

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

AUDRIUS SENULIS

DVIMASIO TIESIAEIGIO ŠVYTUOJAMOJO
JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO
TYRIMAS SPEKTRINIŲ ASPEKTU

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2013, Kaunas

Disertacija rengta 2007-2012 metais Kauno technologijos universitete, Telekomunikacijų ir elektronikos fakultete, Elektronikos inžinerijos katedroje.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinė konsultantė:

Prof. dr. Eleonora GUSEINOVIENĖ (Klaipėdos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Mokslinė vadovė (2007-2011 m.):

Prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė (Klaipėdos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Mokslinis konsultantas (2007-2011 m.):

Prof. habil. dr. Danielius Eidukas (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Interneto svetainės, kurioje skalbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.lt/turinys/disertacijos-gynimas>

Recenzavo:

Prof. habil. dr. Steponas Gečys (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Prof. dr. Algimantas Valinevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

© A. Senulis

© Technologija, 2013

ISBN 978-609-02-0843-4

TURINYS

SANTRUMPŲ PAAIŠKINIMAI.....	4
ĮVADAS	11
1. SPECIALIŲJŲ MECHATRONINIŲ ĮTAISŲ TYRIMŲ APŽVALGA	17
1.1. Specialiųjų ir švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų klasifikacija, charakteristikos, tyrimai.....	17
1.2. Švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų valdymo sistemų, švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo ir įtaisų diagnostikos metodų tyrimai	22
1.3. Pirmojo skyriaus išvados.....	32
2. DVIMASIO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO SISTEMOS ANALITINIS TYRIMAS SPEKTRINIŲ ASPEKTU	34
2.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendros sistemos analizė....	35
2.1.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso mechaninės posistemės analitinis modelis ir elektromagnetinės jėgos analizė	37
2.1.2. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso elektromagnetinės ir galios keitiklio posistemės analitinis modelis	64
2.1.3. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso valdymo posistemė ir srovės informacijos panaudojimas įtaiso valdymui	81
2.2. Bendrosios srovės spektro informacijos panaudojimas švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso diagnostikai	89
2.3. Antrojo skyriaus išvados	91
3. DVIMASIO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO MATEMATINIS MODELIAVIMAS.....	94
3.1. Dvimasio švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso apibendrintas matematinis modelis.....	94
3.2. Matematinio modeliavimo rezultatai.....	97
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	107
4. VALDOMO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO EKSPERIMENTAS	109
4.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso fizinis modelis, eksperimento struktūra.....	109
4.2. Tyrimo metodai, priemonės ir atlikimo eiga	110
4.3. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė	112
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	130
5. IŠVADOS.....	132
6. LITERATŪRA	134
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	144
PRIEDAI	147

SANTRUMPŲ PAAIŠKINIMAI

ĮVADAS

JD	– judžioji dalis.
KTU	– Kauno technologijos universitetas.
KU	– Klaipėdos universitetas.
ŠJMĮ	– švytuojamojo judesio mechatroninis įtaisas.
TAV	– tiesiaieigis asinchroninis variklis.
VG TU	– Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

1 skyrius

AK	– asmeninis kompiuteris.
ASCP	– valdymo metodas „Average value of Stroke-Current Product“.
ASK	– analoginis skaitmeninis keitiklis.
GFT	– greitoji Furjė transformacija.
ISMC	– valdymo metodas „Integral Sliding Mode Control“.
ITM	– impulsų trukmės moduliacija.
KS	– kintamoji srovė.
MG	– magnetiniai guoliai.
MSCA	– motor current signature analysis.
NS	– nuolatinė srovė.
PI	– proporcingas integruojantis.
SAK	– skaitmeninis analoginis keitiklis.
SMC	– valdymo metodas „Sliding Mode Control“.
STFT	– Trumpojo laiko Furjė transformacija.
THD	– Total harmonic distortion.
TŠV	– tiesiaieigis švytuojamasis variklis.
VSPA	– variklio srovės požymių analizė.
A_3 ir A_4	– švytavimų poslinkio amplitudės apskaičiavimo koeficientai.
A_e	– švytuojamojo judesio įtaiso sistemos parametrų matrica.
$a(t)$	– ŠJMĮ pagreitis.
B, B_e	– švytuojamojo judesio įtaiso sistemos įėjimų matricos.
C_{mech}	– ekvivalentinis mechaninės sistemos standis.
e	– įtaiso valdymo sistemos klaidos vektorius.
$G_0(s)$	– valdomo objekto perdavimo funkcija.
I_m	– švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso srovės amplitudė.
$i(t), i(p), i(j\omega)$	– įtaiso srovė atitinkamai akimirkinge, operatorine ir kompleksine forma.
Y_m	– nustatytoji švytavimų poslinkio amplitudė.
Y_{rm}	– valdoma švytavimų poslinkio amplitudė.
y_r	– atskaitos poslinkis, skirtas nustatyti laiko intervalui τ arba τ_r .
j	– menamasis vienetas.
K_D	– teigiamas diferencialinis regulatoriaus stiprinimo koeficientas (vektorius).
K_F	– elektromagnetinės jėgos konstanta.

