

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Rolandas Gužauskas

ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINĖS CHARAKTERISTIKOS
IŠRAIŠKŲ TYRIMAS
Magistro darbas

Vadovas

doc. Teodoras Šimkevičius

2007 06 03

ŠIAULIAI, 2007

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

doc. dr. Teodoras Šimkevičius

2007 06

ASINCHRONINIO VARIKLIO MECHANINĖS CHARAKTERISTIKOS
IŠRAIŠKŲ TYRIMAS

Magistro darbas

Konsultantas

Vadovas

doc. dr. Teodoras Šimkevičius

2007 06 03

Recenzentas

Atliko

ŠU Technologijos fakulteto

Elektros inžinerijos katedros

doc. dr. Zigmantas Turauskas

2007 06 03

EM-5 grupės magistrantas

Rolandas Gužauskas

2007 06 03

Gužauskas Rolandas. "Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išraiškų tyrimas". Elektros inžinerijos katedra. Darbo vadovas doc. T. Šimkevičius; Šiaulių Universitetas, Technologijos fakultetas. Šiauliai, 2007. Darbo apimtis 69p. Pateikti 39 paveikslai ir 5 lentelės, išanalizuota 12 literatūros šaltinių.

SANTRAUKA

Šiuolaikinių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos yra labai skirtingos. Jos dažniausiai aprašomos Kłoso formule, tačiau ši išraiška negali būti taikoma šiuolaikiniams asinchroniniams varikliams, nes labai skiriasi nuo tikrosios. Kłoso formule aprašyta mechaninė charakteristika neįvertina srovės išstūmimo efekto rotoriaus trumpai sujungto narvelio stiebuose. Daugelis šiuolaikinių asinchroninių variklių yra pateikiami jau su nubrėžta mechanine charakteristika, kurios matematinė išraiška yra nežinoma.

Trifazio asinchroninio variklio paleidimo laikas taip pat ir momento, srovės ir sūkių dažnio nuo laiko priklausomybių pereinamieji procesai nustatomi pasinaudojant elektros pavaros judesio lygtimi, įrašant į ją variklio ir darbo mechanizmo mechanines charakteristikas. Analizuojamas metodas, leidžiantis norimu tikslumu aprašyti mechaninę variklio charakteristiką kaip polinomu aproksimuota asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos funkcija. Pasinaudojant gauta asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išraiška ir pavaros judesio lygtimi, pateikta metodika variklio paleidimo laikui nustatyti.

Gužauskas Rolandas. Research of Mechanical Characteristic expressions of the Induction Motor: Master thesis of energetic engineer/research advisor Assoc. Prof. T. Šimkevičius; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department. Šiauliai, 2007. 69p. Submit 39 figures, 5 tables, 12 sources of literary sifted.

SUMMARY

The mechanical characteristics of the up to date induction motors are very different. They often are expressed by the Kloss formula, but these formulas are dissimilar of real. The mechanical characteristics of the motor expressed by the Kloss formula invaluable squirrel cage the end of a pole of rotor crowding-out effect of current. Many the up to date induction motors are produce already with define mechanical characteristics, which mathematical expression is unknown.

The starting time of the three - phase induction 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 analysis of the method letting to express the mechanical characteristics of the motor as the polynomial function is 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

ĮVADAS	7
1. ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ MECHANINĖS CHARAKTERISTIKOS.....	8
2. ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ APRAŠYMO BŪDAI	9
2.1. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika aprašyta Kłoso formule	9
2.2. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aprašymas matematine lygtimi, dviejų dedamųjų metodu	12
2.3. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išreiškimas polinomu	16
2.3.1. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išreiškimas Makłoreno eilutėmis.....	16
2.3.2. Polinomo koeficientų radimas mažiausių kvadratų metodu	20
3. ELEKTROS PAVAROS JUDESIO LYGTIS IR JOS SPRENDIMAS	27
3.1. Elektros pavaros judesio lygtis.....	27
3.2. Matematinis pereinamojo proceso nagrinėjimas elektros pavarose su asinchroniniu varikliu esant pastoviam statiniam momentui.....	29
3.3. Grafinis pavaros judėjimo lygties sprendimas	32
4. ASINCHRONINIO VARIKLIO PALEIDIMO TRUKMĖS SKAIČIAVIMAS	35
4.1. Asinchroninio variklio pereinamojo proceso skaičiavimas, kai variklis apkrautas tiesiškai kintama apkrova.....	37
IŠVADOS	43
LITERATŪRA	44
PRIEDAI	
1 Priedas. Asinchroninio variklio paleidimo laikų skaičiavimas esant skirtingoms variklio apkrovoms...	45

LENTELĖS

2.3.2.1 lentelė. Pagrindiniai pasirinkto variklio duomenys.....	20
2.3.2.2 lentelė. Realus asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys	21
2.3.2.3 lentelė. Skaičiavimų duomenys aproksimavimo koeficientų nustatymui.....	22
2.3.2.4 lentelė. Realios ir aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys	26
4.1.2 lentelė. Asinchroninio variklio paleidimo laikai esant skirtingoms pastovioms apkrovoms.....	41

PAVEIKSLAI

1.1 pav. Šiuolaikinių trifazių asinchroninių variklių mechaninių charakteristikų pavyzdžiai.....	8
2.1.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika.....	10
2.2.1 pav. Trifazio asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: M – realaus variklio gaunama iš katalogo; M_{11} – apskaičiuota pagal Kloso formulę; $M_{21}=M-M_{11}$	12
2.2.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninių charakteristikų modifikavimas	13
2.3.1.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M1(s)=f(s)$ aproksimuotos dešimto laipsnio polinomu; b) $M2(s)=f(s)$ aproksimuotos dvidešimto laipsnio polinomu; $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika	17
2.3.1.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M3(s)=f(s)$ aproksimuotos vienuolikto laipsnio polinomu; b) $M4(s)=f(s)$ aproksimuotos devyniolikto laipsnio polinomu; $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika	18
2.3.1.3 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M5(s)=f(s)$ aproksimuotos trečio laipsnio polinomu; b) $M6(s)=f(s)$ aproksimuotos penkto laipsnio polinomu; $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika.....	19
2.3.2.1 pav. Trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika.....	21
2.3.2.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika; rutuliukais pažymėti pasirinkto variklio mechaninės charakteristikos taškai, ištisine linija – apskaičiuotoji kreivė	25
2.3.2.3 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika; $M=f(s)$ - asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aproksimuotos septinto laipsnio polinomu	26
3.2.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos taškai, atitinkantys nusistovėjusį darbo režimą.....	30
3.3.1 pav. Grafinis sūkių dažnio kreivės $\omega=f(t)$ radimas proporcijų metodu	32
3.3.2 pav. Grafinis sūkių dažnio kreivės $\omega=f(t)$ radimas ploto metodu.....	33
4.1.1. pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s, %).....	37
4.1.2 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	40
4.1.3 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	40
4.1.4 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybės esant skirtingoms apkrovoms $n=f(t)$	41
4.1.5 pav. Paleidimo laiko priklausomybė nuo apkrovos $t=f(M)$	42
P1.1 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s, %).....	46
P1.2 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	48
P1.3 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	48

P1.4 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	49
P1.5 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	51
P1.6 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	52
P1.7 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	53
P1.8 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	55
P1.9 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	55
P1.10 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	56
P1.11 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	58
P1.12 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	58
P1.13 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	59
P1.14 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	61
P1.15 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	62
P1.16 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	63
P1.17 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	65
P1.18 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	65
P1.19 pav. Variklio mechaninė (M(s)), apkrovos charakteristika (Ms(s)) ir pavaros judesio lygtis (MD(s)); (s, %).....	66
P1.20 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %).....	68
P1.21 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$	68

ĮVADAS

Trifazio variklio paleidimo laikas turi didelę įtaką gamybinių mechanizmų darbo našumui, ypač jeigu paleidimas dažnas. 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 susidarančio momento, pagreičio ir srovės reikšmes, kurios lemia elektros pavaros mechaninę ir elektrinę perkrovą, teisingai parinkti reikiamą variklį.

Paleidimo laikas gali būti nustatomas pasinaudojant pavaros judesio lygtimi, tačiau tam reikia turėti tikslias matematinės asinchroninio variklio ir darbo mechanizmo charakteristikas. Paprastai nesunku yra matematine lygtimi aprašyti mechanizmo mechaninę charakteristiką, kur kas sudėtingiau tiksliai matematiškai išreikšti asinchroninio variklio mechaninę charakteristiką, kuri dažniausiai yra aprašoma Kłoso formule. Šiuolaikinių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos yra labai skirtingos [5], todėl Kłoso formulė šiems varikliams netinka, nes neįvertina srovės išstūmimo efekto rotoriaus trumpai sujungto narvelio stiebuose. Neturint asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos analitinės išraiškos, negalima skaičiuoti ir pereinamųjų procesų. Pasinaudojant kataloguose pateikiamomis asinchroninių variklių mechaninių charakteristikų kreivėmis, paleidimo pereinamąjį procesą galima skaičiuoti grafiniu analitiniu būdu, pakeičiant variklio ir mechanizmo momentų kreives laiptuotomis, tačiau reikia daug ir tiksliai braižyti, o rezultato tikslumas priklauso nuo laiptelių skaičiaus bei dydžio.

Darbo tikslas pateikti metodą asinchroninio variklio paleidimo pereinamajam procesui ir paleidimo laikui apskaičiuoti, analitiškai aprašant asinchroninio variklio momento priklausomybę nuo slydimo $M=f(s)$.

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

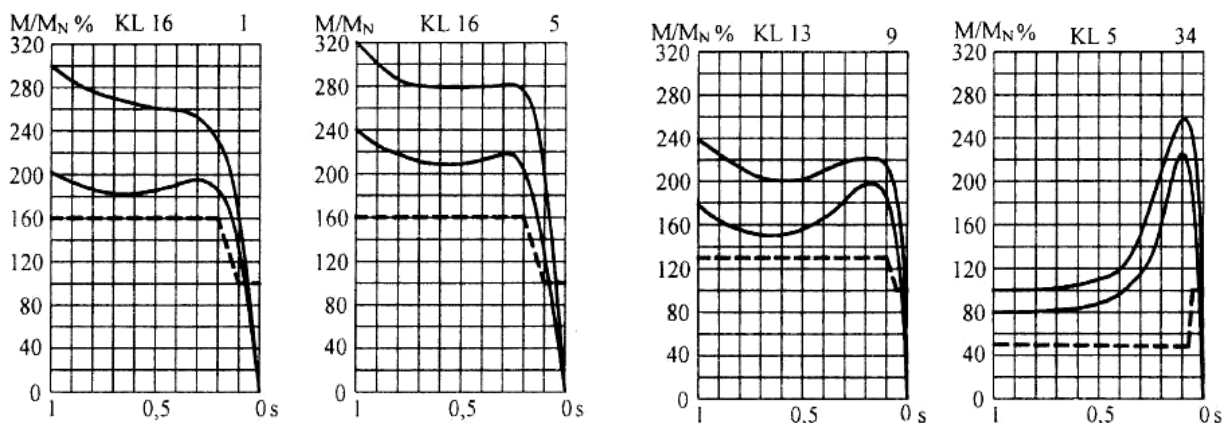
1. ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ MECHANINĖS CHARAKTERISTIKOS

Trifaziams asinchroniniams varikliams su trumpai sujungtais rotoriais ilgą laiką buvo būdingas mažas paleidimo momentas ir didelė paleidimo srovė. Paleidimo momento didinimas ir paleidimo srovės mažinimas buvo pasiekiamas didinant rotoriaus apvijos aktyviają varžą, tačiau nuo to pablogėja variklio energiniai rodikliai normalaus darbo metu. Varikliai su giliais grioveliais ar dvigubais rotoriaus narveliais, kuriuose pasireiškia srovės išstūmimo efektas, didinantis paleidimo momentą ir mažinantis paleidimo srovę įsibėgėjimo metu, ir turintys gerus energinius rodiklius vardinės apkrovos metu buvo gaminami tik palyginti didelės galios.

Kitokių vaizdą matome nagrinėdami šiuolaikinius trifazius asinchroninius variklius. Kompanija SIEMENS savo kataloge [5] pateikia ne tik gaminamų trifazių asinchroninių variklių nominaliuosius duomenis ir santykinės paleidimo bei maksimaliojo, momento vertes, bet ir variklių mechaninių charakteristikų $M/M_N=f(s)$ grafikus.

Pagal mechaninės charakteristikos pobūdį visi gaminami asinchroniniai varikliai su trumpai sujungtais rotoriais suskirstyti į 34 grupes. Šių variklių santykinis paleidimo momentas M_p/M_N būna nuo 0,9 iki 4,2, santykinis maksimalusis momentas M_{max}/M_N - nuo 1,6 iki 4,2, santykinė paleidimo srovė I_p/I_N - nuo 2 iki 10,4.

$M/M_N=f(s)$ grafikai kataloge rodo, kad dauguma net ir nedidelės galios variklių turi gerokai didesnę už vardinį paleidimo momentą, o lentelėse pateikti duomenys - gerus vardinis variklių parametrus. Keturi būdingos asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos parodytos 1.1 pav.



1.1 pav. Šiuolaikinių trifazių asinchroninių variklių mechaninių charakteristikų pavyzdžiai

Grafoanaliziniams pereinamųjų procesų skaičiavimams kataloge [5] duotų $M/M_N=f(s)$ kreivių visiškai pakanka, tačiau tiksliesiems skaičiavimams reikia turėti šios kreivės matematinę išraišką.

2. ASINCHRONINIŲ VARIKLIŲ MECHANINIŲ CHARAKTERISTIŲ APRAŠYMO BŪDAI

2.1. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika aprašyta Kłoso formule

Asinchroninio variklio elektromagnetinį momentą sukuria rotoriaus apvijos srovės ir sukamojo magnetinio lauko sąveika. Elektromagnetinis momentas proporcingas elektromagnetiniai galiai [10, 12]:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1}; \quad (2.1.1)$$

čia: P_{em} – elektromagnetinė galia, kuri randama iš formulės:

$$P_{em} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{s}; \quad (2.1.2)$$

čia: I_2' – redukuota rotoriaus srovė;

m_1 – statoriaus apvijos fazių skaičius;

R_2' – rotoriaus apvijos redukuota aktyvioji varža;

ω_1 – statoriaus magnetinio lauko sūkių dažnis, kuris randamas iš formulės:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}. \quad (2.1.3)$$

Kadangi sinchroninis sūkių dažnis $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$, tai kampinis sūkių dažnis:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1 \cdot 60}{60p} = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad (2.1.4)$$

čia: p – variklio polių porų skaičius.

Į (2.1.1) lygtį įrašome elektromagnetinės galios išraišką:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s} \quad (2.1.5)$$

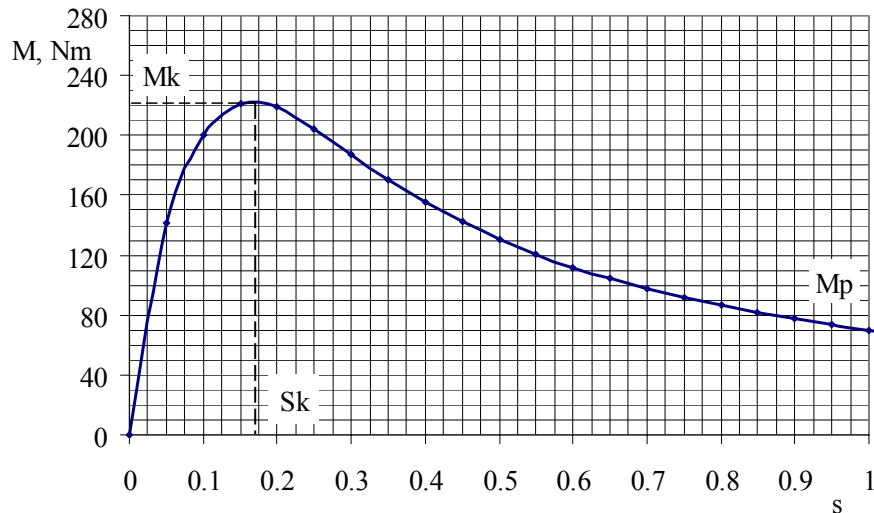
Iš čia matome, kad asinchroninio variklio elektromagnetinis momentas proporcingas elektrinių nuostolių rotoriaus apvijoje galiai.

Į (2.1.5) formulę įrašius srovės I_2' ir kampinio sūkių dažnio $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ išraiškas turime:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}}; \quad (2.1.6)$$

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left((R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2 \right)} \quad (2.1.7)$$

Norint momentą išreikšti Nm , šios formulės skaitiklį reikia padalinti iš 9,81.



2.1.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

Naudodamiesi momento išraiška (2.1.7), galime nubraižyti variklio elektromagnetinio momento priklausomybės nuo slydimo grafiką $M=f(s)$, kuris vadinamas mechanine variklio charakteristika (2.1.1 pav.) [10]. Ji sudaroma, tarus, kad visi (2.1.7) 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.

Pradine variklio paleidimo akimirka $n_2=0$, ir $s=1$. Taigi išvystomas paleidimo momentas yra gaunamas iš (2.1.7) lygties ir jo išraiška yra užrašoma taip:

$$M_p = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 \left((R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 \right)} \quad (2.1.8)$$

Variklio rotorius, veikiamas momento M_p , pradeda sukintis, slydimas mažėja, o momentas didėja. Kai slydimas pasiekia savo vertę s_k , momentas pasiekia maksimalią reikšmę. Kritinį slydimą s_k , atitinkantį maksimalų momentą, galime rasti, paėmę iš (2.1.7) lygties momento išvestinę pagal s ir prilyginę ją nuliui:

$$\frac{dM}{ds} = 0. \quad (2.1.9)$$

Iš čia turime:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (2.1.10)$$

Čia pliuso ženklas atitinka asinchroninės mašinos darbą variklio režimu.

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

$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (2.1.11)$$

Įrašę (2.1.8) išraišką į (2.1.7) formulę, turime maksimalų asinchroninio variklio elektromagnetinį momentą:

Mechaninės charakteristikos lygtį (2.1.7) galime užrašyti paprastesniu ir patogesniu skaičiavimo pavidalu, paėmus M ir M_k santykį. Atitinkamai pertvarę, turime šitokią mechaninės charakteristikos lygtį:

$$M = \frac{2 \cdot M_k (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2a \cdot s_k} \quad (2.1.12)$$

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 $k_M = \frac{M_k}{M_{\text{vard}}}$ vadinamą variklio perkrovimo koeficientu (leistinos apkrovos koeficientu):

$$M_k = k_M \cdot M_{\text{vard}} \quad (2.1.13)$$

Kadangi s_k reikšmė kataloguose nepateikiama, ją galime rasti iš (2.1.12) išraiškos, išsprendus pastarąją s_k atžvilgiu ir įrašius $M = \frac{P_{\text{vard}}}{\omega_{\text{vard}}}$ bei $s_{\text{vard}} = \frac{(\omega_0 - \omega_{\text{vard}})}{\omega_0}$. Tada iš (2.1.13) turime s_k :

a) mažos galios variklių:

$$s_k = s_{\text{vard}} \frac{k_M + \sqrt{k_M^2 - 1 + 2s_{\text{vard}}(k_M - 1)}}{1 - 2s_{\text{vard}}(k_M - 1)} \quad (2.1.14)$$

b) vidutinės ir didesnės galios variklių:

$$s_k = s_{\text{vard}} (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) \quad (2.1.15)$$

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

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.1.16)$$

2.1 pav. charakteristikos intervalas nuo $s=0$ iki $s=s_k$ vadinama stabiliąja charakteristikos dalimi. Šiame intervale nuo $M=0$ ir $M=M_k$ dydis $s \ll s_k$, tuomet mechaninės charakteristikos tos dalies lygtis bus tiesės lygtis:

$$M = (2M_k/s_k)s \quad (2.1.17)$$

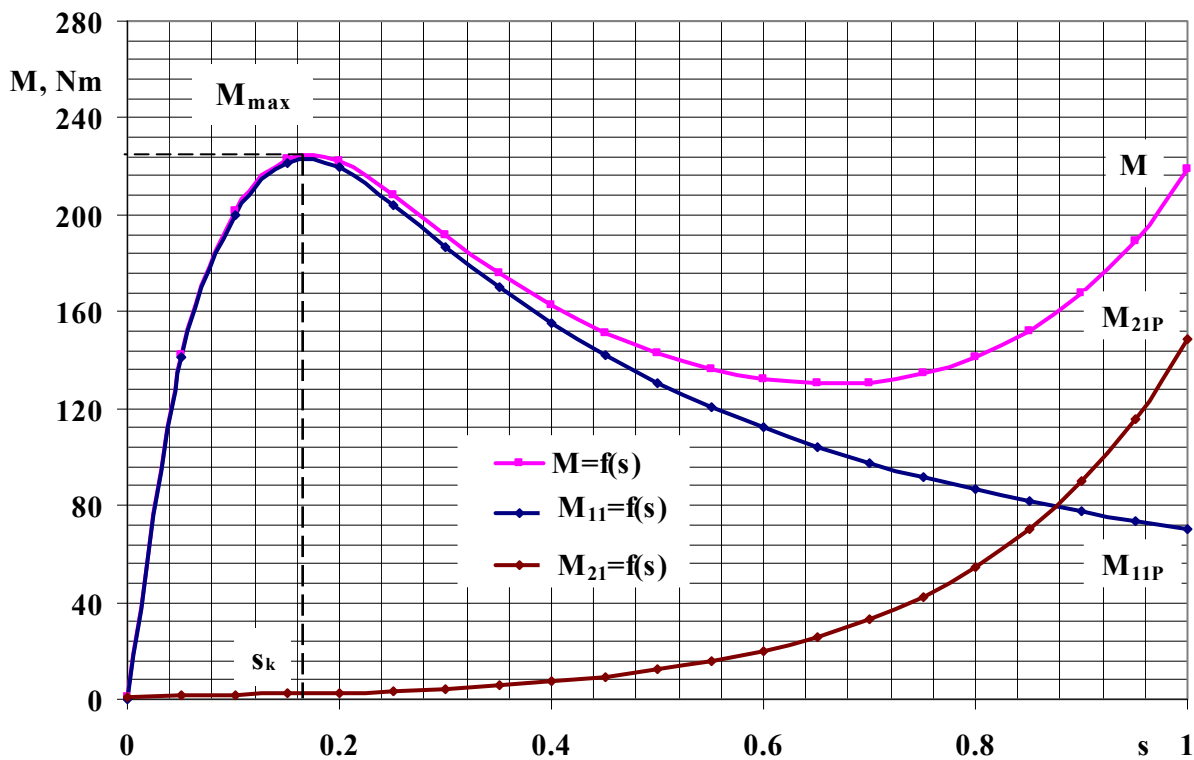
Charakteristikos intervalas nuo s_k iki $s=1$ panaudojamas tik paleidžiant variklį ir vadinamas nestabiliąja charakteristikos dalimi.

