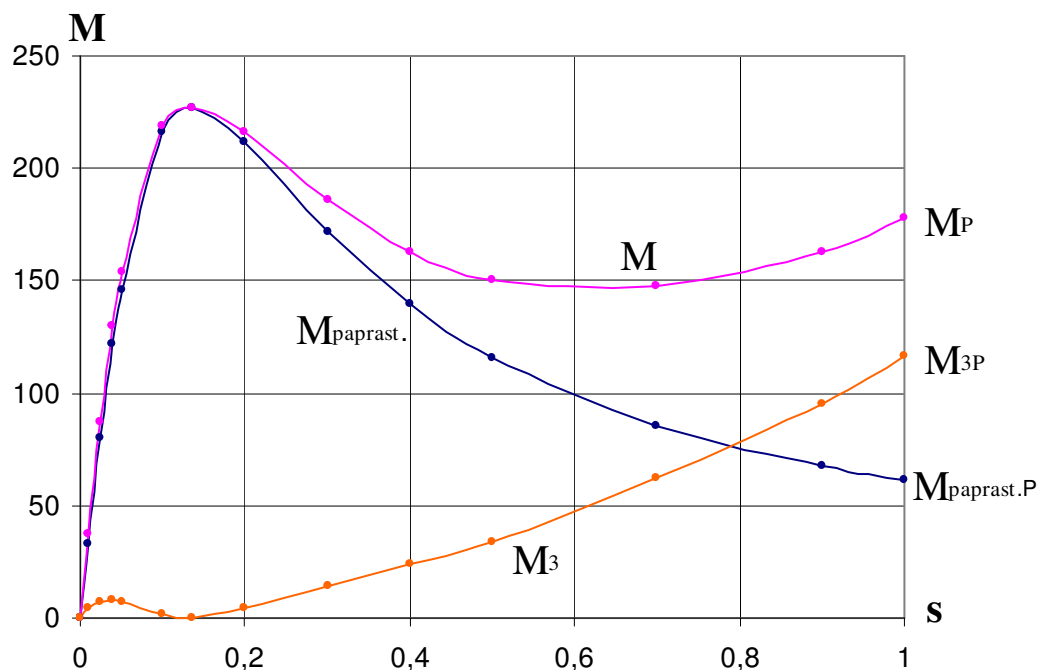
Gautus rezultatus surašau į 3.8 lentelę.

### 3.8 Lentelė

#### Variklio momento $M$ ir $M_{paprast.}$ skirtumas

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$s$	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M$ , Nm	0	37	87,5	130	153,7	218,5	227,2	216	186	163	150	148	162,5	178
$M_{paprast.}$ , Nm	0	32,99	80,25	122,25	146,35	216,39	227,2	211,86	171,70	139,29	115,81	85,65	67,60	61,11
$M_3$ , Nm	0	4,01	7,25	7,75	7,35	2,11	0	4,14	14,30	23,71	34,19	62,35	94,90	116,89

Gautus rezultatus atitdedu 3.8 paveiksle.



3.8 pav. M-momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{\text{paprast.}} = f(s)$ -momentas, apskaičiuotas pagal paprastesnę Klosso formulę; momentas  $M_3$  lygus momentų  $M$  ir  $M_{\text{paprast.}}$  skirtumui

Analogiškai kaip ir prieš atliktuose skaičiavimuose  $M_3$  momentą pakeičiame taip, kad jis prasidėtų iš taško  $s=0$ . Momentų pasikeitimui įvedame naują žymėjimą  $M_4$ . Pagal 2.35 formulę momento  $M_4$  lygtis bus tokia:

$$M_4 = M_{4P} \cdot s^u$$

Naudodamiesi (2.42) formulę apskaičiuoju laipsnio rodiklį  $u$ . Siekiant gauti tikslesnį rezultatą,  $u$  apskaičiuoju keletui slydimo taškų, imant  $s > s_k$ , kai  $s = 0.3; 0.5; 0.7; 0.9$ . Paskui apskaičiuojama vidutinė laipsnio reikšmė ir  $u$  imamas artimiausias sveikas skaičius.

$$u = \frac{1}{\ln s} \ln \frac{M_3}{M_{3P}} = \frac{1}{\ln 0.3} \cdot \ln \frac{14.3}{116.89} = 1.75$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.5} \cdot \ln \frac{34.19}{116.89} = 1.77$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.7} \cdot \ln \frac{62.35}{116.89} = 1.75$$

$$u = \frac{1}{\ln 0.9} \cdot \ln \frac{94.90}{116.89} = 1.98$$

$$u = \frac{1.75 + 1.77 + 1.75 + 1.98}{4} = 1.81$$

tai

$$u \approx 2$$

čia  $M_3$  reikšmės paimtos 3.8 lentelės;  $M_{3P}$ -tai paleidimo momentas, kai  $s=1$  ir paimtas iš 3.8 lentelės.

$M_{4P}$  momentą paleidimo taške nustatome pagal (3.41) formulę:

$$M_{4P} = \frac{1 + 3 \cdot s_k^2}{1 + 3 \cdot s_k^2 - 2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}} \cdot M_{3P} = \frac{1 + 3 \cdot 0.137^2}{1 + 3 \cdot 0.137^2 - 2 \cdot (1 + 0.137) \cdot 0.137^{2+1}} \cdot 116.89 = 117.54 \text{ Nm}$$

čia  $s_k$  reišmė paimta iš 3.1 lentelės.