\mathbf{K}_p	– teigiamas integralinis regulatoriaus stiprinimo koeficientas (vektorius).
L_{ekv}	– įtaiso apvijos ekvivalentinis induktyvumas.
m	– įtaiso judžiosios dalies masė.
\mathbf{M}	– švytuojamojo judesio įtaiso sistemos masių matrica.
\mathbf{N}	– sistemos netiesinių srovių vektorius.
p	– Laplaso operatorius.
R_{ekv}	– įtaiso apvijos ekvivalentinė aktyvioji varža.
R_{mech}	– mechaninės sistemos slopinimo koeficientas.
\mathbf{r}	– pageidautinas arba atraminis valdomo objekto sistemos vektorius.
$\mathbf{r}_m(t)$	– sistemos užduoties signalo vektorius.
r	– elektrinės grandinės aktyvioji laidų varža.
\mathbf{S}	– „nuožulnus“ sistemos hiperpaviršius („Sliding hyperplane“).
s	– Laplaso operatorius.
t	– laikas.
U_m	– įtampos amplitudė.
$u(t)$	– švytuojamojo judesio įtaiso apvijos akimirkinė įtampa.
$\mathbf{u}, \mathbf{u}(t)$	– valdymo poveikio vektorius.
\mathbf{u}_{ekv}	– ekvivalentinis valdymo poveikio vektorius.
\mathbf{u}_{trk}	– valdomos sistemos trūkiosios dalies valdymo poveikio vektorius.
u_x	– padėties jutiklio išėjimo įtampa.
$x(t), x(p), x(j\omega)$	– įtaiso JD švytavimų atitinkamai poslinkis akimirkine, operatorine ir kompleksine forma.
X_m	– judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudė.
$\mathbf{x}_e(t)$	– sistemos kintamųjų vektorius.
$W(s)$	– kompensuojančios grandies perdavimo funkcija.
δ	– užduoties ir grįžtamojo ryšio signalų skirtumas.
ε	– laiko trukmių skirtumas (absoliuti paklaida).
η	– teigiama matrica konstanta.
θ_1, θ_d	– fazės kampas tarp srovės ir švytavimų poslinkio.
θ_2	– fazės kampas tarp įtampos ir švytavimų poslinkio.
Λ	– netiesinės funkcijos ribų diagonalioji matrica.
$\sigma(t)$	– perjungimo funkcija.
τ	– laiko trukmė, atitinkanti pageidautiną švytavimų poslinkio amplitudę.
τ_r	– laiko trukmė, atitinkanti valdomą švytavimų poslinkio amplitudę.
ω	– kampinis dažnis.

2 skyrius

\mathbb{K}	– įtampos keitiklis.
$\check{S}JEV$	– švytuojamojo judesio elektros variklis.
\mathbf{A}	– bendra $\check{S}JM\check{I}$ parametrų matrica.
\mathbf{A}_{mech}	– bendra matematinio modelio mechaninių parametrų matrica.