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

2.2. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aprašymas matematine lygtimi, dviejų dedamųjų metodu

Asinchroninio variklio momentą galime išreikšti kaip dviejų dedamųjų sumą [6].

Tarkime, kad M kreivė 2.2.1 pav. yra realaus asinchroninio variklio mechaninė charakteristika, kurią galime gauti iš katalogo [5].



2.2.1 pav. Trifazio asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: M – realaus variklio gaunama iš katalogo; M_{11} – apskaičiuota pagal Klose formulę; $M_{21}=M-M_{11}$

Iš katalogo kreivės suradę s_k bei M_k ir apskaičiavę pagal (2.1.12) arba (2.1.16), turime M_{11} kreivę. Kreivės $M=f(s)$ ir $M_{11}=f(s)$ sutampa slydimų diapazone $0 < s < s_k$ ir gerokai skiriasi, kai $s_k < s < 1$; skirtumas didėja, didėjant slydimui. Skaičiuojant pereinamąjį procesą pagal $M_{11}=f(s)$ kreivę, rezultatai labai skiriasi nuo tikrųjų, todėl būtina kaip galima tiksliau matematiškai išreikšti momento priklausomybę nuo slydimo.

Asinchroninio variklio momentą galime išreikšti kaip dviejų momento dedamųjų sumą [6]:

$$M = M_{11} + M_{21}; \quad (2.2.1)$$

čia: M – momento priklausomybė nuo slydimo s gaunama iš katalogo;

$M_{11} = f(s)$ – momentas, apskaičiuotas pagal patikslintą Kłoso formulę; momentas M_{21}

lygus momentų M ir M_{11} , skirtumui:

$$M_{21} = M - M_{11}. \quad (2.2.2)$$

Gautos kreivės parodytos 2.2.1 paveiksle. Momento M_1 priklausomybę nuo slydimo galime išreikšti taip:

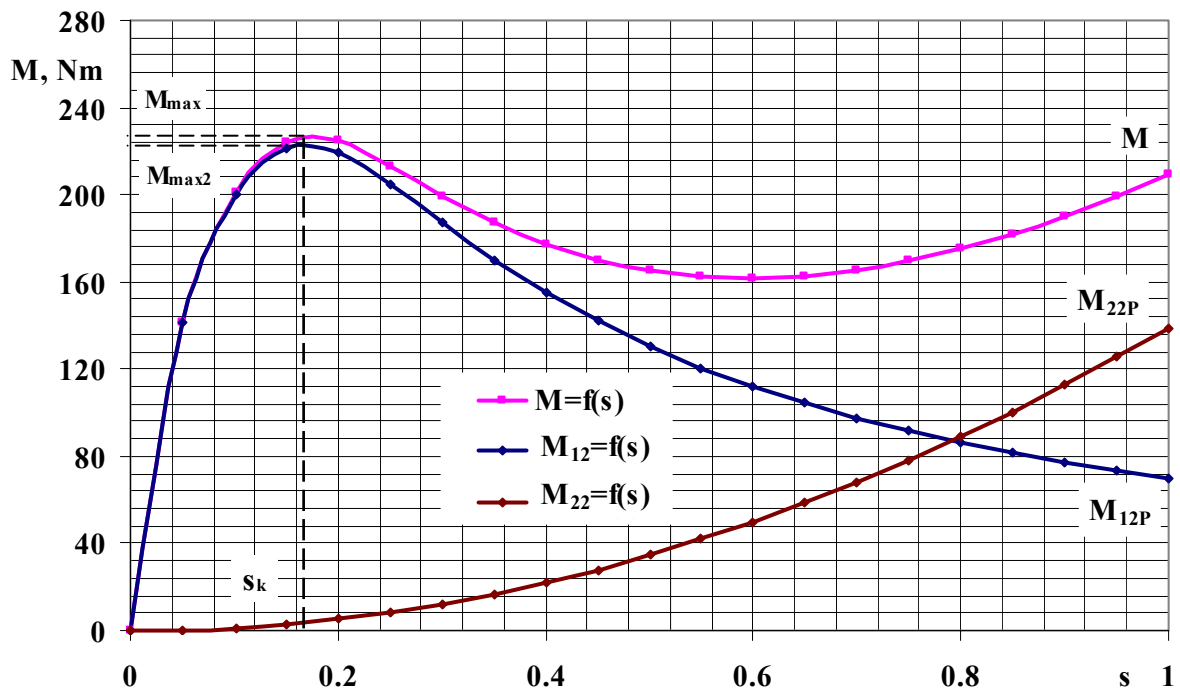
$$M_{21} = M_{21P} \frac{(s - s_k)^u}{(1 - s_k)^u} \quad (2.2.3)$$

čia: $M_{21P} = M_P - M_{11P}$

M_P – tikrasis variklio paleidimo momentas;

M_{11P} – paleidimo momentas apskaičiuotas pagal patikslintą Kłoso formulę;

u – skaičius, nuo kurio priklauso $M_{21} = f(s)$ pobūdis, jis apskaičiuojamas ir būna 1÷6 diapazone.



2.2.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninių charakteristikų modifikavimas

Taigi atstojamasis variklio momentas:

$$M_{at.} = \frac{2 \cdot M_{max}(1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{21P} \frac{(s - s_k)^u}{(1 - s_k)^u} \quad (2.2.4)$$

Gautoji momento M išraiška (2.2.4) nepatogi naudotis, nes M_{21} galioja slydimų diapazone nuo s_k iki l ir negalioja, kai $0 < s < s_k$, tai yra negalioja variklio normalaus darbo zonoje. Todėl lygtį $M=f(s)$ reikia pertvarkyti taip, kad abi momento dedamosios galiotų slydimo diapazone nuo 0 iki 1. Tam tikslui momentą M_{21} reikia pakeisti taip, kad prasidėtų iš taško $s=0$. Momento M_{22} lygties $M_{22}=f(s)$ grafikas parodytas 2.2.2 pav. Momento M_{22} lygtis šiuo atveju:

$$M_{22} = M_{22P} \cdot s^u \quad (2.2.5)$$

Ši M_{22} išraiška pakeičia ir maksimalųjį M_{max} ir M_{max2} . $M_{22}=f(s)$ momentą paleidimo taške nustatome taip:

$$M_{22P} = M_{21P} + \Delta M \quad (2.2.6)$$

čia: ΔM yra kreivių $M_{11}=f(s)$ ir $M_{12}=f(s)$ paleidimo momentų skirtumas, kuris gaunamas dėl pasikeitusio maksimaliojo momento M_{max2} . Dydį ΔM nustatome pasinaudoję (2.1.12) lygtimi, imdami paleidimo momentų skirtumą, kai $s=l$, kai maksimalieji momentai M_{max} ir M_{max2} (2.2.1, 2.2.2 pav.).

$$\Delta M = \frac{2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k}{1 + 3 \cdot s_k^2} \cdot (M_{max} - M_{max2}) \quad (2.2.7)$$

Kadangi momento M_{22} kreivė prasideda iš taško $s=0$, tai maksimaliojo momento pasikeitimą galime išreikšti taip:

$$M_{max2} = M_{max} - M_{22P} \cdot s_k^2 \quad (2.2.8)$$

Įrašę (2.2.8) į (2.2.7) turime:

$$\Delta M = \frac{2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}}{1 + 3 \cdot s_k^2} \cdot M_{22P}, \quad (2.2.9)$$

o iš (2.2.6) lygties tą patį momentų skirtumą ΔM išreiškiame taip:

$$\Delta M = M_{22P} - M_{21P}. \quad (2.2.10)$$

Prilyginę (2.2.9) ir (2.2.10) lygčių dešines puses ir iš gautos lygybės išreiškę M_{22P} , turime:

$$M_{22P} = \frac{1 + 3 \cdot s_k^2}{1 + 3 \cdot s_k^2 - 2 \cdot (1 + s_k) \cdot s_k^{u+1}} \cdot M_{21P} \quad (2.2.11)$$

Laipsnio rodiklį u galime nustatyti iš formulės:

$$u = \frac{1}{\ln s} \ln \frac{M_1}{M_{1P}} \quad (2.2.12)$$

Norint gauti tikslesnį rezultatą, u apskaičiuojamas keletui slydimo taškų, imant $s > s_k$; apskaičiuojama vidutinė laipsnio reikšmė ir kaip u imamas artimiausias skaičius. Įvertinę (2.2.5) ir (2.2.8), turime tokią asinchroninio variklio išraišką:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max2} (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot s_k} + M_{22P} \cdot s^u \quad (2.2.13)$$

Gautoje asinchroninio variklio momento M išraiškoje (2.2.13) abi momento dedamosios yra slydimo s funkcijos ir jos galioja visame variklio slydimų diapazone nuo 0 iki 1. Tokia išraiška yra patogi naudoti skaičiuojant pereinamuosius procesus.

2.3. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išreiškimas polinomu

2.3.1. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos išreiškimas Makloreno eilutėmis

Asinchroninio variklio mechaninę charakteristiką galima išreikšti polinomu. Jei turime $\cos(s)$, $\sin(s)$, e^s funkcijas išskleistas Teiloro dar vadinamomis Makloreno eilutėmis gauname polinomus:

$$M(s) = \cos(s) = M(0) + \frac{M''(0)}{2!} s^2 + \frac{M''''(0)}{4!} s^4 + \dots + \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m; \quad (2.3.1.1)$$

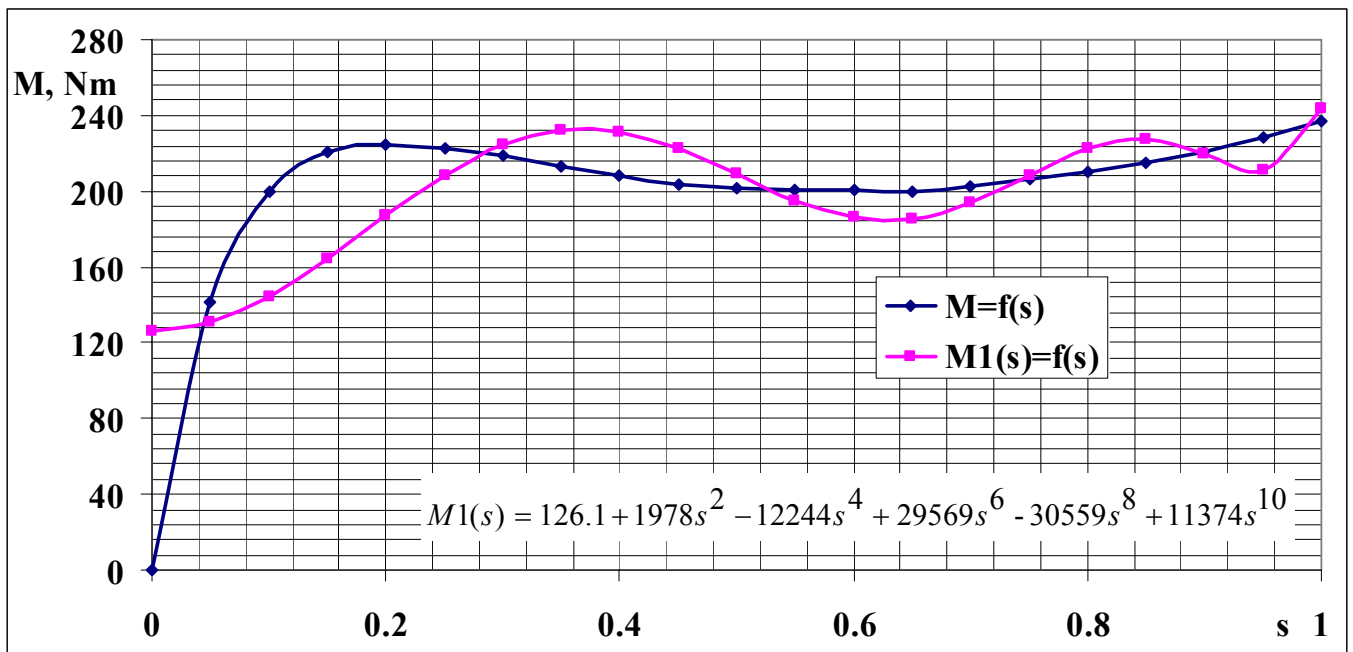
$$M(s) = \sin(s) = \frac{M'(0)}{1} s + \frac{M'''(0)}{3!} s^3 + \frac{M^{(5)}(0)}{5!} s^5 + \dots + \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m; \quad (2.3.1.2)$$

$$M(s) = e^{(s)} = M(0) + \frac{M'(0)}{1} s + \frac{M''(0)}{2!} s^2 + \frac{M'''(0)}{3!} s^3 + \dots + \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{M^{(m)}(0)}{m!} s^m. \quad (2.3.1.3)$$

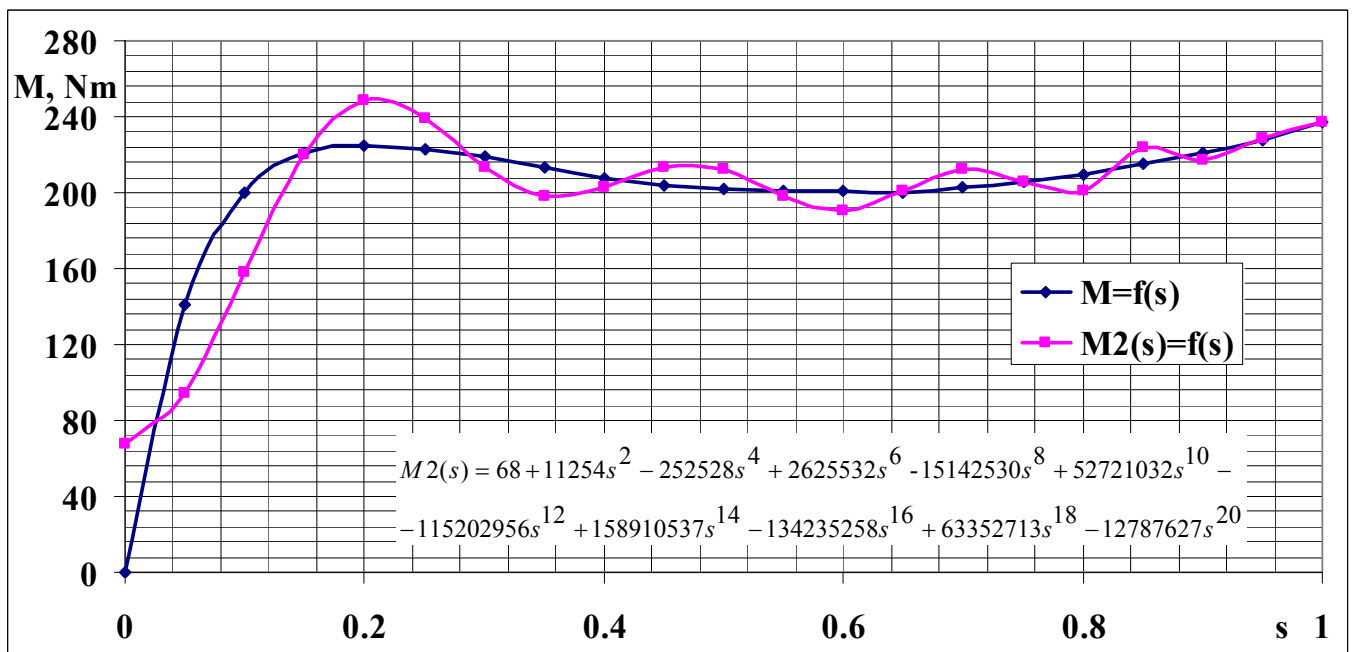
čia: $M^{(m)}(0)$ – funkcijos $M(s)$ m-ojo laipsnio išvestinė, kai $s=0$.

Šiomis eilutėmis galime aproksimuoti ir asinchroninių variklių mechanines charakteristikas parenkant atitinkamus koeficientus prieš kiekvieną polinomo narį. Palyginkime (2.3.1.1, 2.3.1.2, 2.3.1.3) eilutėmis aproksimuotas asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos polinomų funkcijų (2.3.1.1, 2.3.1.2, 2.3.1.3 pav.) kreives.

Mechaninės charakteristikos (2.3.1.1) eilute aproksimuotos 10 ir 20 laipsnio polinomais palyginimas pavaizduotas 2.3.1.1 paveiksle.



a)

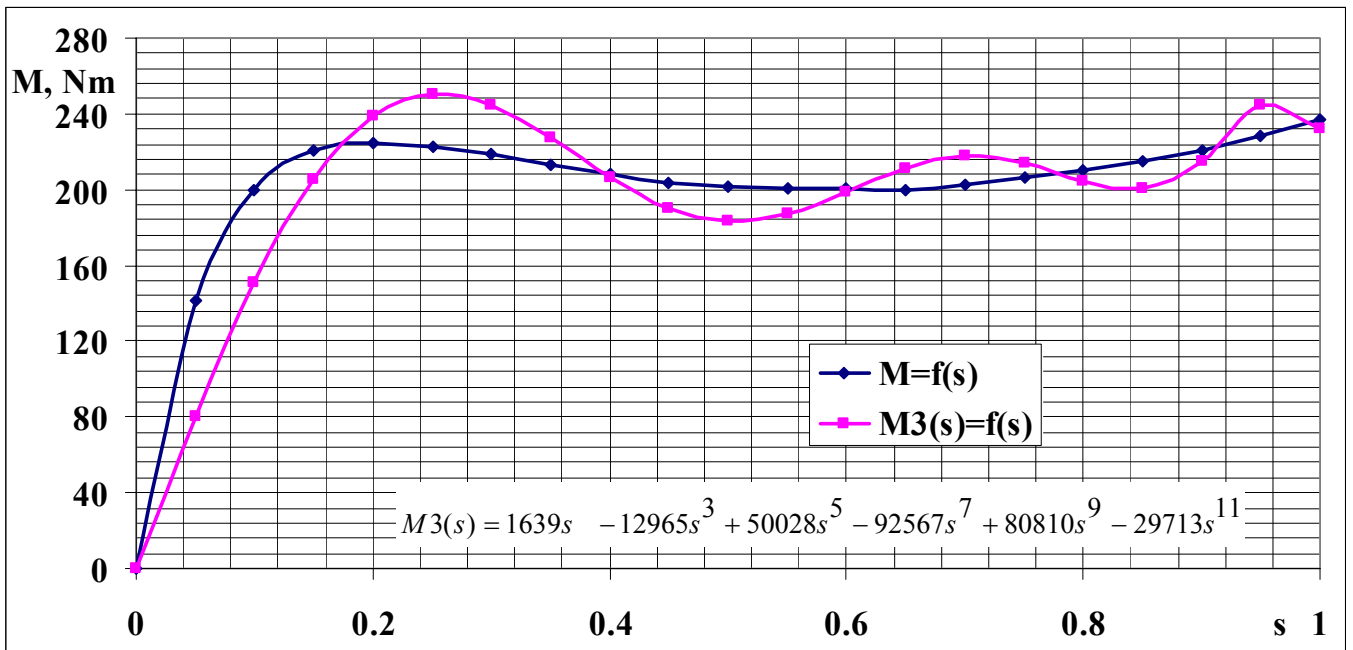


b)

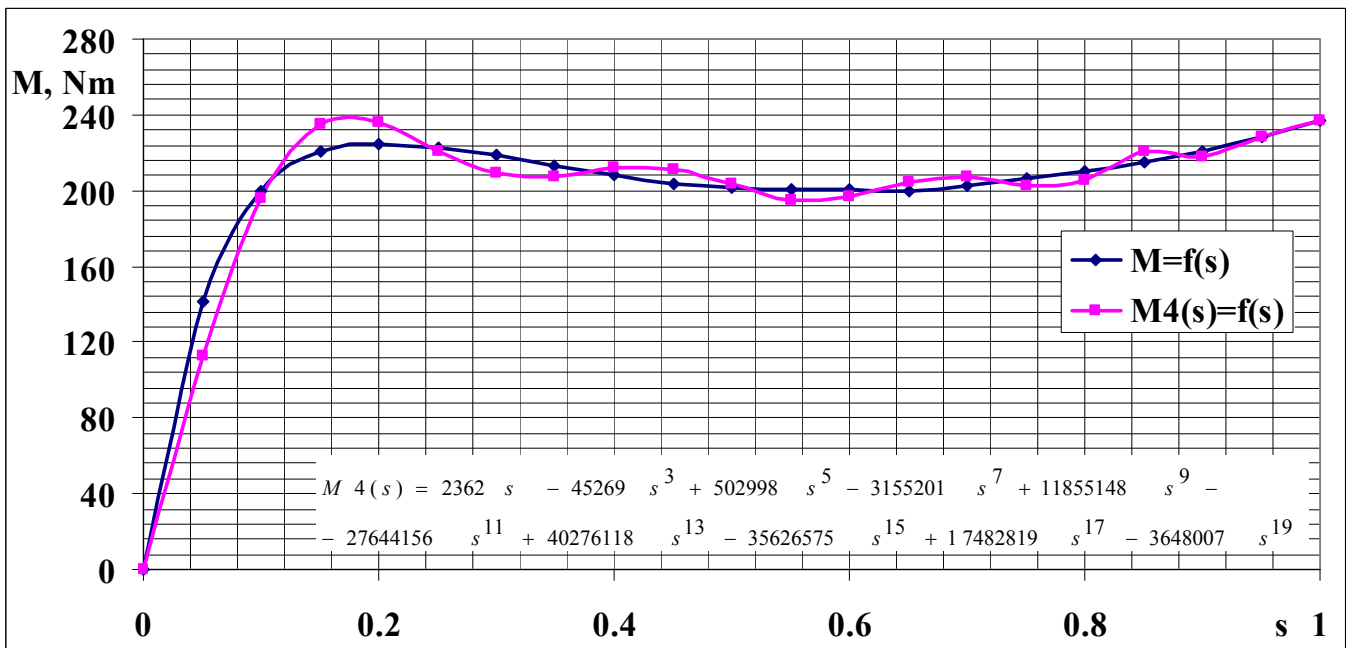
2.3.1.1 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M1(s)=f(s)$ aproksimuotos dešimto laipsnio polinomu; b) $M2(s)=f(s)$ aproksimuotos dvidešimto laipsnio polinomu; $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

Dešimto laipsnio funkcijos $M1(s)=f(s)$ (2.3.1.1 pav. a)) paskaičiuota kvadratinė paklaida (2.3.2.3) - $\Sigma\delta^2 = 26401$. Dvidešimto laipsnio funkcijos $M2(s)=f(s)$ (2.3.1.1 pav. b)) paskaičiuota kvadratinė paklaida - $\Sigma\delta^2 = 10207$.