Radę reikiamus duomenis galime apskaičiuoti  $M_4$ , esant atitinkamom  $s$  reikšmėms, kurios paimtos iš 3.4 lentelės:

$$M_4 = M_{4P} \cdot s^u = 117.54 \cdot 0.01^2 = 0.012 \text{ Nm}$$

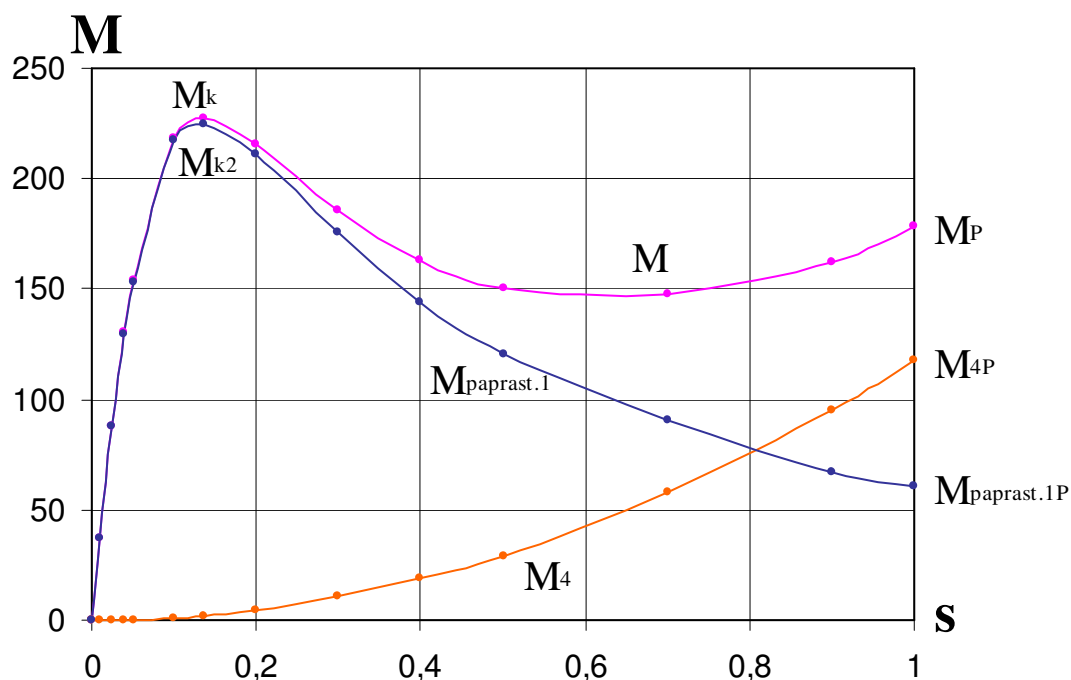
Gautus rezultatus surašau 3.9 lentelę

### 3.9 Lentelė

#### Momento $M_3$ pakeitimas į $M_4$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
s	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_4$ , Nm	0	0,012	0,073	0,188	0,294	1,175	2,206	4,702	10,579	18,806	29,385	57,595	95,207	117,54

Gautus rezultatus atidedu 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Asinchroninio variklio mechaninių charakteristikų modifikavimas

Kadangi  $M_4$  išraiška pakeičia ir maksimalųjį  $M_k$  į  $M_{k2}$ , tai  $M_{k2}$  apskaičiuojame pagal (2.28) formulę:

$$M_{k2} = M_k - M_{4P} \cdot s_k'' = 227.2 - 117.54 \cdot 0.137^2 = 224.99 \text{ Nm}$$

Apskaičiavę  $M_{k2}$ ,  $u$  ir  $M_{4P}$ , bei įrašę į išraišką gauname:

$$M_{atstoj.2} = \frac{2 \cdot M_{k2}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} + M_{4P} \cdot s'' = \frac{2 \cdot 224.99}{\frac{0.01}{0.137} + \frac{0.137}{0.01}} + 117.54 \cdot 0.01^2 = 36.45$$

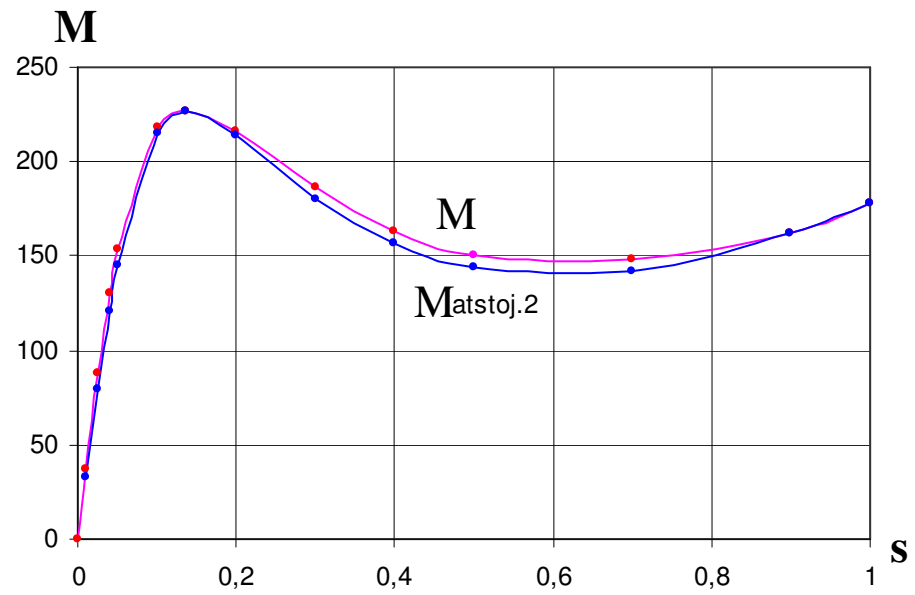
Rezultatus surašau į 3.10 lentelę.