Mechaninės charakteristikos (2.3.1.2) eilute aproksimuotos 11 ir 19 laipsnio polinomais palyginimas pavaizduotas 2.3.1.2 paveiksle.



a)

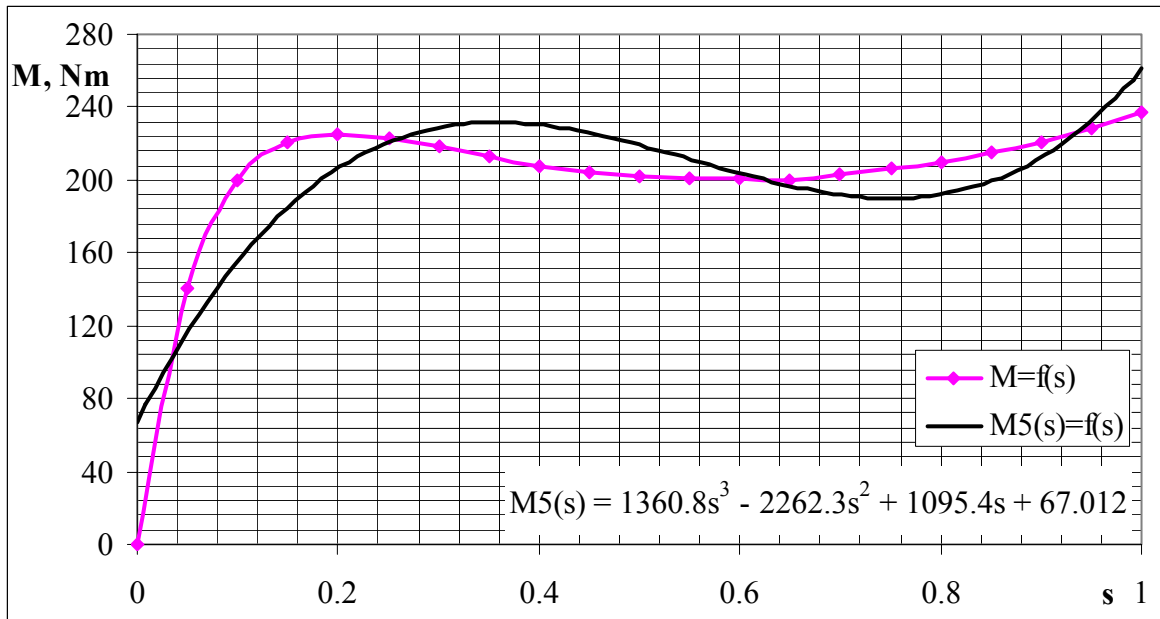


b)

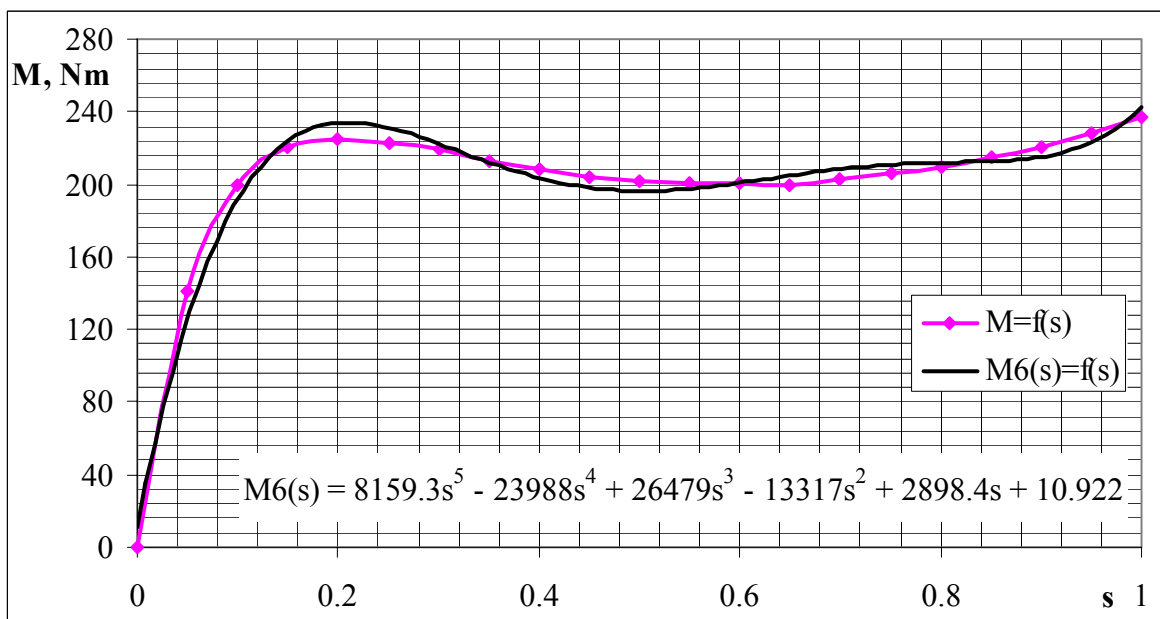
2.3.1.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M_3(s)=f(s)$ aproksimuotos vienuolikto laipsnio polinomu; b) $M_4(s)=f(s)$ aproksimuotos devyniolikto laipsnio polinomu;
 $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

Vieniolikto laipsnio funkcijos $M_3(s)=f(s)$ (2.3.1.2 pav. a)) paskaičiuota kvadratinė paklaida - $\Sigma\delta^2 = 9791$. Devyniolikto laipsnio funkcijos $M_4(s)=f(s)$ (2.3.1.2 pav. b)) paskaičiuota kvadratinė paklaida - $\Sigma\delta^2 = 1506$.

Mechaninės charakteristikos (2.3.1.4) eilute aproksimuotos 3 ir 5 laipsnio polinomais palyginimas pavaizduotas 2.3.1.3 paveiksle.



a)



b)

2.3.1.3 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos: a) $M5(s)=f(s)$ aproksimuotos trečio laipsnio polinomu; b) $M6(s)=f(s)$ aproksimuotos penkto laipsnio polinomu; $Mv=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

Trečio laipsnio funkcijos $M5(s)=f(s)$ (2.3.1.3 pav. a)) paskaičiuota kvadratinė paklaida - $\Sigma\delta^2 = 12187$. Penkto laipsnio funkcijos $M6(s)=f(s)$ (2.3.1.3 pav. b)) paskaičiuota kvadratinė paklaida - $\Sigma\delta^2 = 857$.

(2.3.1.1) ir (2.3.1.2) eilutėmis aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos polinamai yra didelio laipsnio rodiklio ir paklaidos gaunamos didesnės nei aproksimuojant (2.3.1.3) funkcija (2.3.1.1 pav., 2.3.1.2 pav., 2.3.1.3 pav.). Iš čia matome, kad asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aproksimuotos pagal (2.3.1.3) pavidalą kvadratinė paklaida yra mažiausia ($\Sigma \delta^2 = 857$) nors aproksimuojančio polinomo laipsnis ir nėra didžiausias.

Polinomo (2.3.1.3) vardiklyje yra faktorialai. Tai eksponentinės funkcijos išskleistos Teiloro eilute polinomo koeficientai. Norint aprašyti asinchroninio variklio mechaninę charakteristiką šiuo polinomu reikia parinkti tinkamus koeficientus. Šiuos koeficientus skaičiuosime mažiausių kvadratų polinominės regresijos metodu [1].

Aproksimavimo polinomo forma šiame darbe yra:

$$M(s) = M(0) + M'(0)s + M''(0)s^2 + M'''(0)s^3 + \dots + M^{(m)}(0)s^m. \quad (2.3.1.4)$$

2.3.2. Polinomo koeficientų radimas mažiausių kvadratų metodu

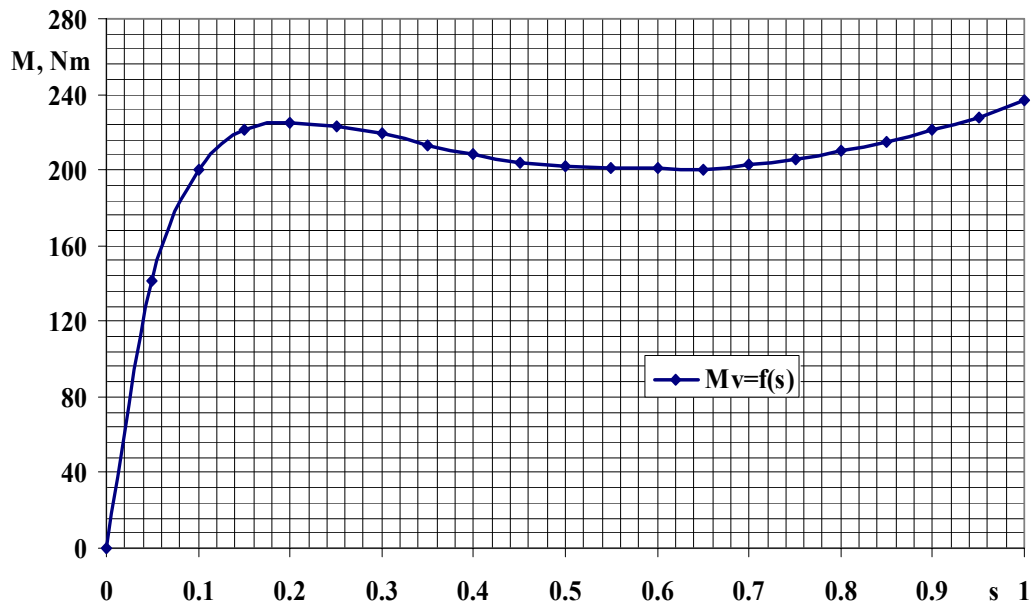
Asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi, mechaninė charakteristika skaičiuojama ir braižoma pagal variklio katalogo duomenis. Iš (2.1.10) ir (2.1.14) formulių apskaičiuojamas s_k . Po to, imant įvairias s reikšmes nuo 0 iki 1 pagal (2.1.12) arba (2.1.16) formules apskaičiuojama momento M reikšmė variklio režimui. Šiuolaikinių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos yra labai skirtingos [5], todėl Kłoso formulė šiems varikliams netinka, nes neįvertina srovės išstūmimo efekto rotoriaus trumpai sujungto narvelio stiebuose. Todėl daugelis šiuolaikinių asinchroninių variklių yra pateikiami jau su nubrėžta mechanine charakteristika, kurios matematinė išraiška yra nežinoma.

Tarkime, kad M kreivė 2.3.2.1 pav. yra realaus asinchroninio variklio mechaninė charakteristika, kurią gauname iš katalogo [1]. Pagrindiniai pasirinkto Siemens firmos asinchroninio narvelinio variklio techniniai duomenys pateikti 2.3.2.1 lentelėje.

2.3.2.1 lentelė.

Pagrindiniai pasirinkto variklio duomenys

h, m	P_{2N} , kW	n_N , min ⁻¹	η , %	$\cos \varphi_N$	I_N , A	s_k	M_N , Nm	M_p/M_N	i_p	M_k/M_N	J_r , kg·m ²	m, kg
225 M	45	2850	93,9	0,90	77	0,19	151	2,3	6,9	2,7	0,24	310



2.3.2.1 pav. Trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika

2.3.2.2 lentelėje pateikti realaus asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys.

2.3.2.2 lentelė.

Realaus asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys

s	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
M, Nm	0	141	200	221	225	223	219	213	208	204	202
s	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	
M, Nm	201	201	200	203	206	210	215	221	228	237	

Norint skaičiuoti šio variklio pereinamuosius procesus, reikia turėti šio trifazio asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos matematinę išraišką. Šią charakteristiką galima išreikšti polinomu (2.3.1.4).

Aproksimuojant asinchroninio variklio mechaninę charakteristiką naudojamas mažiausių kvadratų polinominės regresijos metodas [1].

Kvadratinis artėjimas mažiausių kvadratų metodu

Kai aproksimavimo polinomo laipsnio rodiklis $m=2$, tuomet empirinė formulė yra tokia:

$$M(s) = a_0 s^2 + a_1 s + a_2. \quad (2.3.2.1)$$

Skaičiuojami skirtumai, vadinami nuokrypomis:

$$\delta_k = a_0 s^2 + a_1 s + a_2 - M; \quad (2.3.2.2)$$

čia: $k=1, 2..n$; n – eksperimentinių reikšmių skaičius.

Tuomet nuokrypų kvadratų suma – kvadratinė paklaida:

$$\Sigma \delta^2 = \sum_{k=1}^n (a_0 s^2 + a_1 s + a_2 - M) = F(a_0, a_1, a_2). \quad (2.3.2.3)$$

Funkcijos $M(s)$ parametrus reikia parinkti taip, kad nuokrypos δ_k būtų tam tikra prasme mažiausios.

Visuomet galioja nelygybė $F(a_0, a_1, a_2) \geq 0$, todėl funkcija $F(a_0, a_1, a_2)$ turi minimumą.

Minimumo sąlygos randamos, išdiferencijavus (2.3.2.3) lygtį:

$$\begin{cases} \frac{\delta F}{\delta a_0} F(a_0, a_1, a_2) = 2 \sum_1^n s_k^2 (a_0 s^2 + a_1 s + a_2 - M_k) = 0; \\ \frac{\delta F}{\delta a_1} F(a_0, a_1, a_2) = 2 \sum_1^n s_k (a_0 s^2 + a_1 s + a_2 - M_k) = 0; \\ \frac{\delta F}{\delta a_2} F(a_0, a_1, a_2) = 2 \sum_1^n (a_0 s^2 + a_1 s + a_2 - M_k) = 0. \end{cases} \quad (2.3.2.4)$$

Iš šių lygčių galima parašyti normalinių lygčių sistemą:

$$\begin{cases} a_0 \sum_1^n s_k^4 + a_1 \sum_1^n s_k^3 + a_2 \sum_1^n s_k^2 = \sum_1^n s_k^2 M_k; \\ a_0 \sum_1^n s_k^3 + a_1 \sum_1^n s_k^2 + a_2 \sum_1^n s_k = \sum_1^n s_k M_k; \\ a_0 \sum_1^n s_k^2 + a_1 \sum_1^n s_k + a_2 n = \sum_1^n M_k; \end{cases} \quad (2.3.2.4)$$

kurią išsprendus, randami ieškomojo polinomo koeficientai.

Mažiausių kvadratų būdu pagal M, s reikšmes, pateiktas lentelėje, sudarysime antros eilės aproksimavimo polinomą.

2.3.2.3 lentelėje, be eksperimentinių M, s reikšmių, surašyti ir papildomų skaičiavimų duomenys.

2.3.2.3 lentelė.

Skaičiavimų duomenys aproksimavimo koeficientų nustatymui

s	M, Nm	s²	s³	s⁴	s*M	s²*M
0	0	0	0	0	0	0
0.05	141	0.0025	0.0001	6E-06	7.05	0.3525
0.1	200	0.01	0.001	0.0001	20	2
0.15	221	0.0225	0.0034	0.0005	33.15	4.9725
0.2	225	0.04	0.008	0.0016	45	9
0.25	223	0.0625	0.0156	0.0039	55.75	13.938
0.3	219	0.09	0.027	0.0081	65.7	19.71
0.35	213	0.1225	0.0429	0.015	74.55	26.093
0.4	208	0.16	0.064	0.0256	83.2	33.28
0.45	204	0.2025	0.0911	0.041	91.8	41.31
0.5	202	0.25	0.125	0.0625	101	50.5
0.55	201	0.3025	0.1664	0.0915	110.55	60.803
0.6	201	0.36	0.216	0.1296	120.6	72.36
0.65	200	0.4225	0.2746	0.1785	130	84.5
0.7	203	0.49	0.343	0.2401	142.1	99.47
0.75	206	0.5625	0.4219	0.3164	154.5	115.88
0.8	210	0.64	0.512	0.4096	168	134.4
0.85	215	0.7225	0.6141	0.522	182.75	155.34
0.9	221	0.81	0.729	0.6561	198.9	179.01
0.95	228	0.9025	0.8574	0.8145	216.6	205.77
1	237	1	1	1	237	237
Σ	10.5	4178	7.175	5.513	4.517	2238.2
						1545.7

Gauname šitokias normalines lygtis:

$$\begin{cases} 4,517a_0 + 5,513a_1 + 7,175a_2 = 1545,7; \\ 5,513a_0 + 7,175a_1 + 10,5a_2 = 2238,2; \\ 7,175a_0 + 10,5a_1 + 21a_2 = 4178. \end{cases} \quad (2.3.2.5)$$

Sprendžiame šią lygčių sistemą pasitelkdami MATLAB sistemą:

```
A=[4.517 5.513 7.175
```

```
5.513 7.175 10.5
```

```
7.175 10.5 21];
```

```
f = [1545.7 2238.2 4178];
```

```
disp(' a0, a1, a2 sprendiniai yra:')
```

```
X = A\f
```

```
a0, a1, a2 sprendiniai yra:
```

```
X =
```

```
-221.13
```

```
298.64
```

```
125.19
```

Ieškomo polinomo lygtis:

$$M(s) = -221.13s^2 + 298.64s + 125.19.$$

Apskaičiuojame nuokrypų reikšmes (2.3.2.6):

$$\begin{array}{ccccc} \delta_1 = -125.0 & \delta_2 = 1.6 & \delta_3 = 47.3 & \delta_4 = 56.0 & \delta_5 = 48.9 \\ \delta_6 = 37.0 & \delta_7 = 24.1 & \delta_8 = 10.3 & \delta_9 = -1.4 & \delta_{10} = -10.9 \\ \delta_{11} = -17.3 & \delta_{12} = -21.7 & \delta_{13} = -23.9 & \delta_{14} = -26.0 & \delta_{15} = -23.0 \\ \delta_{16} = -18.8 & \delta_{17} = -12.6 & \delta_{18} = -4.2 & \delta_{19} = 6.2 & \delta_{20} = 18.8 \\ \delta_{21} = 34.5. \end{array}$$

Aproksimavimo polinomo – funkcijos $M(s)$ parametrus reikia parinkti taip, kad nuokrypos δ_k būtų tam tikra prasme mažiausios.

Lygties adekvatumas.

Kad įsitikintume, ar lygtis teisingai aproksimuoja eksperimentinius duomenis tikrinamas sudarytos lygties adekvatumas. Tikrinant yra lyginamas eksperimentinių duomenų išsibarstymas atžvilgiu apskaičiuotų iš gautosios lygties su eksperimento paklaida, surasta iš lygiagrečių bandymų. Jeigu išsibarstymas yra tos pačios eilės, kaip ir eksperimento paklaida, tai jį galima paaiškinti eksperimentinėmis paklaidomis, ir lygtis yra adekvati. Jeigu išsibarstymas gerokai didesnis, tai matyti, jis nėra sukeltas vien tik bandymo paklaidos, o susijęs ir su lygties neadekvatumu. Tokiu atveju reikia imti sudėtingesnę lygtį. Kiekybiškai duomenų išsibarstymą apibūdina liekamoji dispersija σ_l^2 , kuri išreiškiama šitaip:

$$\sigma_l^2 = \frac{\sum \delta^2}{f_1}; \quad (2.3.2.6)$$

$f_1 = n - k$; čia: n – bandymo taškų skaičius, k – aproksimavimo lygties koeficientų skaičius.

Lygiagrečių bandymų išsibarstymą įvertina pasikartojimo dispersija σ_p^2 , kuri yra matuojamojo dydžio nuokrypų nuo vidutinės reikšmės kvadratų sumos santykis su laisvės laipsnių skaičiumi, vienetu mažesniu už lygiagrečių bandymų skaičių:

$$\sigma_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^l (M_i - \bar{M})^2}{f_2}; \quad (2.3.2.7)$$

$f_2 = l - 1$; čia: l – lygiagrečių bandymų skaičius, M_i – i -tojo bandymo rezultatas, \bar{M} – vidutinė lygiagrečių bandymų reikšmė.

Adekvatiškumas tikrinamas pagal Fišerio kriterijų, kuris yra lygus dispersijų santykiui:

$$F = \frac{\sigma_l^2}{\sigma_p^2}. \quad (2.3.2.8)$$

Jeigu gautas F mažesnis už F_k , tai sudaryta lygtis yra adekvati, o jeigu didesnis – neadekvati. Kritinių reikšmių lentelė, esant 5% reikšmingumo lygmeniui, pateikta literatūroje [1].

$$F = \frac{\sigma_l^2}{\sigma_p^2} < F_K; \quad (2.3.2.9)$$

čia: F_K – Fišerio kriterijus, kurio reikšmės skaičiuotos, kai pasiklojimo intervalas (p) 0,95 ir reikšmingumo lygmuo (q) 0,05.

Pasikartojimo dispersijai nustatyti reikia atlikti kelis bandymus viename taške. Gaunamos kelios M reikšmės, kai $s=0,2$:

$$M_i = 223; 224; 225; 227; 228; 229.$$

Apskaičiuojamas vidurkis - \bar{M} . Jis lygus 226.

Turint aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos lygties nuokrypas skaičiuojama nuokrypų kvadratų suma – kvadratinė paklaida (2.3.2.3):

$$\Sigma \delta^2 = 125^2 + 1.6^2 + 47.3^2 + 56^2 + 48.9^2 + 37^2 + 24.1^2 + 10.3^2 + 1.4^2 + 10.9^2 + 17.3^2 + 21.7^2 + 23.9^2 + 26^2 + 23^2 + 18.8^2 + 12.6^2 + 4.2^2 + 6.2^2 + 18.8^2 + 34.5^2 = 30213.$$

Tuomet pagal (2.3.2.6) lygtį liekamoji dispersija:

$$\delta_l^2 = \frac{30213}{21-3} = 1679.$$

Pasikartojimo dispersija iš (2.3.2.7) lygties:

$$\begin{aligned} \delta_p^2 &= \frac{(223-226)^2 + (224-226)^2 + (225-226)^2 + (227-226)^2 + (228-226)^2 + (229-226)^2}{6-1} = \\ &= \frac{28}{5} = 5,6. \end{aligned}$$

Iš (2.3.2.8) lygties:

$$F = \frac{1679}{5,6} = 300.$$

Iš kritinių reikšmių lentelės [1] randamas F_k . Kai laisvės laipsnių skaičiai $f_1=18$ ir $f_2=5$ - $F_k=4.59$.

Kadangi $F = \frac{\sigma_l^2}{\sigma_p^2} > F_k$, tai lygtis neadekvati. Todėl skaičiuojamas aukštesnės eilės polinomas.

Septintos eilės polinomas, kuris tenkintų $F < F_k$ sąlygą, ieškomas pasitelkiant MATLAB sistemą.

Polinomo koeficientų skaičiavimas naudojant MATLAB sistemą:

```

» s=[0,0.05,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65,0.7,0.75,0.8,0.85,0.9,0.95,1];
M = [0,141,200,221,225,223,219,213,208,204,202,201,201,200,203,206,210,215,221,228,237];
disp(' APROKSIMAVIMO REZULTATAS ')
disp('Polinomo koeficientai  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  yra:')
p =polyfit(s,M,7)
disp('*Pateikti aproksimuojančio polinomo koeficientai laipsnio mažėjimo tvarka.')
f=polyval(p,s);
plot(s,M,'o',s,f)

```

APROKSIMAVIMO REZULTATAS

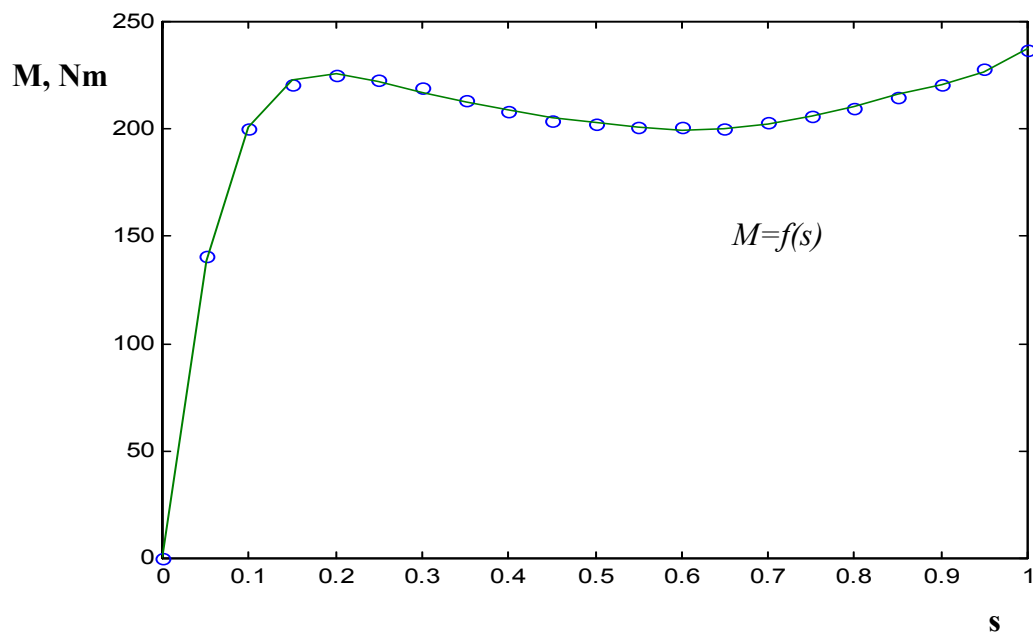
Polinomo koeficientai $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ yra:

```

p =
1.0e+005 *
Columns 1 through 7
0.2876 -1.1650 1.9430 -1.7245 0.8790 -0.2560 0.0383
Column 8
0.0000

```

*Pateikti aproksimuojančio polinomo koeficientai laipsnio mažėjimo tvarka.



2.3.2.2 pav. Asinchroninio variklio mechaninė charakteristika; rutuliukais pažymėti pasirinkto variklio mechaninės charakteristikos taškai, ištisine linija – apskaičiuotoji kreivė

Nustatyta pasirinkto asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aproksimuotos septinto laipsnio polinomu matematinės išraiškos funkcija:

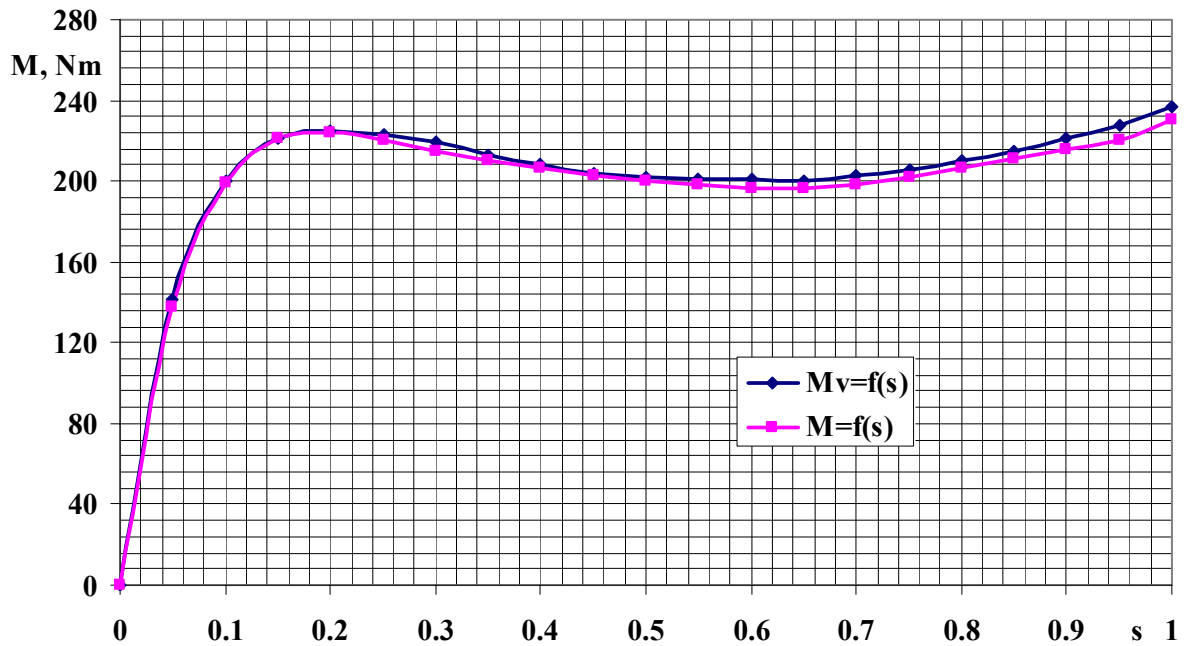
$$M = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s. \quad (2.3.2.9)$$

Septinto laipsnio polinomo kvadratinė paklaida (2.3.2.3) - $\Sigma \delta^2 = 282$ ir dispersijų santykis

$$F = \frac{21,7}{5,6} = 3,88 < 4,59, \text{ todėl septinto laipsnio lygtis (2.3.2.9) yra adekvati pasirinkto asinchroninio}$$

variklio mechaninei charakteristikai.

Aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos funkcija palyginta su realia 2.3.2.3 pav.



2.3.2.3 pav. Asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos:

$M_v=f(s)$ - pasirinkto trifazio asinchroninio variklio mechaninė charakteristika;

$M=f(s)$ - asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos aproksimuotos septinto laipsnio polinomu

2.3.2.4 lentelėje pateikti aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys.

2.3.2.4 lentelė.

Realios ir aproksimuotos asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos duomenys

s	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	
Reali M, Nm	0	141	200	221	225	223	219	213	208	204	
Aproksimuota M, Nm	0	137	199	221	224	220	215	210	206	203	
s	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
Reali M, Nm	202	201	201	200	203	206	210	215	221	228	237
Aproksimuota M, Nm	200	198	197	197	199	202	207	211	215	220	230

3. ELEKTROS PAVAROS JUDESIO LYGTIS IR JOS SPRENDIMAS

3.1. Elektros pavaros judesio lygtis

Asinchroninio variklio paleidimo trukmė nustatoma yra pasinaudojant pavaros judesio lygtimi [7]. 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 rotoriaus atžvilgiu ir veikia prieš variklio momentą. Todėl pasipriešinimo momento M_S teigiama kryptimi laikoma kryptis, priešinga teigiamai variklio momento kryptiai.

Jei pavaros kampinis sūkių dažnis yra pastovus, tai variklio momentas M lygus apkrovos momentui M_S :

$$M=M_S, \text{ arba } M-M_S=0 \quad (3.1.1)$$

Kai elektros pavaros kampinis sūkių dažnis kinta, (3.1.1) lygtis papildoma trečiu nariu - dinamiu momentu M_{din} :

$$M-M_S = M_{din}; \quad (3.1.2)$$

čia: M - variklio sukimo momentas, Nm;

M_S - apkrovos statinis pasipriešinimo momentas, Nm.

(3.1.2) lygtis vadinama pagrindine pavaros judėjimo lygtimi.

Pakeitus (3.1.2) lygtyje M_{din} , išraiška $M_{din} = \frac{Jd\omega}{dt}$, pavaros judėjimo lygtis tampa tokio pavidalo [7]:

$$M-M_S = \frac{Jd\omega}{dt}; \quad (3.1.3)$$

čia: J - pavaros inercijos momentas, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

ω - kampinis sūkių dažnis, rad/s.

Priimta, kad lygybė (3.1.3) galioja, kai inercijos momentas J pastovus dydis, ir galioja daugeliui elektros pavarų.

Inercijos momentas gali būti išreikštas ir taip:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}, \text{ kg}\cdot\text{m}^2; \quad (3.1.4)$$

čia: ρ ir D – inercijos spindulys ir diametras, m; G – svorio jėga, N; $g=9,81\text{m/s}^2$ – laisvo kritimo pagreitis.

Jei (3.1.3) lygybėje J ir ω išreikšti per GD^2 ir n , gaunama praktiniams skaičiavimams patogesnė lygybės forma:

$$M-M_S = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (3.1.5)$$

(3.1.5) lygybėje $GD^2=4gJ$, Nm^2 .

Analizuojant (3.1.3) lygybę galimos tokios sąlygos:

1. Kai $M > M_s$; $\frac{d\omega}{dt} > 0$, t.y. pavara įsibėgėja;
2. Kai $M < M_s$; $\frac{d\omega}{dt} < 0$, t.y. pavara lėtėja (akivaizdu, kad pavara lėtės ir tada, kai

variklio momentas bus neigiamas, t.y. ji dirbs stabdymo režimu);

3. Kai $M = M_s$; $\frac{d\omega}{dt} = 0$; šiuo atveju pavara dirba nusistovėjusiame režime.

Darbo metu sukimo momentas yra teigiamas jei jis pavara veikia variklio veleno sukimosi kryptimi, ir neigiamas, kai veikia priešinga kryptimi.

Pasipriešinimo momentas veikiantis variklio veleną turi dvi dedamąsias: atliekamo naudingo darbo dedamoji ir trinties jėga. Naudingo darbo dedamoji savaime aišku, kad susijusi su mechanizmo atliekama veika.

(3.1.3) lygybė tinka elektros mašinai dirbančiai variklio režimu, kai veikia reaktyvūs pasipriešinimo (stabdymo) momentas. Bendru atveju elektros pavaros lygtis gali būti užrašyta taip:

$$\pm M \mp M_s = \frac{Jd\omega}{dt}; \quad (3.1.6)$$

Ženklaai prieš M ir M_s momentų priklauso atitinkamai nuo elektros mašinos darbo režimo ir apkrovos momento pobūdžio.

Pavaros judesio lygtis leidžia nustatyti momento, srovės ir sūkių dažnio nuo laiko priklausomybių pereinamuosius procesus.

Judesio lygties momentai turi atitikti tai pačiai elektros pavaros sistemai. Dažniausiai pasipriešinimo ir dinaminis momentai išreiškiami tais pačiais vienetais, kaip ir elektros variklio veleno momentas.

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

Pagal [10], kai $M_s = \text{const.}$ pavaros judesio lygtis su asinchroniniu varikliu turi tokį pavidalą:

$$\frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - M_s = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.2.1)$$

Iš (3.2.1) lygties išsireiškus dt turime:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \frac{(s^2 + s_k^2)}{(s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k + s_k^2)} ds. \quad (3.2.2)$$

Norint gauti išraišką, kurią galima būtų integruoti, skaitiklį ir vardiklį turime išreikšti vienodu pavidalu:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \frac{(s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k + s_k^2 + 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k)}{(s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k + s_k^2)} ds. \quad (3.2.3)$$

Suprastinus (3.2.3) išraišką turime:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k}{s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k + s_k^2} \right) ds. \quad (3.2.4)$$

Toliau suskaidome gautą trupmeną į paprastesnes trupmenas. Randame vardiklyje esančios išraiškos šaknis sprendami lygtį:

$$s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_s} s s_k + s_k^2 = 0. \quad (3.2.5)$$

Šita lygtis charakterizuoja nusistovėjusį pavaros režimą ir gali būti gauta iš (3.2.1), jei $ds/dt=0$.

Išspręsta lygtis duoda dvi šaknis:

$$s_{c1,c2} = s_k \left[\frac{M_k}{M_s} \pm \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_s} \right)^2 - 1} \right]. \quad (3.2.6)$$

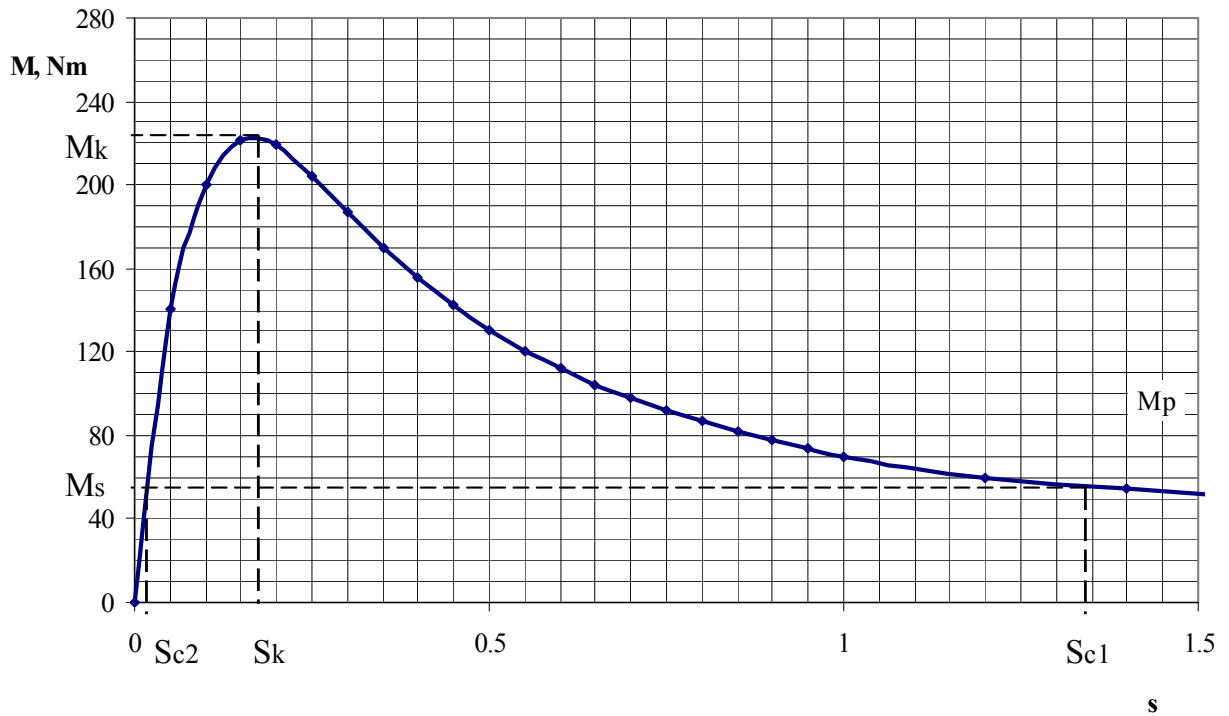
Teigiamo ženklo atveju M_s šaknis s_{c2} reiškia nusistovėjusią slydimo reikšmę. Antru atveju s_{c1} atitinka nenusistovėjusį režimą prie slydimo, viršijanti s_k , ir daugelyje atvejų aptinkami labai didelių slydimų zonoje (3.2.1 pav.).

Dėl galimybės paleisti variklį, turime priimti tam tikras sąlygas:

$$s_{c1} < s_l;$$

čia: s_l – pradinis slydimas, lygus vienetui.

Kai $s_{c1} > 1$, variklio paleidimo momentas mažesnis nei statinis momentas, ir variklio įsibėgėjimas yra neįmanomas (3.2.2 pav.).



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

Naudojant lygties (3.2.5) šaknis, išraišką (3.2.4) galime užrašyti:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot M_k s_k}{M_s} \left(\frac{A}{s-s_{c1}} + \frac{B}{s-s_{c2}} \right) \right] ds. \quad (3.2.7)$$

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 čia:

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

Priėmus, kad $s=s_{c1}$ gauname $A(s_{c1}-s_{c2}) = s_{c1}$, iš čia:

$$A = \frac{s_{c1}}{(s_{c1}-s_{c2})}. \quad (3.2.8)$$

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

$$B = \frac{s_{c2}}{(s_{c1}-s_{c2})}. \quad (3.2.9)$$

Įrašius A ir B koeficientus į (3.2.7) išraišką turime:

$$dt = \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot M_k s_k}{(s_{c1} - s_{c2})} \left(\frac{s_{c1}}{s - s_{c1}} + \frac{s_{c2}}{s - s_{c2}} \right) \right] ds. \quad (3.2.10)$$

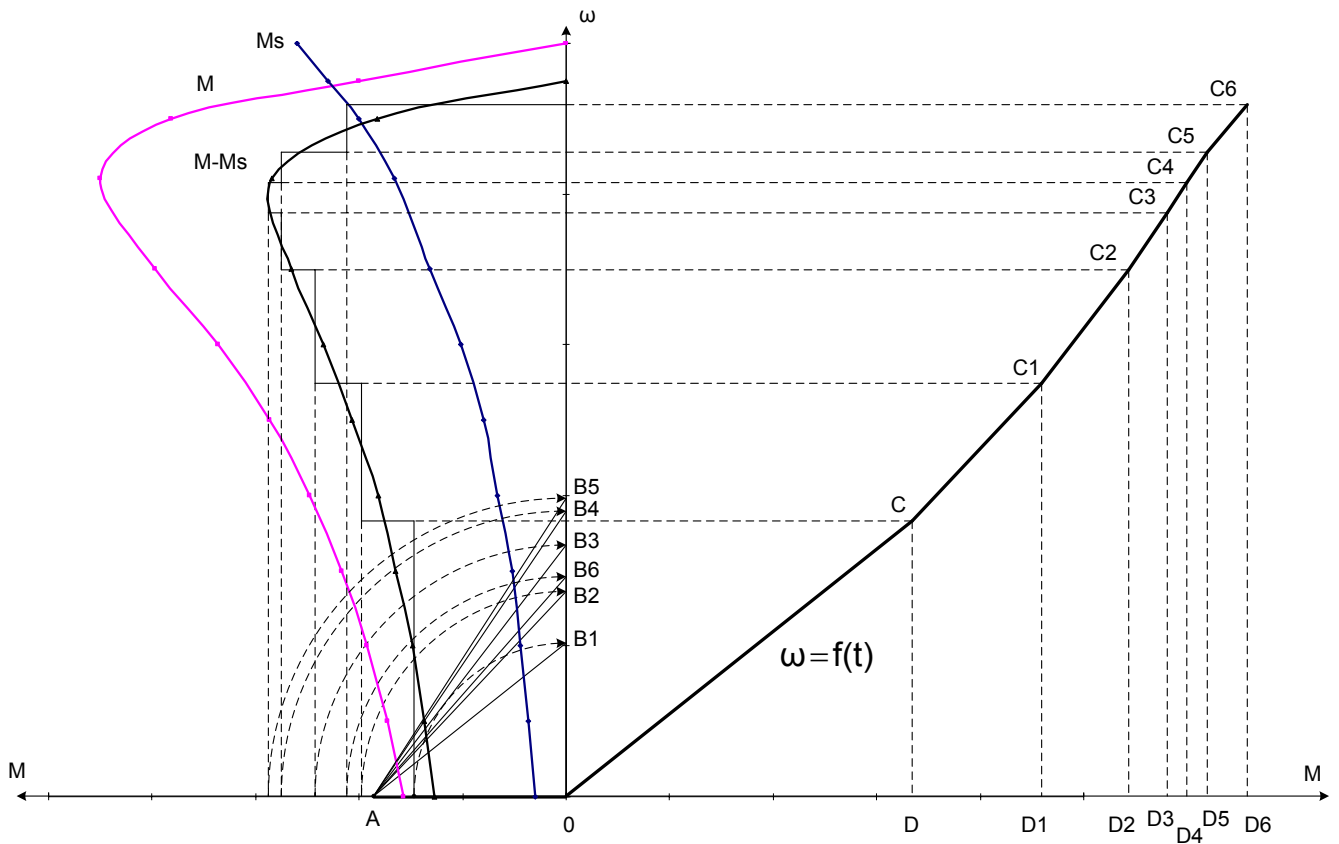
Integruojant (3.2.10) išraišką, intervale nuo s_1 iki s_2 turime asinchroninio variklio paleidimo laiko trukmės išraišką:

$$\begin{aligned} t &= \frac{J\omega_0}{M_s} \cdot \int_{s_1}^{s_2} \left[1 + \frac{2 \cdot M_k s_k}{(s_{c1} - s_{c2})} \left(\frac{s_{c1}}{s - s_{c1}} + \frac{s_{c2}}{s - s_{c2}} \right) \right] ds = \\ &= T_M \cdot \frac{M_K}{M_s} \left[\frac{s_2 - s_1}{s_k} + \frac{2 \cdot M_k s_k}{(s_{c1} - s_{c2})} \left(s_{c1} \ln \frac{s_{c1} - s_2}{s_{c1} - s_1} + s_{c2} \ln \frac{s_{c2} - s_2}{s_{c2} - s_1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

Kadangi paleidimo laikas teoriškai lygus begalybei, tai praktiškai, kad gauti realią reikšmę reikia vietoj s_2 įrašyti: $s_2 = 0,95s_{c2}$.