3.10 Lentelė

**Apskaičiuotas variklio  $M_{atstoj.2}$  atstojamasis momentas**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
s	0	0,01	0,025	0,04	0,05	0,1	0,137	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1
$M_{atstoj.2}$ , Nm	0	32,68	79,54	121,25	145,22	215,46	227,2	214,5	180,61	156,74	144,07	142,41	162,15	178,05

Gautus rezultatus atidedu 3.9 paveiksle.



3.9 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika.  $M$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gaunama iš katalogo;  $M_{atstoj.2}$ -momento priklausomybė nuo slydimo  $s$  gauta atlikus  $M_3$  pakeitimą.

### 3.3. Asinchroninio variklio paskaičiuotų dydžių paklaidos

Iš atliktų skaičiavimų ir nubrėžtų kreivių 3.2 poskyriuje matome, kad pasirinkto asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos  $M$  dydžiai iš katalogo skiriasi nuo matematiškai išreikštų asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos  $M_{atstoj.1}$ ,  $M_{atstoj.2}$  dydžių. Šis skirtumas-tai paklaida tarp tikrosios ir apskaičiuotos dydžio reikšmės. Šia paklaidą išreiškiame procentais:

$$\delta x_i = \frac{\Delta x_i}{M} \cdot 100\%$$

Čia  $\Delta x_i$  - absoliutinė paklaida;

$$\Delta x_i = M - M_{atstoj.1(2)}$$

Skaičiavimas atliekamas tarp dydžiausią paklaidą turinčių taškų 3.11 lentelė.

3.11 lentelė

#### Duotos ir apskaičiuotos momento reikšmės

	4	11	12
s	0,04	0,5	0,7
M, Nm	130	150	148
$M_{atstoj.1}$ , Nm	128,44	149,85	146,44
$M_{atstoj.2}$ , Nm	121,25	144,07	142,41

Apskaičiuojame procentinę paklaidą tarp  $M$  ir  $M_{atstoj.1}$  dydžių.

Kai  $s=0.04$ , tai  $M=130\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.1}=128.44\text{Nm}$ :

$$\Delta x_4 = 130 - 128.44 = 1.56$$

$$\delta x_4 = \frac{1.56}{130} \cdot 100\% = 1.2\%$$

Kai  $s=0.5$ , tai  $M=150\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.1}=149.85\text{Nm}$ :

$$\Delta x_{11} = 150 - 149.85 = 0.15$$

$$\delta x_{11} = \frac{0.15}{150} \cdot 100\% = 0.1\%$$

Kai  $s=0.7$ , tai  $M=148\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.1}=146.44\text{Nm}$ :

$$\Delta x_{12} = 148 - 146.44 = 1.56$$

$$\delta x_{12} = \frac{1.56}{148} \cdot 100\% = 1\%$$

Gautus rezultatus surašome į 3.12 lentelę.

**3.12 lentelė**

**Duoto momento  $M$  ir paskaičiuoto  $M_{atstoj.1}$  paklaida**

	4	11	12
s	0,04	0,5	0,7
M, Nm	130	150	148
$M_{atstoj.1}$ , Nm	128,44	149,85	146,44
$\Delta x_i$	1,56	0,15	1,56
$\delta x_i$ , %	1,2	0,15	1

Analogiškai apskaičiuojame procentinę paklaidą tarp  $M$  ir  $M_{atstoj.2}$  dydžių, esant tom pačiom slidimo reikšmėm kaip ir 3.11 lentelėje:

Kai  $s=0.04$ , tai  $M=130\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.2}=121.25\text{Nm}$ :

$$\Delta x_4 = 130 - 121.25 = 8.75$$

$$\delta x_4 = \frac{8.75}{130} \cdot 100\% = 6.73\%$$

Kai  $s=0.5$ , tai  $M=150\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.2}=149.85\text{Nm}$ :

$$\Delta x_{11} = 150 - 144.07 = 5.93$$

$$\delta x_{11} = \frac{5.93}{150} \cdot 100\% = 4\%$$

Kai  $s=0.7$ , tai  $M=148\text{Nm}$ ;  $M_{atstoj.1}=142.41\text{Nm}$ :

$$\Delta x_{12} = 148 - 142.41 = 5.56$$

$$\delta x_{12} = \frac{5.56}{148} \cdot 100\% = 3.7\%$$

Gautus rezultatus surašome į 3.13 lentelę.

**3.13 lentelė**

**Duoto momento  $M$  ir paskaičiuoto  $M_{atstoj.2}$  paklaida**

	4	11	12
s	0,04	0,5	0,7
M, Nm	130	150	148
$M_{atstoj.2}$ , Nm	121,25	144,07	142,41
$\Delta x_i$	8,75	5,93	5,56
$\delta x_i$ , %	6,73	5,93	3,7

### 3.4. Skaičiavimui pasirinkto asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas, apkrovus variklį tiesiškai kintama apkrova.

Variklio paleidimo trukmės skaičiavimams reikalingus duomenis suvedu į 3.14 lentelę:

**3.14 Lentelė**

**Paleidimo trukmės skaičiavimo duomenys**

$M_k$ , Nm	$M_{2P}$ , Nm	$M_{vard}$ , Nm	$s_k$	$M_{k2}$ , Nm	J, Kgm <sup>2</sup>	u
227,2	111,6	70	0,137	225,1	1,4	2

Čia J-pavaros inercijos momentas

Pirmiausiai apsiskaičiuojame lygties (2.48) H(s) vardiklio polinomo šaknis. Lygties H(s)=0 laipsnis yra (u+2). Surašius lentelėje esančius duomenis į (2.48) lygties vardiklį, gauname 4 laipsnio lygtį:

$$111.6 \cdot s^4 + 4.189 \cdot s^3 - 67.91 \cdot s^2 + 68.5s + 1.33 = 0$$

Lygties šaknų radimui, bei tolimesniems skaičiavimams pasinaudosime „Mathcad“ programa. Išsamesni skaičiavimai atlikti „Mathcad“ programa pateikti priede. Gauname vardiklio polinomo šaknis:

Given

$$111.6s^4 + 74.189s^3 - 65.278s^2 + 68.816s - 1.31 = 0$$

$$Find(s) \rightarrow (-1,401 \quad 0,019 \quad 0,358-0,551i \quad 0,358+0,551i)$$

$$s_1 = -1.401;$$

$$s_2 = 0.019;$$

$$s_3 = 0.358 - 0.551i;$$

$$s_4 = 0.358 + 0.551i.$$

Apsiskaičiuojame (2.48) lygties skaitiklio polinomo vertes, kai  $s = s_i$ :

$$G(s_i) = s_i^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_i + s_k^2.$$

$$G(s_1) = 1.929;$$

$$G(s_2) = 0.02;$$

$$G(s_3) = -0.142 - 0.414i;$$

$$G(s_4) = -0.142 + 0.414i.$$

Apsiskaičiuojame (2.48) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertes, kai  $s = s_i$ :

$$H'(s) = (u+2) \cdot M_{2P} \cdot s_i^{u+1} + 2 \cdot (u+1) \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s_i^u + 3 \cdot M_v \cdot s_i^2 + u \cdot M_{2P} \cdot s_k^2 \cdot s_i^{u-1} - 2 \cdot M_v \cdot s_i + 4 \cdot M_v \cdot s_k^2 \cdot s_i + 2 \cdot M_{k2} \cdot (1 + s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2.$$

$$H'(s_1) = -538.967;$$



$$H'(s_2) = 66.419;$$

$$H'(s_3) = -141.271 - 35.972i;$$

$$H'(s_4) = -141.271 + 35.972i.$$

Pagal (2.52) apskaičiuojame santykio  $G(s_i)/H'(s_i)$  skaidymo koeficientus:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)}.$$