3.3. Grafinis pavaros judėjimo lygties sprendimas

Jei negalime matematiškai išspręsti pavaros judesio lygties, tai sprendžiame pavyzdžiui, taip vadinamu proporcijų metodu arba baigtinio padidėjimo metodu [11]. Esmė šio metodo ta, kad be galo mažus sūkių dažnio padidėjimus $d\omega$ bei laiko dt pakeičiame mažais baigtiniais padidėjimais $\Delta\omega$, Δt . Yra skaitoma, kad elektros pavaros lygtyje yra vidutinės variklio momento ir pasipriešinimo momento reikšmės, kiekvienam sūkių dažnio pasikeitimo periodui. Šios vidutinės momento reikšmės paprastai randamos grafiniu būdu, pasinaudojant variklio bei gamybinio mechanizmo mechaninių charakteristikų kreivėmis.



3.3.1 pav. Grafinis sūkių dažnio kreivės $\omega=f(t)$ radimas proporcijų metodu

Proporcijų metodas remiasi elektros pavaros judesio lygtimi.

$$M - M_s = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3.1)$$

Kai kuriuose laiko intervaluose dt , momentų skirtumas $M - M_s$ lieka pastovus dydis, todėl gaunama proporcija:

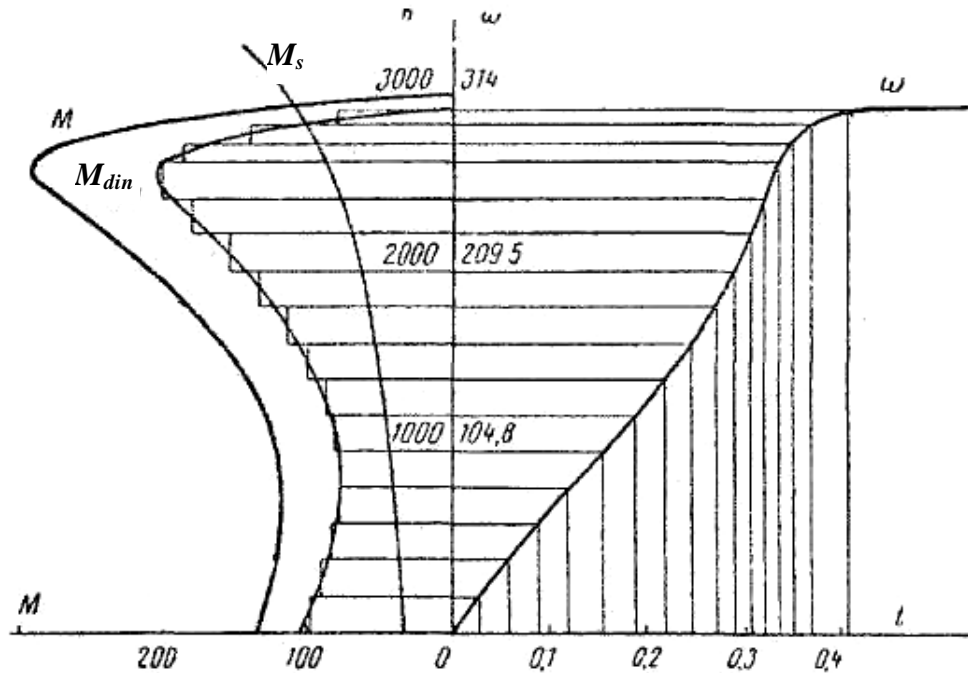
$$\frac{M - M_s}{J} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3.2)$$

3.3.1 pav. pateikta sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė - $\omega=f(t)$ ir variklio paleidimo laikas surandamas proporcijų (3.3.2) pagrindu. Kairiajame 3.3.1 pav. kvadrato braižomos $M=f(\omega)$ ir $M_s=f(\omega)$

charakteristikos. Grafiškai randamas jų skirtumas. Skirtumas $M-M_s=f(\omega)$ - dinaminio momento kreivė pavaizduota tame pačiame kvadrato. Ją pakeičiame laiptuota padalinta intervalais M - charakterizuoja ieškomą funkciją $\omega=f(t)$ 1-am momentų intervalui. Tai yra iš trikampių AOB_1 ir ODC panašumo.

Iš tikrųjų $\frac{OB_1}{OA} = \frac{CD}{OD}$, bet $OB_1 = M-M_s$; $OA = J$, $CD = d\omega$, todėl atkarpa OD pagal lygtį (3.3.2)

atitinka paleidimo laiką I-ame intervale, t.y $OD = dt_i$.



3.3.2 pav. Grafinis sūkių dažnio kreivės $\omega=f(t)$ radimas ploto metodu

Pravedant analogišką darbą kitiems intervalams $M-M_s$, brėžiame variklio sukimosi sūkių dažnio kreivę ir randame ieškomą pavaros paleidimo laiką.

Braižant reikia įvertinti mastelio dydžius:

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

čia: m_M - momento mastelis;

m_J - mastelis inercijos momento;

m_ω - variklio sūkių dažnio mastelis;

m_t - laiko mastelis.

Jeigu pasirenkami trijų dydžių masteliai: momento, sūkių dažnio, laiko, tai iš parodyto santykio randame ketvirtą - inercijos momento mastelį. Panašus sūkių dažnio kreivės braižymas paleidimo laiko nustatymui tinka, ir kintamos, ir nuolatinės srovės varikliams, jeigu mechaninė charakteristika negali būti išreikšta analitiškai.

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

Yra braižomos mechaninės variklio ir mechanizmo charakteristikos. Po to iš šių dviejų charakteristikų yra randama dinaminio momento kreivė $M_{dim}=M-M_s$ (3.3.2 pav.).

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

Kiekvienam atkarpos intervalui bus teisinga sekanti išraiška:

$$dt = J \frac{d\omega}{M-M_s}.$$

Prie vienodų $d\omega$ reikšmių, visuose intervaluose paleidimo laikas bus randamas, pagal formulę:

$$t = \sum_1^m dt = Jd\omega \sum_1^m \frac{1}{M - M_s}.$$

čia: m - atkarpų skaičius;

$d\omega = const.$ - sūkių dažnio pokytis kiekviename intervale;

$M-M_s$ - atitinkama dinaminio momento reikšmė kiekviename intervale.

4. ASINCHRONINIO VARIKLIO PALEIDIMO TRUKMĖS SKAIČIAVIMAS

Paleidimo laikas (t) apskaičiuojamas pasinaudojant pavaros judesio lygtimi:

$$M - Ms = \frac{Jd\omega}{dt}. \quad (4.1)$$

Kai $Ms = \text{const.}$ ir

$$M = a_0 \cdot s^7 + a_1 \cdot s^6 + a_2 \cdot s^5 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^3 + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot s + a_7 \quad (4.2)$$

pavaros judesio lygtis su asinchroniniu varikliu turi tokį pavidalą:

$$(a_0 \cdot s^7 + a_1 \cdot s^6 + a_2 \cdot s^5 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^3 + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot s + a_7) - Ms = \frac{Jd\omega}{dt}. \quad (4.3)$$

Kairėje lygties pusėje yra slydimas s , o dešinėje - variklio kampinis sūkių dažnis ω . Pertvarkius $d\omega/dt$ galima išreikšti per slydimą s .

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}; \quad (4.4)$$

$$\omega_1 s = \omega_1 - \omega; \quad (4.5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_1 \frac{ds}{dt}. \quad (4.6)$$

Irašius šią išraišką į (4.3) lygtį gaunasi:

$$(a_0 \cdot s^7 + a_1 \cdot s^6 + a_2 \cdot s^5 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^3 + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot s + a_7) - Ms = -J\omega_1 \frac{ds}{dt}. \quad (4.7)$$

Iš (4.6) lygties išsireiškus dt gaunasi:

$$dt = -J\omega_1 \cdot \frac{1}{(a_0 \cdot s^7 + a_1 \cdot s^6 + a_2 \cdot s^5 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^3 + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot s + a_7) - Ms} ds. \quad (4.8)$$

Lygtį (4.8) galima užrašyti taip:

$$dt = -J\omega_1 \frac{G(s)}{H(s)} ds; \quad (4.9)$$

$$\text{čia: } G(s) = 1; \quad (4.10)$$

$$H(s) = a_0 \cdot s^7 + a_1 \cdot s^6 + a_2 \cdot s^5 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^3 + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot s + a_7 - Ms. \quad (4.11)$$

Integruodami (4.9) lygtį, kai slydimas s kinta nuo 1 iki s , gauname išibėgėjimo trukmes iki variklis pasieks slydimą s , t. y.:

$$t = -J\omega_1 \int_1^s \frac{G(s)}{H(s)} ds. \quad (4.12)$$

Lygčiai (4.10) integruoti, polinomų santykį išskaidome į dedamųjų sumą:

$$\frac{G(s)}{H(s)} = \frac{A_1}{s-s_1} + \frac{A_2}{s-s_2} + \frac{A_3}{s-s_3} + \frac{A_4}{s-s_4} + \frac{A_5}{s-s_5} + \frac{A_6}{s-s_6} + \frac{A_7}{s-s_7}; \quad (4.13)$$

čia: $s_1 - s_7$ - vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys;

$A_1 - A_7$ - skaidymo koeficientai.

Skaidymo koeficientus galima rasti taip:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)}; \quad (4.14)$$

čia: $G(s_i)$ - vardiklio polinomo vertė, kai $s=s_i$;

$H'(s_i)$ - vardiklio polinomo išvestinė, kai $s=s_i$.

Gavus reikiamus duomenis, lygtis (4.8) integruojama:

$$\begin{aligned} t &= -J\omega_1 \int_1^s \left(\frac{A_1}{s-s_1} + \frac{A_2}{s-s_2} + \frac{A_3}{s-s_3} + \frac{A_4}{s-s_4} + \frac{A_5}{s-s_5} + \frac{A_6}{s-s_6} + \frac{A_7}{s-s_7} \right) ds = \\ &= -J\omega_1 \left(A_1 \int_1^s \frac{ds}{s-s_1} + A_2 \int_1^s \frac{ds}{s-s_2} + A_3 \int_1^s \frac{ds}{s-s_3} + A_4 \int_1^s \frac{ds}{s-s_4} + A_5 \int_1^s \frac{ds}{s-s_5} + A_6 \int_1^s \frac{ds}{s-s_6} + A_7 \int_1^s \frac{ds}{s-s_7} \right) = \\ &= -J\omega_1 \left((A_1 [\ln(s-s_1) - \ln(1-s_1)]) + (A_2 [\ln(s-s_2) - \ln(1-s_2)]) + \right. \\ &+ (A_3 [\ln(s-s_3) - \ln(1-s_3)]) + (A_4 [\ln(s-s_4) - \ln(1-s_4)]) + \\ &+ (A_5 [\ln(s-s_5) - \ln(1-s_5)]) + (A_6 [\ln(s-s_6) - \ln(1-s_6)]) + \\ &\left. + (A_7 [\ln(s-s_7) - \ln(1-s_7)]) \right). \end{aligned} \quad (4.15)$$

Integruojant (4.8) lygybę intervale nuo 1 iki s , gaunamas variklio paleidimo laiką:

$$\begin{aligned} t &= -J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + \right. \\ &\left. + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right]. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n :

$$s = \frac{n_n - n}{n_n}; \quad (4.17)$$

čia: n - rotoriaus sūkių dažnis;

n_n - oro tarpo magnetinio lauko sūkių dažnio,

$$\text{kur: } n = n_n - s \cdot n_n \quad (4.18)$$

Taigi iš gautų (4.10) ir (4.12) išraiškų galima sudaryti sūkių dažnio priklausomybę nuo laiko $n_s = f(t)$.

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

4.1. Asinchroninio variklio pereinamojo proceso skaičiavimas, kai variklis apkrautas tiesiškai kintama apkrova

Konstantos reikalingos skaičiavimams pateiktos 2.3.2.1 lentelėje.

Skaičiuojamos kitos konstantos.

Kampinis tinklo dažnis: $\omega_0 = 2\pi \cdot \omega_N = 2 \cdot 3,14159 \cdot 50 = 314,159 \text{ Hz}$;

čia: ω_N - tinklo nominalus dažnis (Hz).

Kampinis veleno sukimosi dažnis: $\omega_1 = \frac{\omega_0}{p} = \frac{314,159}{1} = 314,159 \text{ rad/s}$;

čia: p - polių porų skaičius.

Suminis inercijos momentas: $\Sigma J = J_r + J_a = 0,24 + 0,96 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

čia: J_a - redukuotas mechanizmo inercijos momentas $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

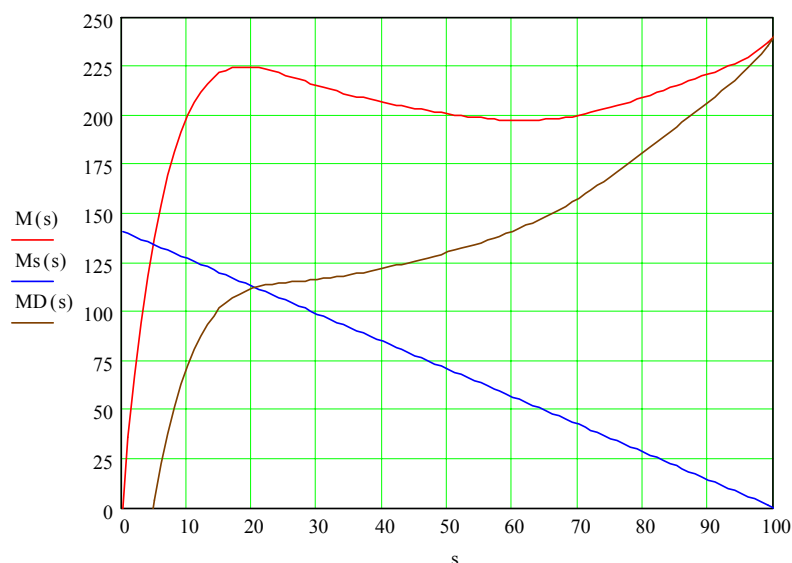
$$Ms(s) = M_N(1-s) = 141(1-s) = -141s + 141.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3971 \cdot s - 141.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti 4.1.1 paveiksle.



4.1.1. pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3971 \cdot s - 141.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

M=[28760 -116500 194300 -172450 87900 -25600 3971 -141];

disp('SKAIČIAVIMO REZULTATAS')

disp('Šaknys s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7 yra:')

s = roots(M);

SKAIČIAVIMO REZULTATAS

Šaknys s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7 yra:

s =

0.0483

0.2389 - 0.2905i

0.2389 + 0.2905i

0.6582 - 0.3695i

0.6582 + 0.3695i

1.1042 - 0.2032i

1.1042 + 0.2032i

Taigi vardiklio polinomo šaknys yra:

s4 := 0.6582– 0.3695i

s1 := 0.0483

s5 := 0.6582+ 0.3695i

s2 := 0.2389– 0.2905

s6 := 1.1042– 0.2032i

s3 := 0.2389+ 0.2905

s7 := 1.1042+ 0.2032i

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds} (MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3971.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

H1 = 2040.603

H2 = 726.18– 1512.688i

H3 = 726.18+ 1512.688i

H4 = –790.327– 1558.277i

H5 = –790.327+ 1558.277i

H6 = –3450.541– 1501.763i

H7 = –3450.541+ 1501.763i

(4.13) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

$$A_1 := \frac{1}{H_1}$$

$$A_2 := \frac{1}{H_2}$$

$$A_3 := \frac{1}{H_3}$$

$$A_4 := \frac{1}{H_4}$$

$$A_5 := \frac{1}{H_5}$$

$$A_6 := \frac{1}{H_6}$$

$$A_7 := \frac{1}{H_7}$$

$$A_1 = 4.8969 \times 10^{-4}$$

$$A_2 = 2.579 \times 10^{-4} + 5.371i \times 10^{-4}$$

$$A_3 = 2.579 \times 10^{-4} - 5.371i \times 10^{-4}$$

$$A_4 = -2.591 \times 10^{-4} + 5.104i \times 10^{-4}$$

$$A_5 = -2.591 \times 10^{-4} - 5.104i \times 10^{-4}$$

$$A_6 = -2.437 \times 10^{-4} + 1.061i \times 10^{-4}$$

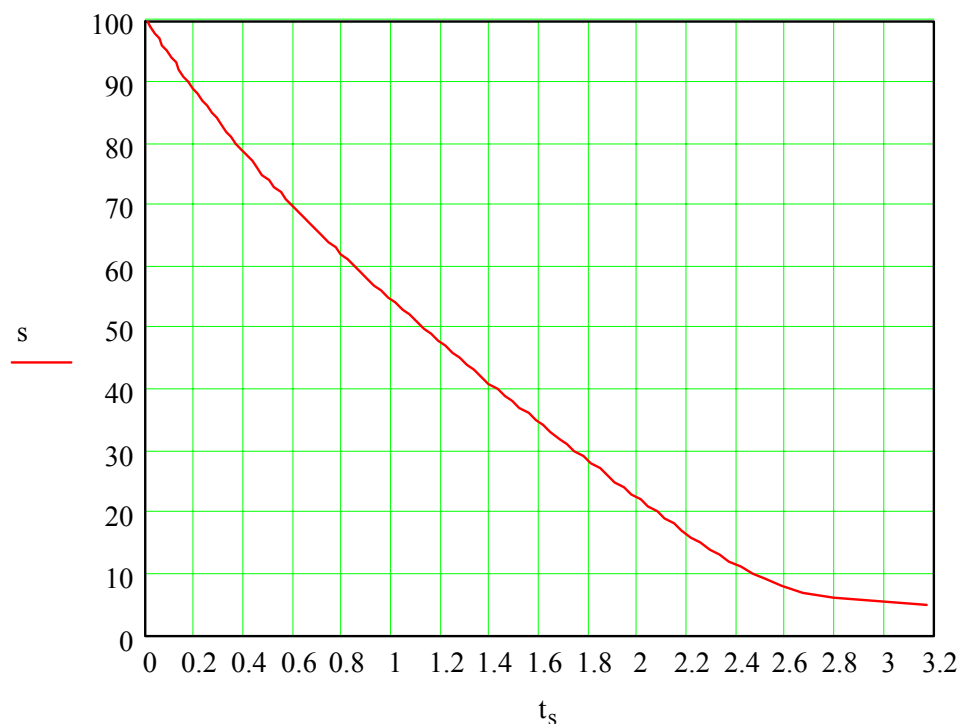
$$A_7 = -2.437 \times 10^{-4} - 1.061i \times 10^{-4}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=1 \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J \omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

$$\text{čia: } \Sigma J \omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$$

Slydimio s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota 4.1.2 paveiksle.