$$A_{(1)} = -0.358 \cdot 10^{-4};$$

$$A_{(2)} = 2.988 \cdot 10^{-4};$$

$$A_{(s_3)} = (0.165 + 0.251i) \cdot 10^{-4};$$

$$A_{(s_4)} = (0.165 - 0.251i) \cdot 10^{-4};$$

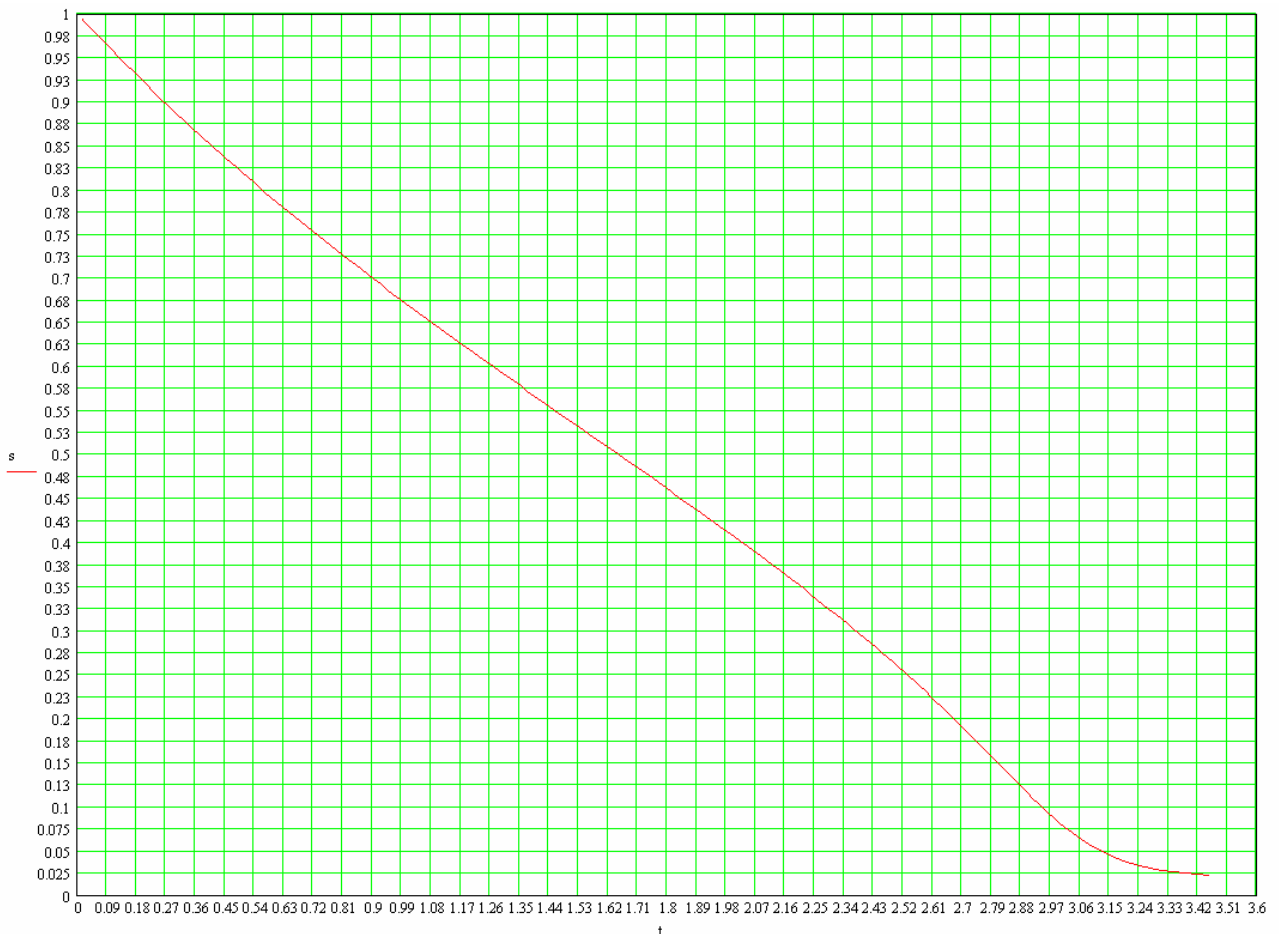
Pagal (2.53) apskaičiuojame variklio pereinamojo proceso paleidimo trukmę intervale nuo 1 iki  $s$ ;

$$B = -439.823$$

$$s := 0, 0.005.. 1$$

$$t(s) := B \cdot \left[ A_1 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s_1)}{1 - s_1} \right] + A_2 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s_2)}{1 - s_2} \right] + A_3 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s_3)}{1 - s_3} \right] + A_4 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s_4)}{1 - s_4} \right] \right]$$

Atlikus skaičiavimus braižome slydimo priklausomybę nuo laiko  $s=f(t)$  3.40pav.



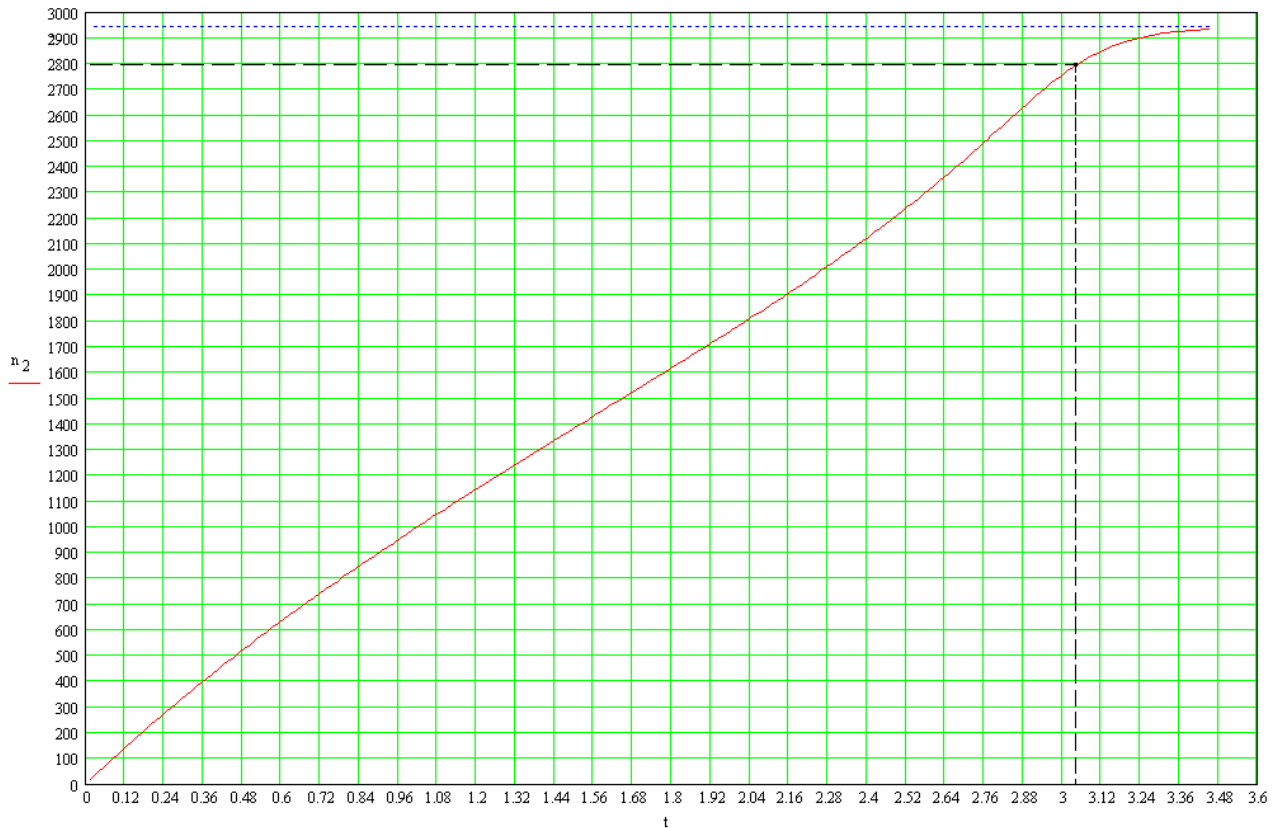
3.40 pav. Asinchroninio variklio slydimo priklausomybė nuo laiko  $s=f(t)$

Pagal (2.55) formulę rotoriaus slydimą, pakeičiame sukimosi greičiu:

$$n_2 = n_1 - s \cdot n_1$$

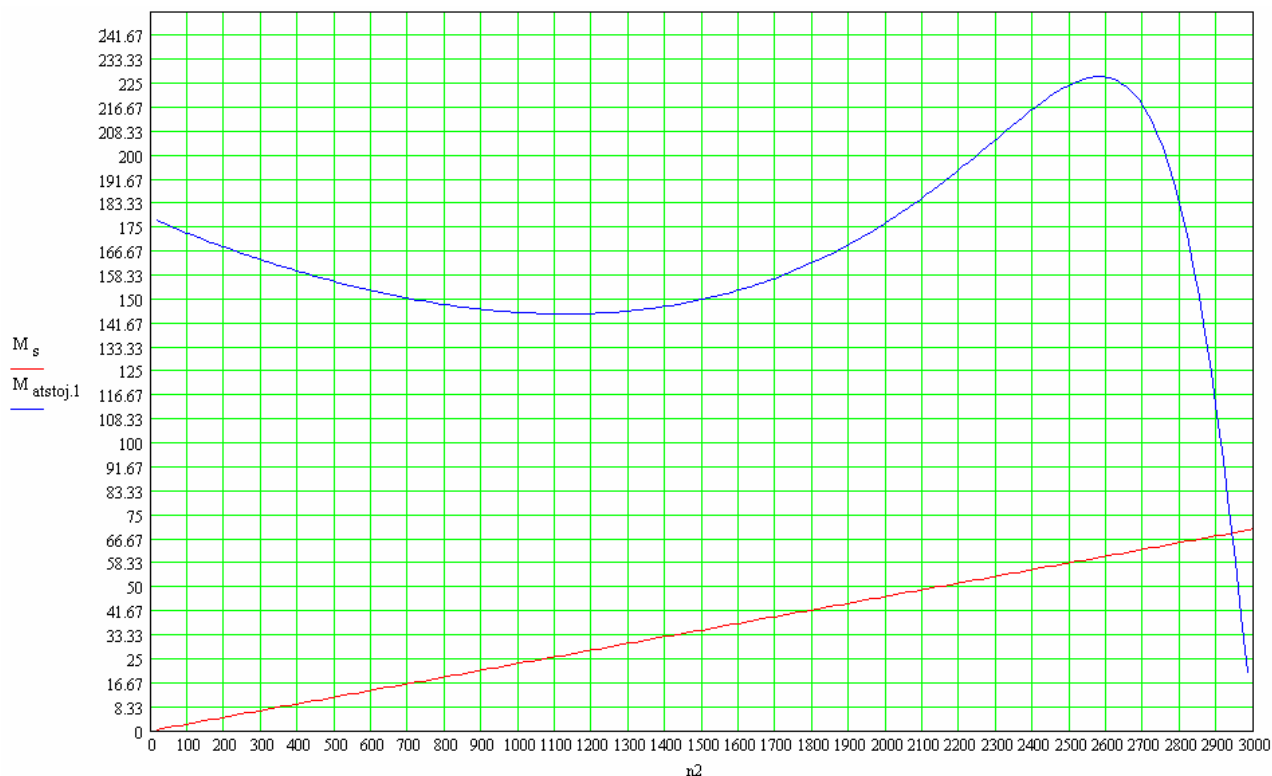
čia  $n_1$ -oro tarpo magnetinio lauko sukimosi greitis:  $n_1=3000\text{aps/min}$ .

Atlikus skaičiavimus braižome greičio priklausomybę nuo laiko  $n_2=f(t)$  3.41pav.



3.41pav. Asinchroninio variklio greičio priklausomybė nuo laiko  $n_2=f(t)$

Kaip ir buvo minėta 2.6 poskyryje asinchroninio variklio paleidimo trukmė baigiasi tada, kai greitis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės. Kad rasti greičio nusistovėjusią reikšmę, brėžiame variklio apkrovos momento priklausomybę nuo greičio 3.42pav.