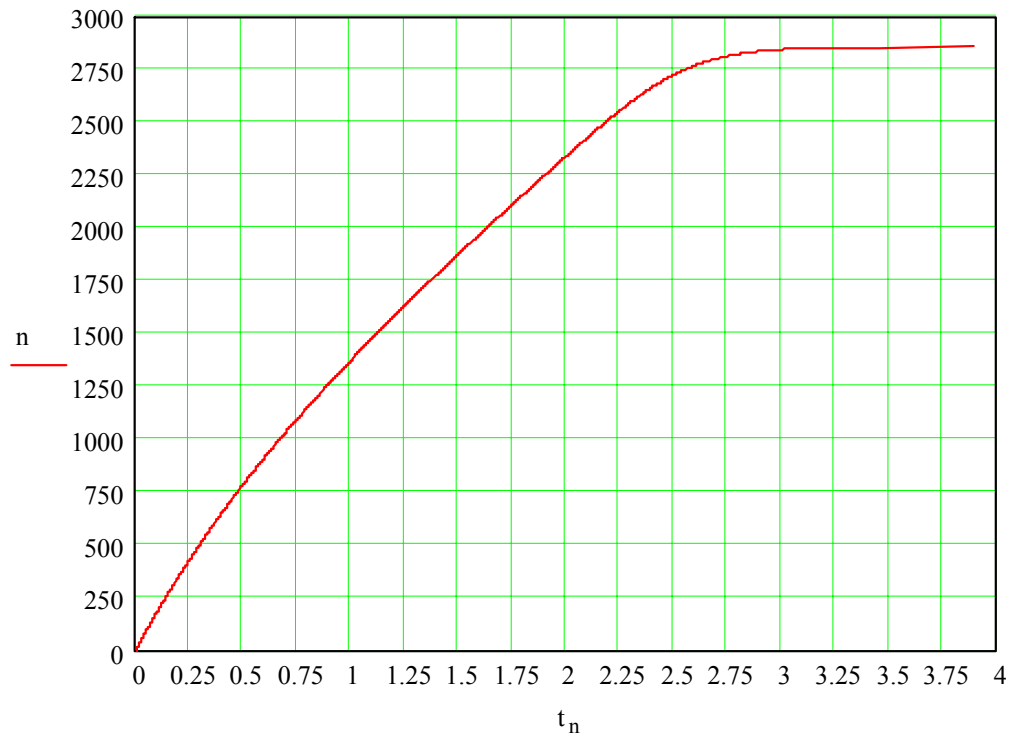


4.1.2 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičius sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybę - $s=f(t)$ pavaizduota 4.1.3 paveiksle.



4.1.3 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

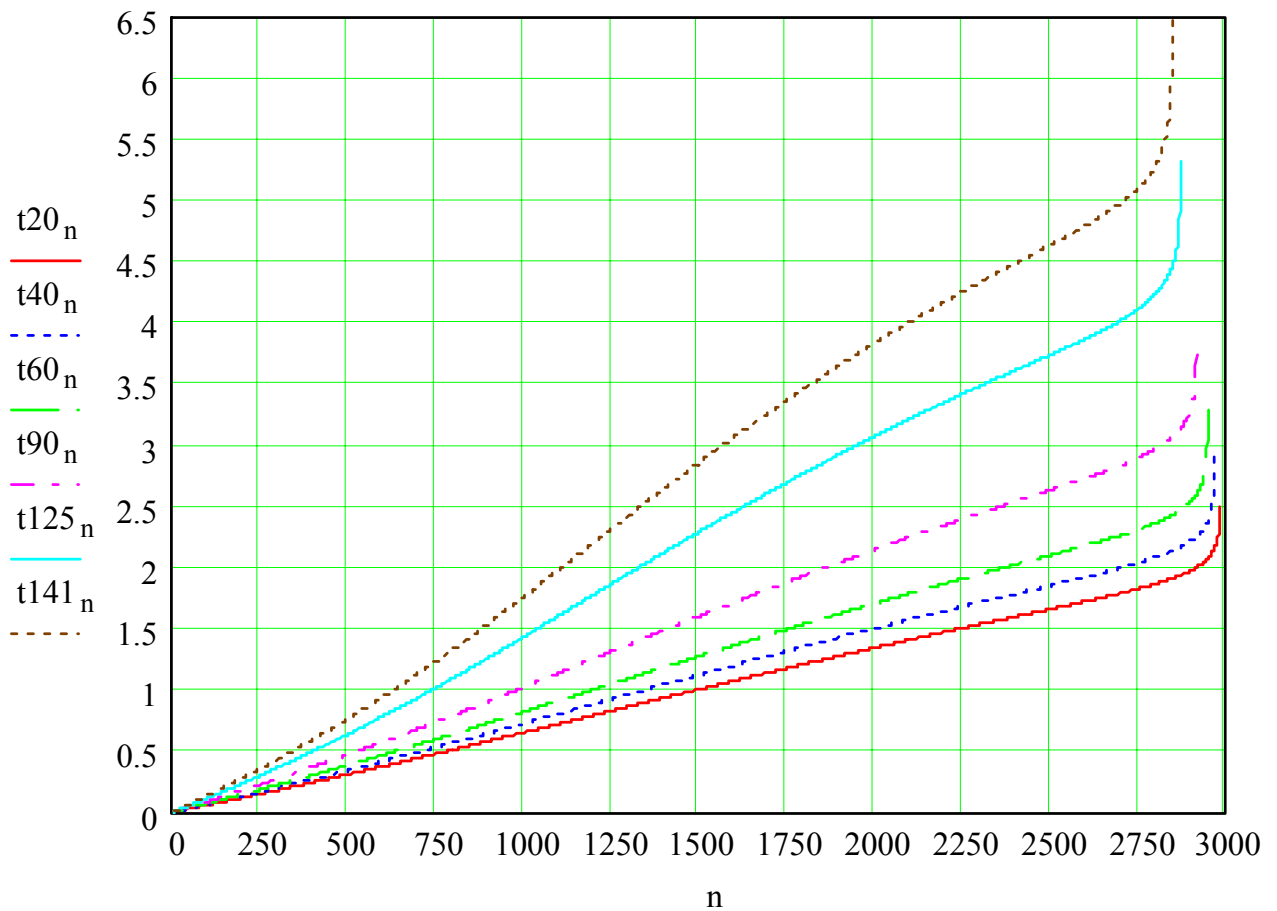
$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098.$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,098$ pagal (4.16) yra:

$$t=2,47s.$$

4.1.4 paveiksle pavaizduota variklio sūkių dažnio nuo laiko priklausomybės esant skirtingoms apkrovoms.



4.1.4 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybės esant skirtingoms apkrovoms $n=f(t)$

Kai variklio apkrova $M_s=20Nm$ (t_{20_n} kreivė) pavaros paleidimo laikas – $t=1,8s$, kai $M_s=40Nm$ (t_{40_n} kreivė) – $t=2,0s$, kai $M_s=60Nm$ (t_{60_n} kreivė) – $t=2,3s$, kai $M_s=90Nm$ (t_{90_n} kreivė) – $t=2,8s$, kai $M_s=125Nm$ (t_{125_n} kreivė) – $t=4,0s$, kai $M_s=141Nm$ (t_{141_n} kreivė) – $t=5,0s$,

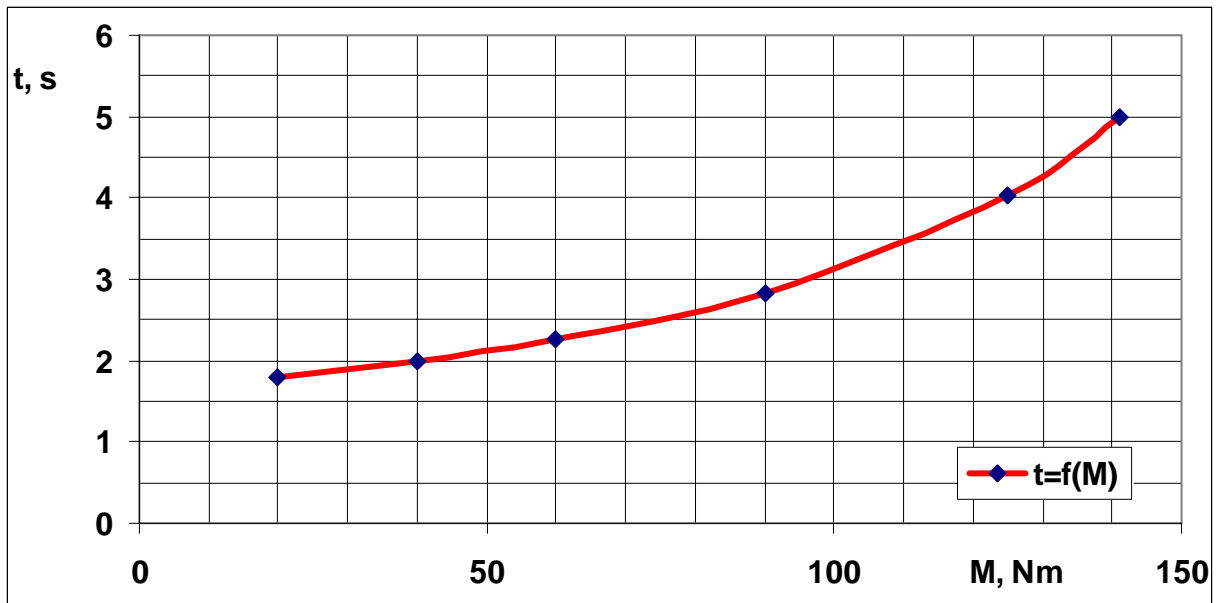
4.1.2 lentelėje surašyti asinchroninio variklio paleidimo laikai esant skirtingoms apkrovoms.

4.1.2 lentelė.

Asinchroninio variklio paleidimo laikai esant skirtingoms pastovioms apkrovoms

Skaičiavimo variantas (2 priedas)	1	2	3	4	5	6
M_s, Nm	141	125	90	60	40	20
t_p, s	5.0	4.0	2.8	2.3	2.0	1.8

4.1.5 paveiksle pavaizduota asinchroninio variklio paleidimo laiko nuo apkrovos priklausomybė.



4.1.5 pav. Paleidimo laiko priklausomybė nuo apkrovos $t=f(M)$

Skaičiavimų duomenys $t=f(M)$ priklausomybei pavaizduoti (4.1.4 pav.) pateikti 2 priede.

Jei pavara apkrauta kintama apkrova ($M_s=0..141$) ji išibėgėja per 2,47 sekundes. Tai iš 4.1.5 pav. galima matyti, kad ta pati pavara apkrauta pastovia apkrova išibėgės per 2,47 sekundės jei bus apkrauta tik 70 Nm.

IŠVADOS

1. Kadangi šiuolaikinių asinchroninių elektros variklių mechaninės charakteristikos yra labai įvairios, jų analitinei išraiškai užrašyti netinka Kłoso formulė. Modifikavus mechaninės charakteristikos matematinę išraišką, galima aprašyti bet kokią mechaninę charakteristiką praktinėms reikmėms pakankamu tikslumu.
2. Variklio mechaninė charakteristika išreiškiama polinomu, kurios tikslumas priklauso nuo aproksimavimo lygties laipsnio.
3. Naudojant išvestą variklio mechaninės charakteristikos išraišką, galima atlikti paleidimo proceso analizę bei apskaičiuoti variklio paleidimo laiką.
4. Aprašytos variklio greičio ir momento nuo laiko priklausomybės leidžia nustatyti 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.

LITERATŪRA

1. Aleksa V. Gamybos procesų automatizavimas/ V. Aleksa, S. Dailidė, J. Staniškis. Vilnius, 1976. 344p.
2. Automatizuotų elektros pavarų pagrindai/ Michailas Čilikinas, Michailas Sokolovas, Vladimiras Terechovas, Aleksandras Šinianskis. Vilnius: Mokslas, 1978. 423 p.
3. Palm, William J. Modeling, Analysis, and Control of Dynamic Systems. New York, 2000. 853 p. ISBN 0-471-07370-9
4. Ramonas Z. Technologijos fakulteto studijų darbų parengimo tvarka: mokomoji knyga/ Z. Ramonas, V. Petronis, D. Čikotienė. Šiauliai, 2004. 43 p.
5. SIEMENS, Drehstrom - Niederspannungsmotoren Kfing-laufmotoren. Katalog M 11. -Bad Neusiedt a. d. Saale, 1999. 142 S.
6. Šimkevičius T., Lapė R. J. Šiuolaikinių asinchroninių variklių mechaninės charakteristikos// Elektrotechnika: Mokslo darbai. Kaunas: Technologija, 2001, nr. 25 (34), p.88-91.
7. Vasin V. Elektros pavara. Vilnius: Mokslas, 1988. 215p.
8. Андреев В. П. Основы электропривода/ В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. Москва Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 772 с.
9. Вольдек А. И. Электрические машины. - Ленинград: Энергия, 1974. 840 с.
10. Москаленко В. В. Автоматизированны привод. – Москва: Энергоиздат, 1986. 412с.
11. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. Москва: Энергия, 1971. 432 с.
12. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода/ М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. Москва: Энергия, 1981. 576 с.

Asinchroninio variklio paleidimo laikų skaičiavimas esant skirtingoms variklio apkrovoms

1. Kai variklis apkrautas pastovia 141 Nm apkrova

Konstantos reikalingos skaičiavimams pateiktos 5.2.1 lentelėje.

Skaičiuojamos kitos konstantos būtinos skaičiavimams atlikti.

Kampinis tinklo dažnis: $\omega_0 = 2\pi \cdot \omega_N = 2 \cdot 3,14159 \cdot 50 = 314,159 \text{ Hz}$;

čia: ω_N - tinklo nominalus dažnis (Hz).

Kampinis veleno sukimosi dažnis: $\omega_1 = \frac{\omega_0}{p} = \frac{314,159}{1} = 314,159 \text{ rad/s}$;

čia: p - polių porų skaičius.

Suminis inercijos momentas: $\Sigma J = J_r + J_a = 0,24 + 0,96 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

čia: J_a - redukuotas mechanizmo inercijos momentas $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

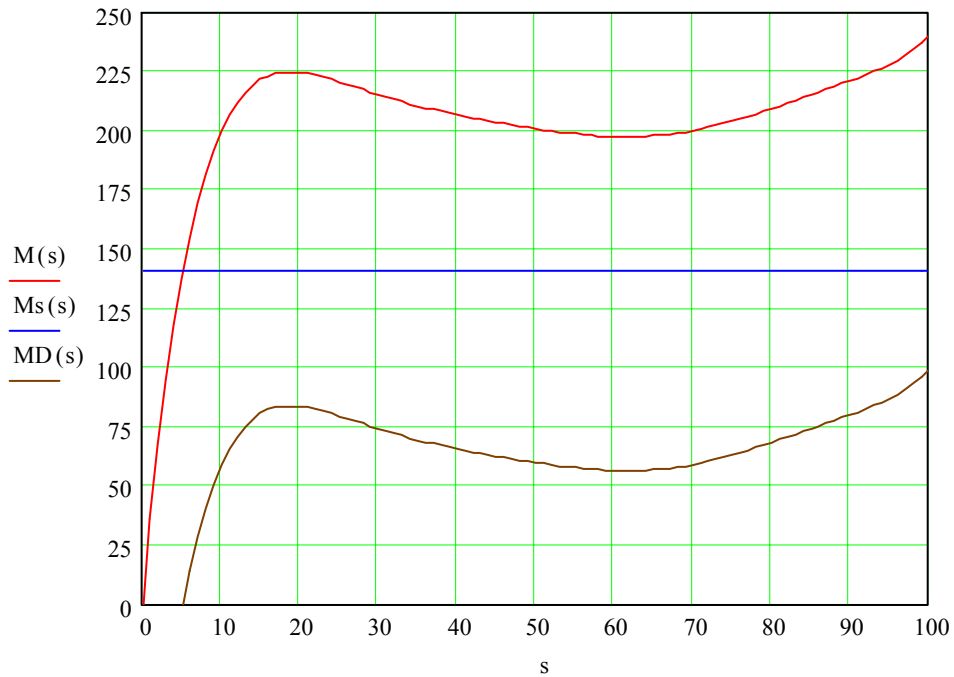
$$Ms(s) = 141.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 141.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.1 paveiksle.



P1.1 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($M_s(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 141.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

- s1 := 0.05194
- s2 := 0.27783 - 0.28506i
- s3 := 0.27783 + 0.28506i
- s4 := 0.66647 - 0.27819i
- s5 := 0.66647 + 0.27819i
- s6 := 1.05511 - 0.16998i
- s7 := 1.05511 + 0.16998i

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds} (MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

$$\begin{aligned}
H_1 &= 1792.226 \\
H_2 &= 773.758 - 813.424i \\
H_3 &= 773.758 + 813.424i \\
H_4 &= -167.503 - 666.38i \\
H_5 &= -167.503 + 666.38i \\
H_6 &= -1527.6 - 710.704i \\
H_7 &= -1527.6 + 710.704i
\end{aligned}$$

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

$$A_1 := \frac{1}{H_1}$$

$$A_2 := \frac{1}{H_2}$$

$$A_3 := \frac{1}{H_3}$$

$$A_4 := \frac{1}{H_4}$$

$$A_5 := \frac{1}{H_5}$$

$$A_6 := \frac{1}{H_6}$$

$$A_7 := \frac{1}{H_7}$$

$$A_1 = 5.5797 \times 10^{-4}$$

$$A_2 = 6.139 \times 10^{-4} + 6.454i \times 10^{-4}$$

$$A_3 = 6.139 \times 10^{-4} - 6.454i \times 10^{-4}$$

$$A_4 = -3.548 \times 10^{-4} + 1.411i \times 10^{-3}$$

$$A_5 = -3.548 \times 10^{-4} - 1.411i \times 10^{-3}$$

$$A_6 = -5.381 \times 10^{-4} + 2.504i \times 10^{-4}$$

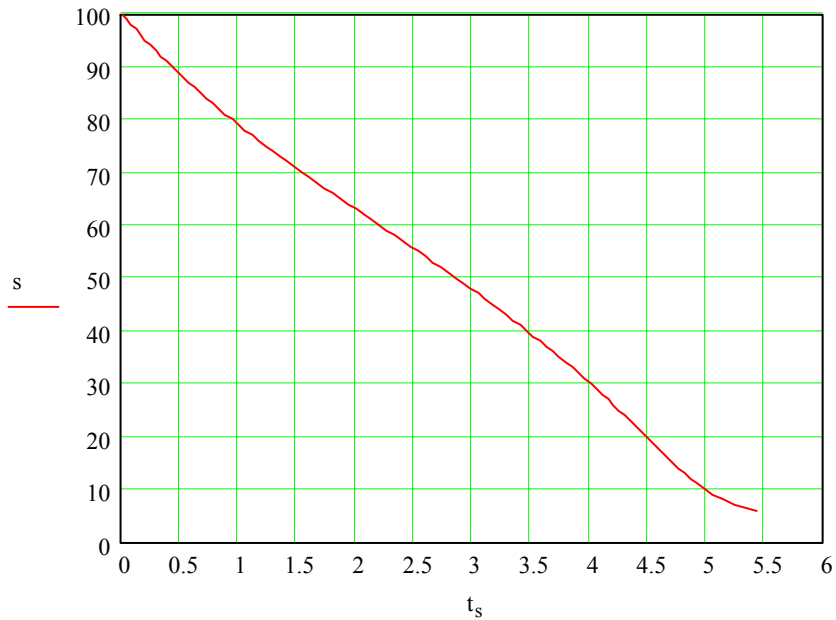
$$A_7 = -5.381 \times 10^{-4} - 2.504i \times 10^{-4}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$\begin{aligned}
t(s) = -\Sigma J \omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + \right. \\
\left. + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];
\end{aligned}$$

$$\text{čia: } \Sigma J \omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$$

Slydimio s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.2 paveiksle.

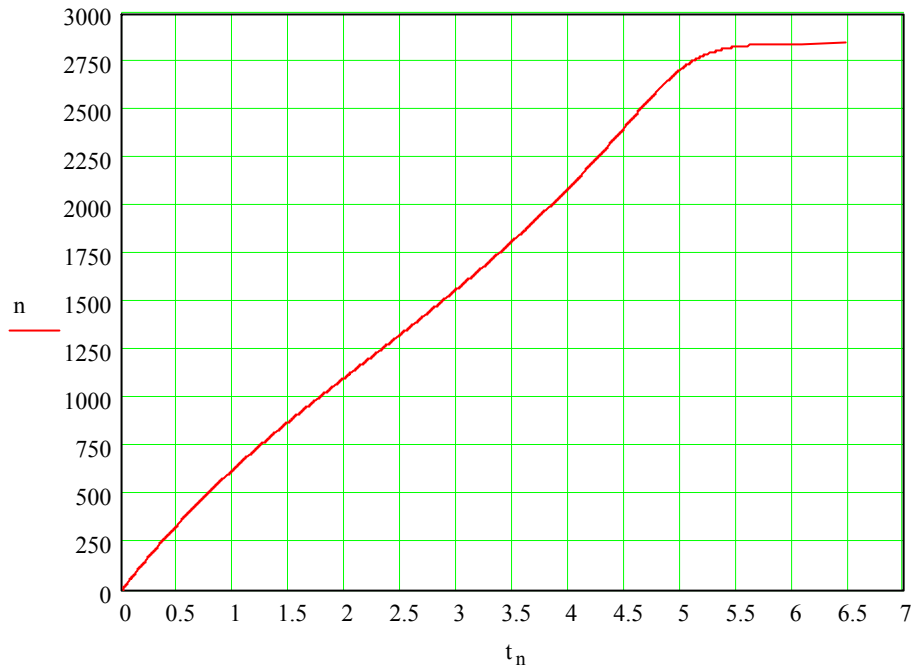


P1.2 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičius sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybę - $s=f(t)$ pavaizduota P1.3 paveiksle.



P1.3 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=1 \div 0,098$ yra:
 $t=4,991s$.