3.42 pav. Variklio apkrovos momento priklausomybė nuo greičio  $M_{atstoj.1}=f(t)$  ir  $M_s=f(t)$   
Iš 3.42 pav. randame variklio nusistovėjusią greičio reikšmę, kai  $M_{atstoj.1}=M_s$ :

$$n_2=2943 \text{ aps/min}$$

Variklio paleidimo trukmei rasti pasinaudosime 3.41 pav. Iš 3.41 pav. matome, kad prie gautos nusistovėjusios greičio reikšmės  $n_2=2943 \text{ aps/min}$ , variklio paleidimo trukmė tęsiasi iki begalybės, todėl pasinaudojime sąlyga, kad variklio paleidimo trukmė baigiasi tada, kai greitis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės:

$$n_2=0,95 \cdot 2943=2796 \text{ aps/min}$$

Vadinasi variklio paleidimo trukmė iš 3.41 pav. yra lygi:

$$t=3.04s$$

Atliekame patikrinimą. Pagal (2.54) formulę apskaičiuojame galutinį slydimą, prie kurio variklis pasileidžia;

$$s = \frac{3000 - 2796}{3000} = 0,68$$

Vadinasi integruodami (2.49) lygtį, kai slydimas  $s$  kinta nuo 1 iki 0,069, gauname išsibigėjimo trukmę:

$$B = -439.823$$

$$s := 0,0068..1$$

$$t(s) := B \cdot \left[ A1 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s1)}{1 - s1} \right] + A2 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s2)}{1 - s2} \right] + A3 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s3)}{1 - s3} \right] + A4 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s4)}{1 - s4} \right] \right]$$

Atlikus skaičiavimus braižome variklio greičio priklausomybę nuo laiko  $n_2=f(t)$  3.43 pav.



3.43 pav. Asinchroninio variklio greičio priklausomybė nuo laiko  $n_2=f(t)$ , kai  $s$  yra nuo 1 iki 0.068

Taigi asinchroninio variklio paleidimo trukmė rasta pagal 3.41 pav. ir apskaičiuota pagal (2.49) formulę sutampa, t.y  $t=3.04s$ .

## IŠVADOS

- Matematinės šiuolaikinių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos išraiškos užrašymui, Klossio formulė netinka, jeigu pereinamųjų procesų skaičiavimai atliekami variklio mechaninės charakteristikos nestabilioje darbo dalyje.
- Variklio mechaninės charakteristikos matematinės išraiškos užrašymui, tiksliau naudoti modifikuota patikslintą Klossio išraišką.
- Turint išvestą variklio mechaninės charakteristikos matematinę išraišką, galima atlikti paleidimo proceso analizę bei apskaičiuoti variklio paleidimo trukmę.

**LITERATŪRA**

1. Vasiņins V. Elektros pavara. Vilnius.Mokslas.1988.212p
2. Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода. Москва. Энергия.1974.560с
3. Вольдек А. И. Электрические машины. Ленинград.Энергия.1974.824с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. Москва. Энергоатомиздат.1986.410с.
5. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Москва. Энергия.1971.428с
6. Вешневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Москва. Энергоатомиздат.1977.428с.
7. Копылов И.П. Электрические машины. Москва.Логос.2000.597с.
8. Елисеева В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу/ В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. Москва. Энергоатомиздат.1983.610с.
9. Kostrauskas P. Asinchroninės elektros mašinos. Kaunas.Technologija.2004.112p.
10. Marazas S. Elektros mašinos. Vilnius.Mokslas 1989.D 1.284p.
11. Ramonas Z. Technologijos fakulteto studijų darbų parengimo tvarka. Šiauliai, 2004.26p

### 1. Asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimas

Asinchroninio variklio paleidimo trukmės skaičiavimą atlieku „Mathcad“ programa. Skaičiavimams reikalingus duomenis į programą suvedu iš 3.14 lentelės.

$$\begin{array}{lclcl}
 i := \sqrt{-1} & M_k := 3.2 \cdot 71 & M_k = 227.2 & s_k := 0.137 & M_v := 70 \\
 & & M_{2p} := 111.6 & J := 0.8 & \\
 \omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot 50 & & M_{k2} := 225.11 & B := -\omega_1 \cdot J & B = -251.327 \\
 & & & u := 2 & 
 \end{array}$$

Pirmiausiai apsiskaičiuojame lygties (2.48)  $H(s)$  vardiklio polinomo šaknis. Lygties  $H(s)=0$  laipsnis yra  $(u+2)$ .

$$H(s) := M_{2p} \cdot s^{u+2} + 2 \cdot M_{2p} \cdot s_k^2 \cdot s^{u+1} + M_v \cdot s^3 + M_{2p} \cdot s_k^2 \cdot s^u - M_v \cdot s^2 + 2M_v \cdot s_k^2 \cdot s^2 + \left[ 2M_{k2} \cdot (1 + s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2 \right] s - M_v \cdot s_k^2$$

$$\begin{array}{ll}
 a_4 := M_{2p} & a_4 = 111.6 \\
 a_3 := 2 \cdot s_k^2 \cdot M_{2p} + M_v & a_3 = 74.189 \\
 a_2 := s_k^2 \cdot M_{2p} - M_v + 2 \cdot M_v \cdot s_k^2 & a_2 = -65.278 \\
 a_1 := 2 \cdot M_{k2} \cdot (1 + s_k) \cdot s_k - M_v \cdot s_k^2 & a_1 = 68.816 \\
 a_0 := -s_k^2 \cdot M_v & a_0 = -1.314
 \end{array}$$