2. Kai variklis apkrautas pastovia 125 Nm apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

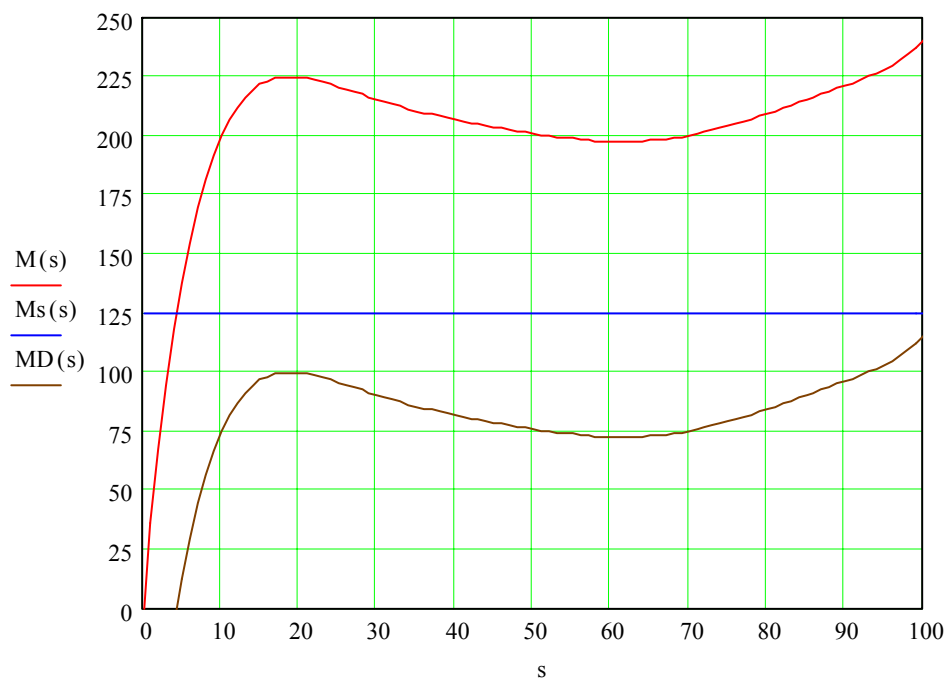
$$Ms(s) = 125.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 125.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.4 paveiksle.



P1.4 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 125.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

$$\begin{aligned} s1 &:= 0.04359 \\ s2 &:= 0.26901 - 0.29462i \\ s3 &:= 0.26901 + 0.29462i \\ s4 &:= 0.67146 - 0.29826i \\ s5 &:= 0.67146 + 0.29826i \\ s6 &:= 1.06312 - 0.17378i \\ s7 &:= 1.06312 + 0.17378i \end{aligned}$$

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds}(MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

$$\begin{aligned} H1 &= 2045.511 \\ H2 &= 897.03 - 999.021i \\ H3 &= 897.03 + 999.021i \\ H4 &= -206.939 - 841.87i \\ H5 &= -206.939 + 841.87i \\ H6 &= -1738.078 - 838.75i \\ H7 &= -1738.078 + 838.75i \end{aligned}$$

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

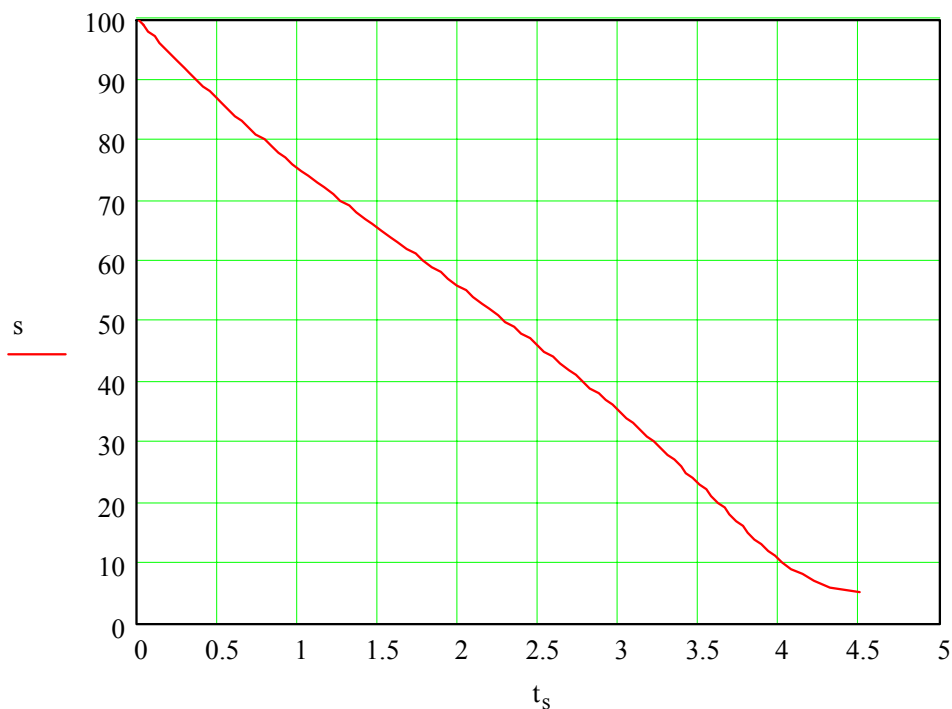
$$\begin{aligned} A1 &:= \frac{1}{H1} & A1 &= 4.8888 \times 10^{-4} \\ A2 &:= \frac{1}{H2} & A2 &= 4.976 \times 10^{-4} + 5.542i \times 10^{-4} \\ A3 &:= \frac{1}{H3} & A3 &= 4.976 \times 10^{-4} - 5.542i \times 10^{-4} \\ A4 &:= \frac{1}{H4} & A4 &= -2.753 \times 10^{-4} + 1.12i \times 10^{-3} \\ A5 &:= \frac{1}{H5} & A5 &= -2.753 \times 10^{-4} - 1.12i \times 10^{-3} \\ A6 &:= \frac{1}{H6} & A6 &= -4.667 \times 10^{-4} + 2.252i \times 10^{-4} \\ A7 &:= \frac{1}{H7} & A7 &= -4.667 \times 10^{-4} - 2.252i \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + \right. \\ \left. + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

čia: $\Sigma J\omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$

Slydimo s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.5 paveiksle.

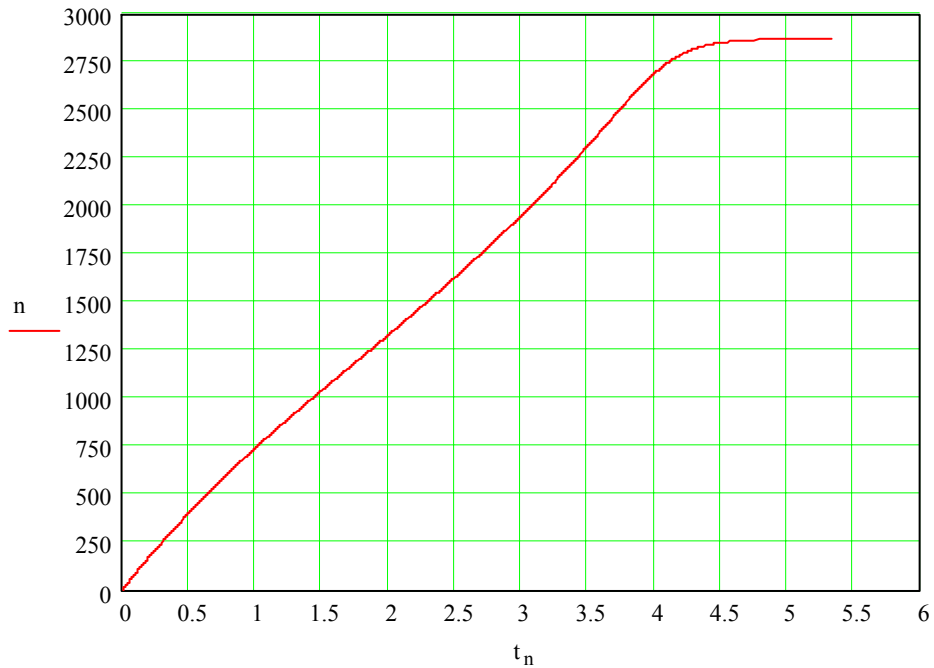


P1.5 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičiavus sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.6 paveiksle.



P1.6 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=I \div 0,098$ yra:

$$t=4,029s.$$

3. Kai variklis apkrautas pastovia 90 Nm apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

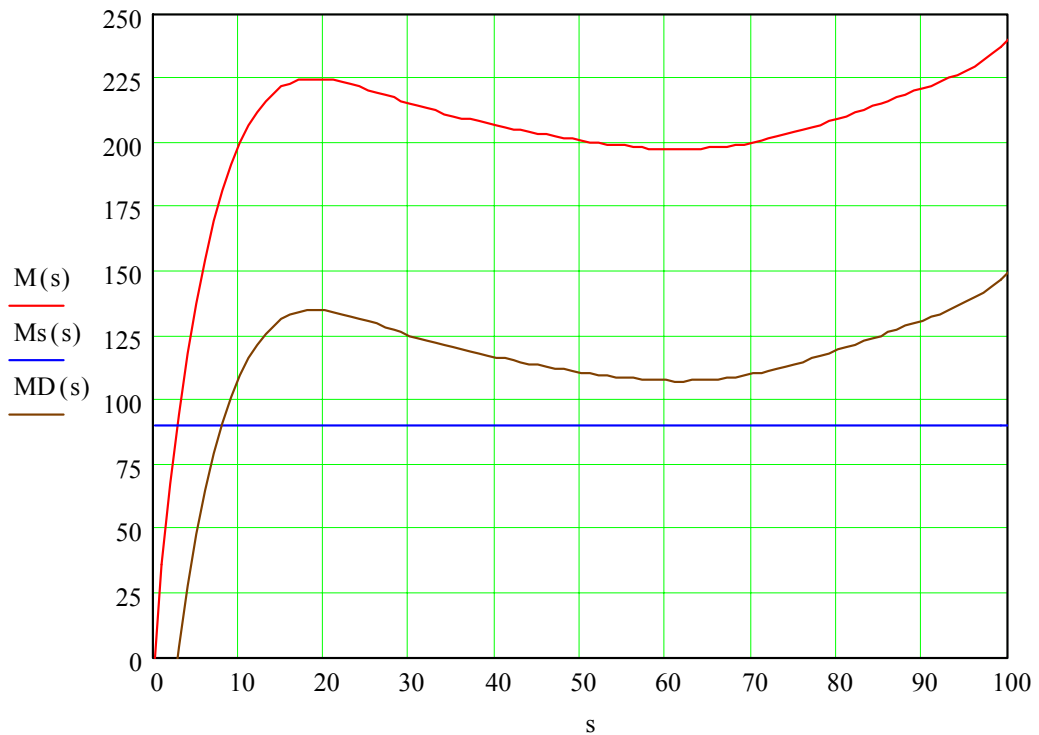
$$Ms(s) = 90.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 90.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.7 paveiksle.



P1.7 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($M_s(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 90.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

- s1 := 0.02839
- s2 := 0.25439 - 0.31155i
- s3 := 0.25439 + 0.31155i
- s4 := 0.67928 - 0.33068i
- s5 := 0.67928 + 0.33068i
- s6 := 1.07752 - 0.18091i
- s7 := 1.07752 + 0.18091i

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds} (MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

$$H1 = 2573.806$$

$$H2 = 1155.975 - 1387.47i$$

$$H3 = 1155.975 + 1387.47i$$

$$H4 = -288.808 - 1220.848i$$

$$H5 = -288.808 + 1220.848i$$

$$H6 = -2179.556 - 1103.521i$$

$$H7 = -2179.556 + 1103.521i$$

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

$$A1 := \frac{1}{H1}$$

$$A2 := \frac{1}{H2}$$

$$A3 := \frac{1}{H3}$$

$$A4 := \frac{1}{H4}$$

$$A5 := \frac{1}{H5}$$

$$A6 := \frac{1}{H6}$$

$$A7 := \frac{1}{H7}$$

$$A1 = 3.8853 \times 10^{-4}$$

$$A2 = 3.544 \times 10^{-4} + 4.254i \times 10^{-4}$$

$$A3 = 3.544 \times 10^{-4} - 4.254i \times 10^{-4}$$

$$A4 = -1.835 \times 10^{-4} + 7.757i \times 10^{-4}$$

$$A5 = -1.835 \times 10^{-4} - 7.757i \times 10^{-4}$$

$$A6 = -3.652 \times 10^{-4} + 1.849i \times 10^{-4}$$

$$A7 = -3.652 \times 10^{-4} - 1.849i \times 10^{-4}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + \right. \\ \left. + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

$$\text{čia: } \Sigma J\omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$$

Slydimas s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.8 paveiksle.

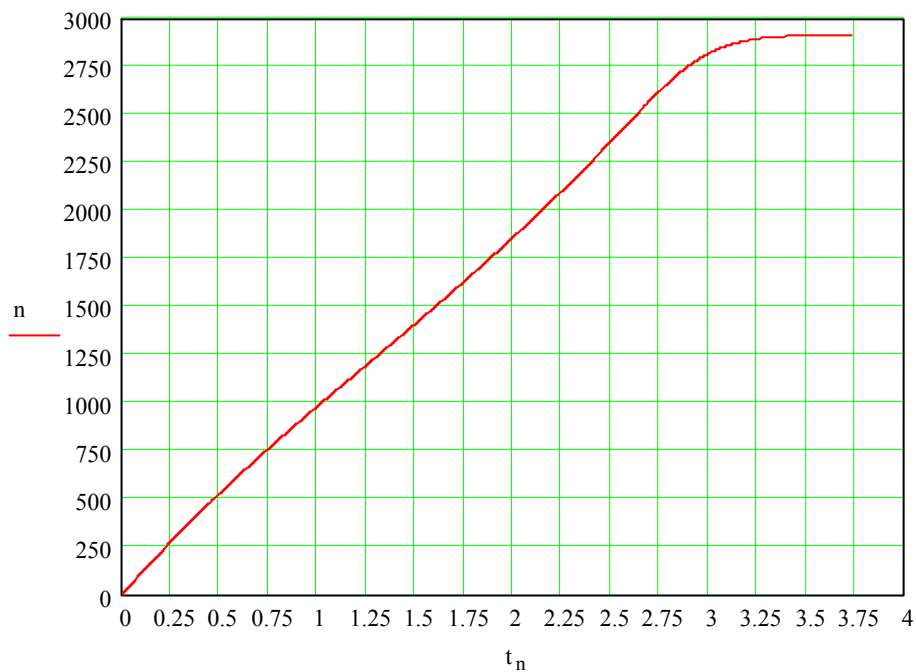


P1.8 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičiavus sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.9 paveiksle.



P1.9 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=1 \div 0,098$ yra:
 $t=2,84s$.

4. Kai variklis apkrautas pastovia 60 Nm apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s$$

Variklio apkrovos charakteristika:

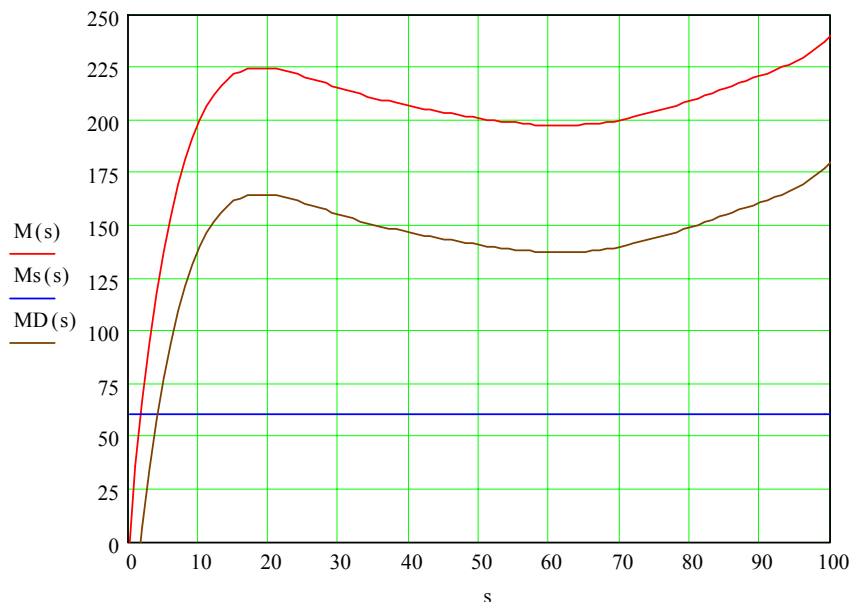
$$M_s(s) = 60.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - M_s(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 60.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.10 paveiksle.



P1.10 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($M_s(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 60.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

```
s1 := 0.01762
s2 := 0.24486- 0.32321i
s3 := 0.24486+ 0.32321i
s4 := 0.68412- 0.35137i
s5 := 0.68412+ 0.35137i
s6 := 1.0876- 0.18608i
s7 := 1.0876+ 0.18608i
```

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds}(MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

```
H1 = 3006.044
H2 = 1369.809- 1706.246i
H3 = 1369.809+ 1706.246i
H4 = -355.981- 1540.441i
H5 = -355.981+ 1540.441i
H6 = -2542.489- 1318.191i
H7 = -2542.489+ 1318.191i
```

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

$$A1 := \frac{1}{H1}$$

$$A2 := \frac{1}{H2}$$

$$A3 := \frac{1}{H3}$$

$$A4 := \frac{1}{H4}$$

$$A5 := \frac{1}{H5}$$

$$A6 := \frac{1}{H6}$$

$$A7 := \frac{1}{H7}$$

$$A1 = 3.3266 \times 10^{-4}$$

$$A2 = 2.861 \times 10^{-4} + 3.564i \times 10^{-4}$$

$$A3 = 2.861 \times 10^{-4} - 3.564i \times 10^{-4}$$

$$A4 = -1.424 \times 10^{-4} + 6.163i \times 10^{-4}$$

$$A5 = -1.424 \times 10^{-4} - 6.163i \times 10^{-4}$$

$$A6 = -3.1 \times 10^{-4} + 1.607i \times 10^{-4}$$

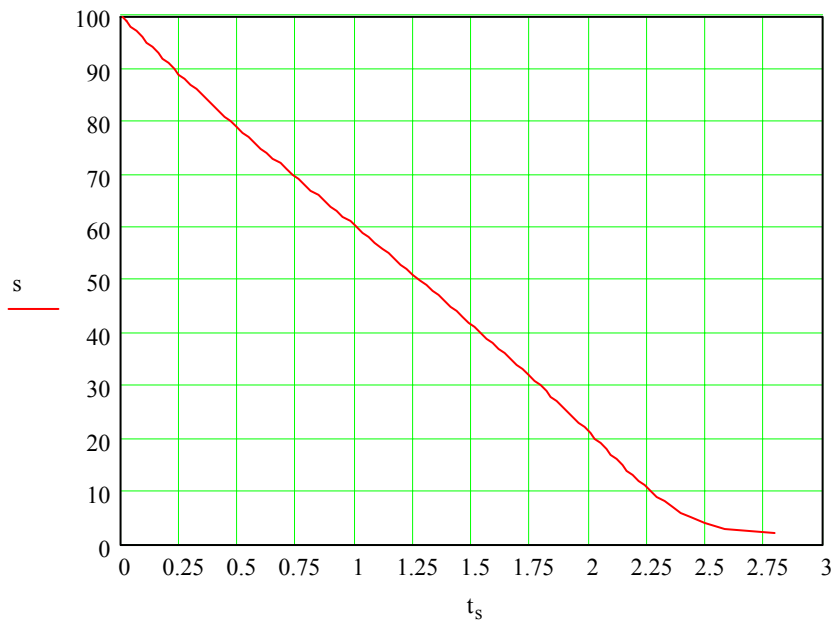
$$A7 = -3.1 \times 10^{-4} - 1.607i \times 10^{-4}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=1 \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J \omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

čia: $\Sigma J \omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$

Slydimio s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.11 paveiksle.

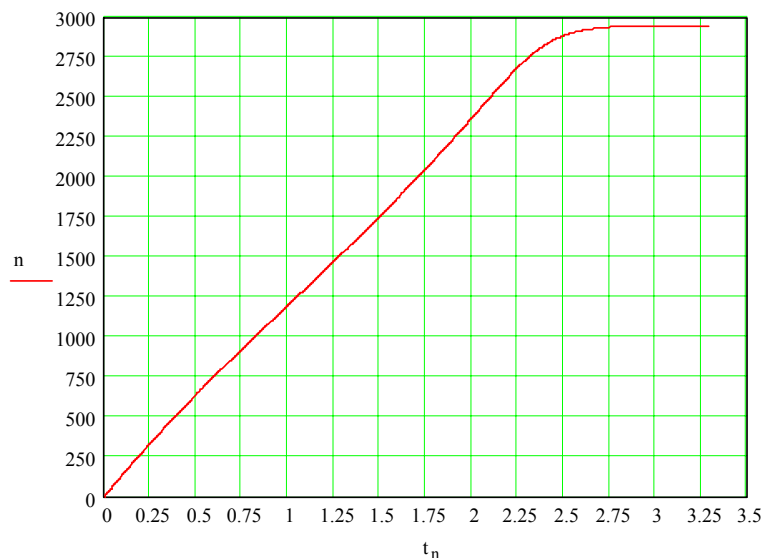


P1.11 pav. Slydimio nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s , %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičiuotus sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.12 paveiksle.



P1.12 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=1 \div 0,098$ yra:
 $t=2,768s$.

5. Kai variklis apkrautas pastovia 40 Nm apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

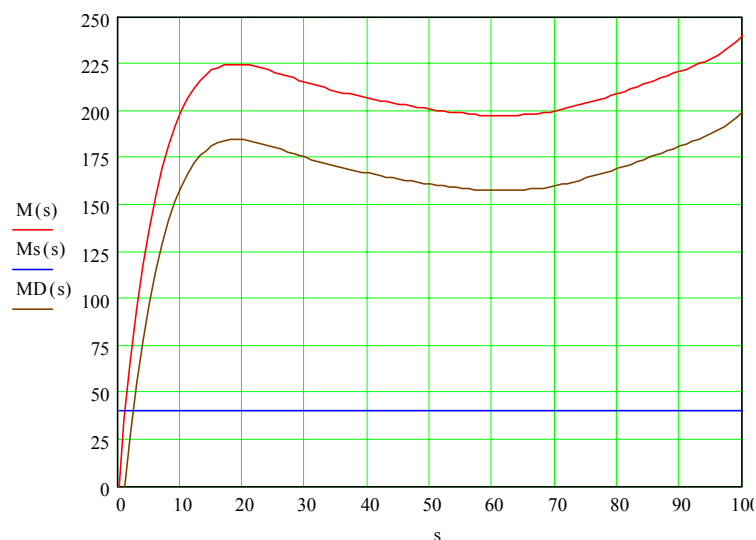
$$Ms(s) = 40.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 40.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.13 paveiksle.



P1.13 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 40.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

```

s1 := 0.01126
s2 := 0.23947- 0.32999i
s3 := 0.23947+ 0.32999i
s4 := 0.68677- 0.36293i
s5 := 0.68677+ 0.36293i
s6 := 1.09351- 0.18916i
s7 := 1.09351+ 0.18916i

```

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds} (MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

```

H1 = 3285.953
H2 = 1509.423- 1913.368i
H3 = 1509.423+ 1913.368i
H4 = -399.854- 1750.965i
H5 = -399.854+ 1750.965i
H6 = -2777.882- 1456.496i
H7 = -2777.882+ 1456.496i

```

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

```

A1 := 1/H1
A2 := 1/H2
A3 := 1/H3
A4 := 1/H4
A5 := 1/H5
A6 := 1/H6
A7 := 1/H7

```

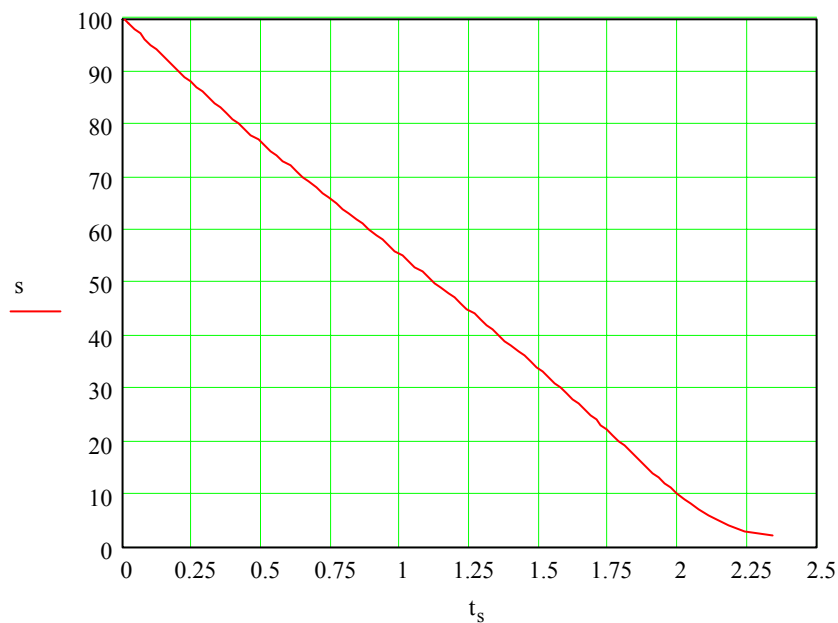
$$\begin{aligned}
A1 &= 3.0433 \times 10^{-4} \\
A2 &= 2.541 \times 10^{-4} + 3.222i \times 10^{-4} \\
A3 &= 2.541 \times 10^{-4} - 3.222i \times 10^{-4} \\
A4 &= -1.24 \times 10^{-4} + 5.428i \times 10^{-4} \\
A5 &= -1.24 \times 10^{-4} - 5.428i \times 10^{-4} \\
A6 &= -2.824 \times 10^{-4} + 1.48i \times 10^{-4} \\
A7 &= -2.824 \times 10^{-4} - 1.48i \times 10^{-4}
\end{aligned}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

čia: $\Sigma J\omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{kg \cdot m^2 \cdot rad}{s}$

Slydimo s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.14 paveiksle.

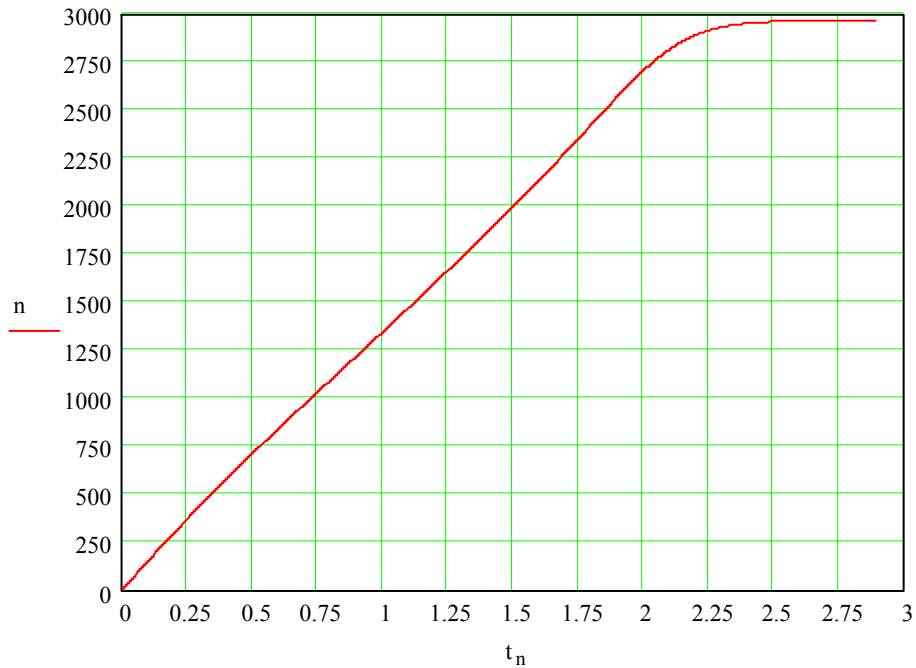


P1.14 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s , %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičiavus sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.15 paveiksle.



P1.15 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=I \div 0,098$ yra:

$$t=2s.$$

6. Kai variklis apkrautas pastovia 20 Nm apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

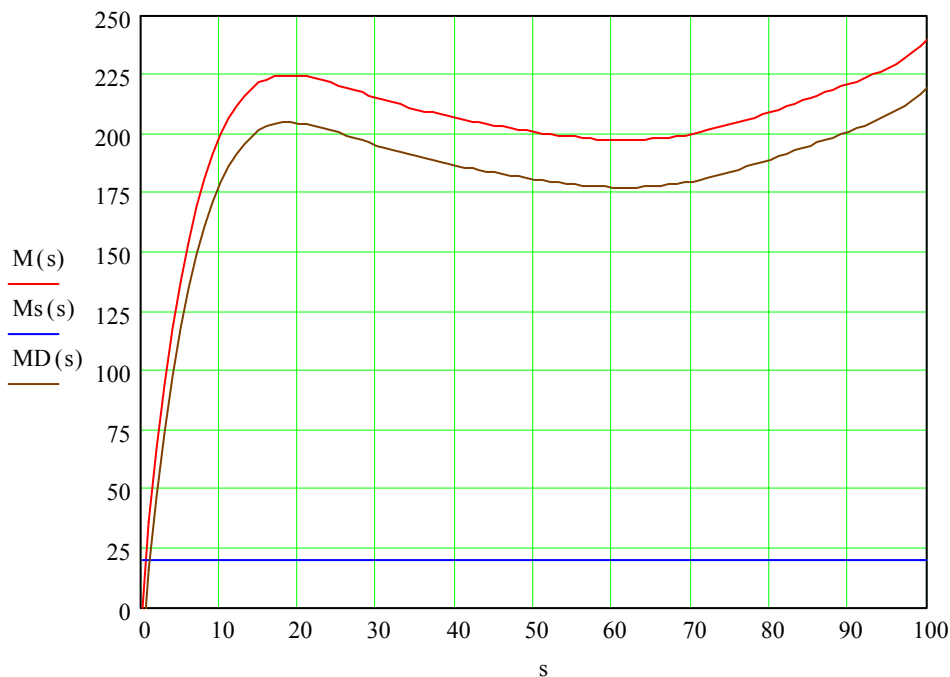
$$Ms(s) = 20.$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 20.$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.16 paveiksle.



P1.16 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($M_s(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 20.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

$$s1 := 5.414 \times 10^{-3}$$

$$s2 := 0.235 - 0.336i$$

$$s3 := 0.235 + 0.336i$$

$$s4 := 0.689 - 0.373i$$

$$s5 := 0.689 + 0.373i$$

$$s6 := 1.099 - 0.192i$$

$$s7 := 1.099 + 0.192i$$

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds} (MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

$$\begin{aligned}
H1 &= 3560.424 \\
H2 &= 1645.788 - 2104.357i \\
H3 &= 1645.788 + 2104.357i \\
H4 &= -443.271 - 1955.051i \\
H5 &= -443.271 + 1955.051i \\
H6 &= -3010.711 - 1594.907i \\
H7 &= -3010.711 + 1594.907i
\end{aligned}$$

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

$$A1 := \frac{1}{H1}$$

$$A2 := \frac{1}{H2}$$

$$A3 := \frac{1}{H3}$$

$$A4 := \frac{1}{H4}$$

$$A5 := \frac{1}{H5}$$

$$A6 := \frac{1}{H6}$$

$$A7 := \frac{1}{H7}$$

$$A1 = 2.8087 \times 10^{-4}$$

$$A2 = 2.306 \times 10^{-4} + 2.949i \times 10^{-4}$$

$$A3 = 2.306 \times 10^{-4} - 2.949i \times 10^{-4}$$

$$A4 = -1.103 \times 10^{-4} + 4.865i \times 10^{-4}$$

$$A5 = -1.103 \times 10^{-4} - 4.865i \times 10^{-4}$$

$$A6 = -2.594 \times 10^{-4} + 1.374i \times 10^{-4}$$

$$A7 = -2.594 \times 10^{-4} - 1.374i \times 10^{-4}$$

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I \div 0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$\begin{aligned}
t(s) &= -\Sigma J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + \right. \\
&\left. + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];
\end{aligned}$$

$$\text{čia: } \Sigma J\omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}}{\text{s}}$$

Slydimio s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.17 paveiksle.

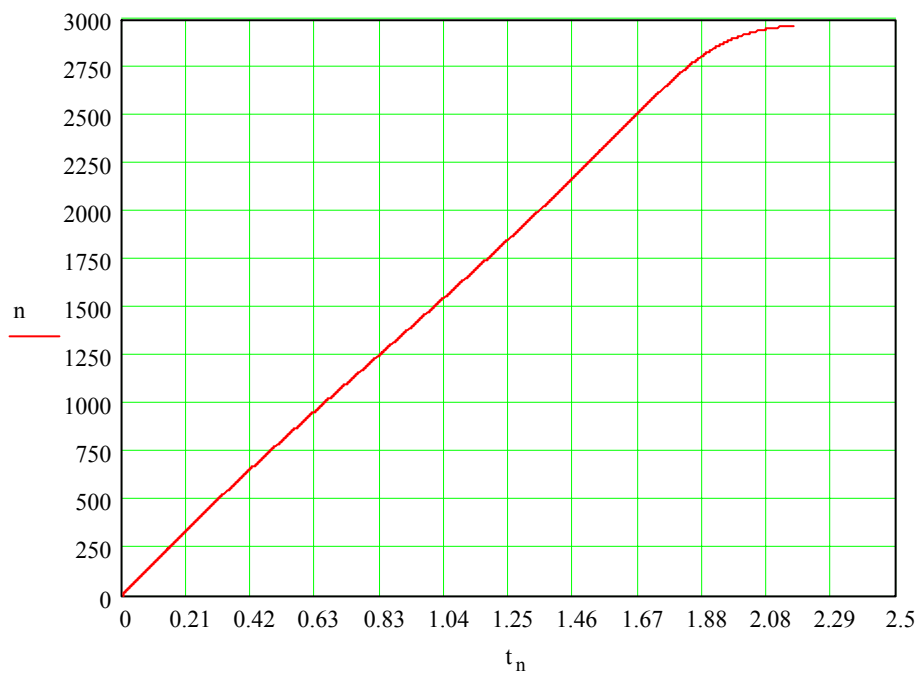


P1.17 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičiavus sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybę - $s=f(t)$ pavaizduota P1.18 paveiksle.



P1.18 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=1 \div 0,098$ yra:
 $t=1,792s$.

7. Kai variklis apkrautas netiesiškai kintama apkrova

Variklio mechaninė charakteristika:

$$M(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s.$$

Variklio apkrovos charakteristika:

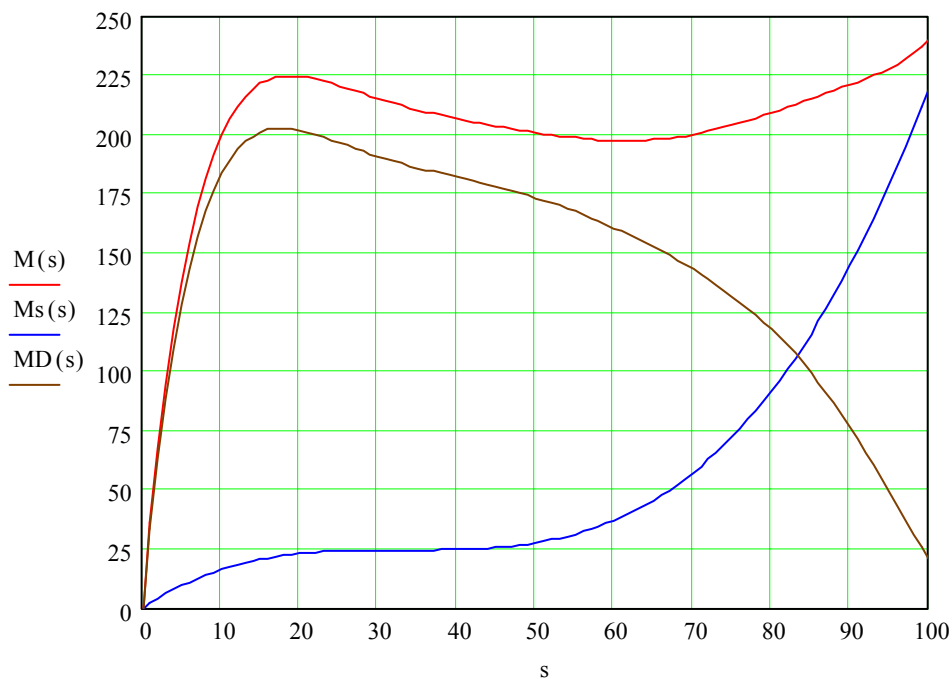
$$Ms(s) = 220(3s^3 - 3s^2 + s).$$

Pavaros judesio lygtis:

$$MD(s) = M(s) - Ms(s).$$

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87900 \cdot s^3 - 25600 \cdot s^2 + 3830 \cdot s - 220(3s^3 - 3s^2 + s).$$

Variklio mechaninė, apkrovos charakteristika ir pavaros judesio lygtis pavaizduoti P1.19 paveiksle.



P1.19 pav. Variklio mechaninė ($M(s)$), apkrovos charakteristika ($Ms(s)$) ir pavaros judesio lygtis ($MD(s)$); (s , %)

Skaičiuojamos (4.9) lygties vardiklio polinomo $H(s)$ šaknys. Vardiklio polinomas yra lygus pavaros judesio lygčiai – $H(s)=MD(s)$:

$$MD(s) = 28760 \cdot s^7 - 116500 \cdot s^6 + 194300 \cdot s^5 - 172450 \cdot s^4 + 87240 \cdot s^3 - 24940 \cdot s^2 + 3610 \cdot s.$$

Pasinaudojant MATLAB sistema skaičiuojamos vardiklio polinomo $H(s)=0$ šaknys:

```
s1 := 0
s2 := 0.235 - 0.325i
s3 := 0.235 + 0.325i
s4 := 0.723 - 0.404i
s5 := 0.723 + 0.404i
s6 := 1.049
s7 := 1.085
```

Vardiklio polinomo išvestinė:

$$H'(s) = \frac{d}{ds}(MD(s));$$

$$H'(s) = 201320 \cdot s^6 - 699000 \cdot s^5 + 971500 \cdot s^4 - 689800 \cdot s^3 + 263700 \cdot s^2 - 51200 \cdot s + 3830.$$

(4.9) lygties vardiklio polinomo išvestinės vertės, kai $s=s_i$:

```
H1 = 3610
H2 = 1514.008 - 2115.604i
H3 = 1514.008 + 2115.604i
H4 = 184.796 - 2336.995i
H5 = 184.796 + 2336.995i
H6 = -225.968
H7 = 272.229
```

(4.9) lygties santykio $\frac{G(s_i)}{H'(s_i)}$ skaidymo koeficientai, kai $s=s_i$:

$$A_i = \frac{G(s_i)}{H'(s_i)} = \frac{1}{H'(s_i)};$$

```
A1 := 1/H1
A2 := 1/H2
A3 := 1/H3
A4 := 1/H4
A5 := 1/H5
A6 := 1/H6
A7 := 1/H7
```

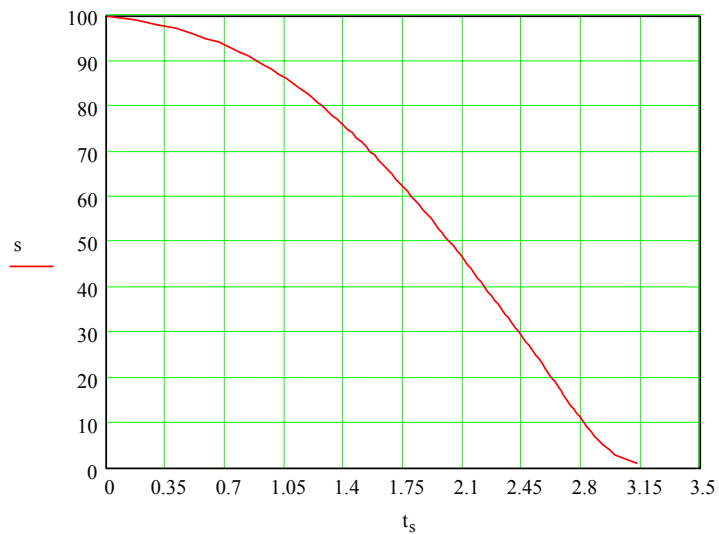
```
A1 = 2.7701 × 10-4
A2 = 2.237 × 10-4 + 3.126i × 10-4
A3 = 2.237 × 10-4 - 3.126i × 10-4
A4 = 3.363 × 10-5 + 4.252i × 10-4
A5 = 3.363 × 10-5 - 4.252i × 10-4
A6 = -4.425 × 10-3
A7 = 3.673 × 10-3
```

Variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė intervale $s=I=0,05$ skaičiuojama pagal formulę:

$$t(s) = -\Sigma J\omega_1 \left[A_1 \ln \frac{s-s_1}{1-s_1} + A_2 \ln \frac{s-s_2}{1-s_2} + A_3 \ln \frac{s-s_3}{1-s_3} + A_4 \ln \frac{s-s_4}{1-s_4} + A_5 \ln \frac{s-s_5}{1-s_5} + A_6 \ln \frac{s-s_6}{1-s_6} + A_7 \ln \frac{s-s_7}{1-s_7} \right];$$

čia: $\Sigma J\omega_1 = 1,2 \cdot 314,159 = 376,991 \frac{kg \cdot m^2 \cdot rad}{s}$

Slydimo s nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.20 paveiksle.

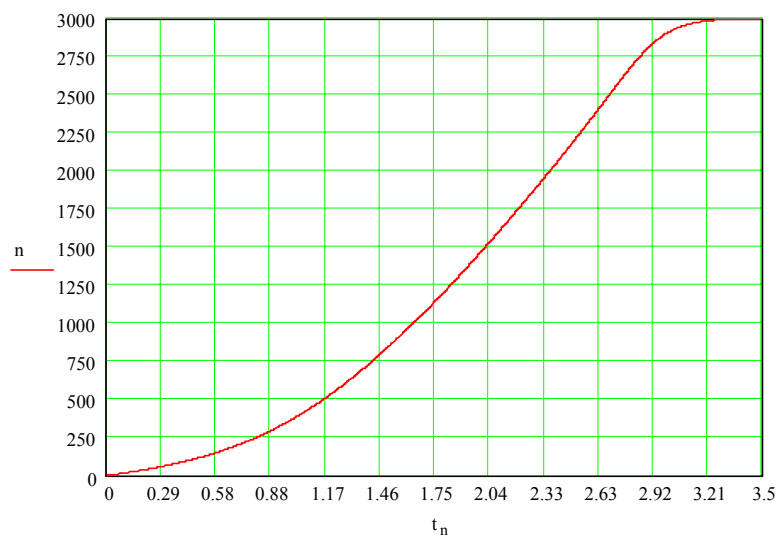


P1.20 pav. Slydimo nuo laiko priklausomybė $s=f(t)$, (s, %)

Rotoriaus slydimas s pakeičiamas sūkių dažniu n (4.18):

$$n = n_n - s \cdot n_n.$$

Perskaičius sūkių dažnio n nuo laiko t priklausomybė - $s=f(t)$ pavaizduota P1.21 paveiksle.



P1.21 pav. Sūkių dažnio nuo laiko priklausomybė $n=f(t)$

Kaip žinoma paleidimo trukmė baigiasi tada, kai sūkių dažnis pasiekia 95% nusistovėjusios reikšmės ($0,95n$), nes tik tada paleidimo trukmė įgauna baigtinę reikšmę. Taigi nusistovėjusi sūkių dažnio reikšmė:

$$n' = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 2850 = 2707 \text{ min}^{-1}.$$

$$\text{Tada: } s = \frac{n_n - n'}{n_n} = \frac{3000 - 2707}{3000} = 0,098$$

Ir variklio pereinamojo proceso paleidimo metu trukmė pagal (4.16) intervale $s=1 \div 0,098$ yra:

$$t=2,811s.$$