Surašius lentelėje esančius duomenis į (2.48) lygties vardiklį, gauname 4 laipsnio lygtį:

Given

$$111.6 \cdot s^4 + 74.189 \cdot s^3 - 65.278 \cdot s^2 + 68.816 \cdot s - 1.13 = 0$$

$$\text{Finds (s)} \rightarrow (-1.400835 \quad 1.938463 \cdot 10^{-2} \quad 0.358337 - 0.551245i \quad 0.358337 + 0.551245i)$$

Gauname tokias vardiklio polinomo šaknis:

$$s_1 := -1.401 \quad s_2 := 0.019 \quad s_3 := 0.358 - 0.55i \quad s_4 := 0.358 + 0.55i$$

Apsiskaičiuojame (2.48) lygties skaitiklio polinomo šaknis, kai  $s = s_i$ ;

$$G(s_i) = s_i^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_i + s_k^2$$

$$G_1 := s_1^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_1 + s_k^2$$

$$G_2 := s_2^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_2 + s_k^2$$

$$G_3 := s_3^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_3 + s_k^2$$

$$G_4 := s_4^2 + 2 \cdot s_k^2 \cdot s_4 + s_k^2$$

Atlikus skaičiavimus, gauname tokias skaitiklio polinomo šaknis:

$$G_1 = 1.929 \quad G_2 = 0.02 \quad G_3 = -0.142 - 0.414i \quad G_4 = -0.142 + 0.414i$$



Apsiskaičiuojame (2.48) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertes, kai  $s=s_i$ :

$$\frac{d}{ds}H(s) \rightarrow 446.4s^3 + 222.5677224s^2 - 130.5554392s + 68.81648918$$

$$H1 := 4M2p \cdot s1^3 + 6M2p \cdot sk^2 \cdot s1^2 + 3Mv \cdot s1^2 + 2M2p \cdot sk^2 \cdot s1 - 2Mv \cdot s1 + 4Mv \cdot sk^2 \cdot s1 + [2Mk2 \cdot (1 + sk) \cdot sk] - Mv \cdot sk^2$$

$$H2 := 4M2p \cdot s2^3 + 6M2p \cdot sk^2 \cdot s2^2 + 3Mv \cdot s2^2 + 2M2p \cdot sk^2 \cdot s2 - 2Mv \cdot s2 + 4Mv \cdot sk^2 \cdot s2 + [2Mk2 \cdot (1 + sk) \cdot sk] - Mv \cdot sk^2$$

$$H3 := 4M2p \cdot s3^3 + 6M2p \cdot sk^2 \cdot s3^2 + 3Mv \cdot s3^2 + 2M2p \cdot sk^2 \cdot s3 - 2Mv \cdot s3 + 4Mv \cdot sk^2 \cdot s3 + [2Mk2 \cdot (1 + sk) \cdot sk] - Mv \cdot sk^2$$

$$H4 := 4M2p \cdot s4^3 + 6M2p \cdot sk^2 \cdot s4^2 + 3Mv \cdot s4^2 + 2M2p \cdot sk^2 \cdot s4 - 2Mv \cdot s4 + 4Mv \cdot sk^2 \cdot s4 + [2Mk2 \cdot (1 + sk) \cdot sk] - Mv \cdot sk^2$$

Gauname tokias vardiklio polinomo išvestinės vertes:

$$H1 = -538.967$$

$$H2 = 66.419$$

$$H3 = -141.271 - 35.972i$$

$$H4 = -141.271 + 35.972i$$

Pagal (2.52) apskaičiuojame santykio  $G(s_i)/H'(s_i)$  skaidymo koeficientus:

$$A_i := \frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$$

$$A1 := \frac{G1}{H1} \quad A2 := \frac{G2}{H2} \quad A3 := \frac{G3}{H3} \quad A4 := \frac{G4}{H4}$$

$$A1 = -3.579 \times 10^{-3} \quad A2 = 2.988 \times 10^{-4} \quad A3 = 1.646 \times 10^{-3} + 2.514i \times 10^{-3} \quad A4 = 1.646 \times 10^{-3} - 2.514i \times 10^{-3}$$

Pagal (2.53) apskaičiuojame paleidimo trukmę intervale nuo 1 iki  $s$ ;

$$B = -439.823$$

$$s := 0.005, 0.0055, 1$$

$$t(s) := B \cdot \left[ A1 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s1)}{1 - s1} \right] + A2 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s2)}{1 - s2} \right] + A3 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s3)}{1 - s3} \right] + A4 \cdot \ln \left[ \frac{(s - s4)}{1 - s4} \right] \right]$$

Atlikus skaičiavimus braižome slydimo priklausomybę nuo paleidimo trukmės  $s=f(t)$  1pav.



1pav. Asinchroninio variklio slydimo priklausomybė nuo paleidimo trukmės  $s=f(t)$

Pagal (2.55) formulę rotoriaus slydimą, pakeičiame sukimosi greičiu:

$$n_2 = n_1 - s \cdot n_1$$

čia  $n_1$ -oro tarpo magnetinio lauko sukimosi greitis:  $n_1=3000\text{aps/min}$ .

Atlikus skaičiavimus braižome greičio priklausomybę nuo laiko  $n_2=f(t)$  2pav.



2pav. Asinchroninio variklio greičio priklausomybė nuo paleidimo trukmės  $n_2=f(t)$