$A_1(p), A_2(p), A(p)$	– kintamųjų $a_1(t), a_2(t), a(t)$ atvaizdai operatorinėje formoje.
$ \underline{A}_{m,n}(j\omega_n) $	– reliatyviųjų švytavių n -osios pagreičio harmonikos amplitudė kompleksinėje formoje.
$a, a(t)$	– įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavių pagreitis.
$a_1, a_1(t)$	– įtaiso „statoriaus“ absoliučiuųjų švytavių pagreitis.
$a_2, a_2(t)$	– įtaiso judžiosios dalies absoliučiuųjų švytavių pagreitis.
$a_m, a_{ef}, a_{m,n}$	– įtaiso JD švytavių pagreičio amplitudė, efektinė vertė, n -osios harmonikos amplitudė.
$a(\alpha_{Tir}), b(\alpha_{Tir}), c(\alpha_{Tir}), d(\alpha_{Tir})$	– koeficientai priklausantys nuo tiristorių atidarymo kampo α_{Tir} .
b	– bendro matematinio modelio šaltinių vektorius-stulpelis.
b_{mech}	– matematinio modelio mechaninės posistemės energijos šaltinių (jėgų) vektorius-stulpelis.
b_0, b_1, b_2, b_3, b_4	– mechaninės posistemės perdavimo funkcijos vardiklio daugianario koeficientai.
C_{mech1}	– įtaiso pakabos (slopintuvų arba spyruoklių) standis.
C_{mech2}	– kompresoriaus suspausto oro ekvivalentinis „oro spyruoklės“ standis.
$C_{mech2,opt}$	– optimali ekvivalentinio „oro spyruoklės“ standžio vertė.
c_0, c_1, c_2	– mechaninės posistemės perdavimo funkcijos skaitiklio daugianario koeficientai.
$F_m, F_{ef}, F_{m,n}$	– jėgos amplitudė, efektinė vertė, n -osios harmonikos amplitudė.
$\underline{F}_{elm,n}$	– elektromagnetinės jėgos n -oji harmonika kompleksinėje formoje.
$ \underline{F}_{elm,m,n}(j\omega_n) , \underline{F}_{elm,m,n}$	– elektromagnetinės jėgos n -osios harmonikos amplitudė.
$F_{elm,0}$	– elektromagnetinės jėgos nuolatinė dedamoji.
$F_{elm}(p)$	– $f_{elm}(t)$ atvaizdas operatorinėje formoje.
$f_{elm}, f_{elm}(t), f_{elm1}, f_{elm2}$	– įtaiso judžiąją dalį veikiančios elektromagnetinės jėgos.
f_{Komp}	– ekvivalentinė kompresoriaus slėgio jėga.
f_{p1}, f_{p2}	– įtaiso judžiąją dalį veikiančios slėgio jėgos.
$f_{tr1}, f_{tr1.1}, f_{tr1.2}$	– trinties jėgos, veikiančios tarp įtaiso „statoriaus“ ir aplinkos.
f_{tr1s}	– trinties jėga, veikianti tarp įtaiso „statoriaus“ ir slopintuvų – sausoji trintis.
$f_{tr2}, f_{tr2.1}$	– trinties jėgos, veikiančios tarp įtaiso „statoriaus“ ir judžiosios dalies.
$f_{pot1.1}, f_{pot1.2}$	– potencinės jėgos, veikiančios įtaiso „statorių“.
$f_{pot2.1}$	– ekvivalentinė potencinė jėga, veikianti įtaiso judžiąją dalį.
f_{in1}, f_{in2}	– įtaiso „statorių“ ir judžiąją dalį veikiančios inertinės jėgos.
f, f_T	– dažnis, tinklo dažnis – 50 Hz.
H_m	– didžiausioji leistina judžiosios dalies švytavių poslinkio amplitudė.
$H_1(p), H_2(p), H(p)$	– kintamųjų $h_1(t), h_2(t), h(t)$ atvaizdai operatorinėje formoje.
$ \underline{H}_{m,n}(j\omega_n) $	– reliatyviųjų švytavių poslinkio n -osios harmonikos amplitudė.
H_0	– įtaiso JD švytavių centro poslinkis.
$h, h(t)$	– įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavių poslinkis su švytavių poslinkio apribojimu.

$h'(t)$	– įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkis be švytavimų poslinkio apribojimo.
$h_1, h_1(t)$	– įtaiso „statoriaus“ absoliučiuųjų švytavimų poslinkis.
$h_2, h_2(t)$	– įtaiso judžiosios dalies absoliučiuųjų švytavimų poslinkis.
$h_m, h_{ef}, h_{m,n}$	– įtaiso JD švytavimų poslinkio amplitudė, efektinė vertė, n -osios harmonikos amplitudė.
h_{santyk}	– įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų santykinis poslinkis.
$h_{m,n,max}(\omega_n)$	– įtaiso JD švytavimų poslinkio didžiausia santykinė amplitudė.
h_{Δ}	– švytavimų amplitudės dalis, arti didžiausios švytavimų vertės, kai induktyvumo kitimo dėsnis hiperbolinis.
I_0	– bendrosios srovės nuolatinė dedamoji.
$I_{m,n}$	– srovės n -osios harmonikos amplitudė.
$i(t), i$	– bendroji grandinės srovė.
$i_{11}(t), i_{21}(t), i_{11}, i_{21}$	– pirmosios ir antrosios ŠJMĮ šakų apvijų bendrosios grandinės srovės.
$i_{12}(t), i_{22}(t), i_{12}, i_{22}$	– pirmosios ir antrosios ŠJMĮ šakų apvijų srovės ekvivalentinėse varžose r_{12} ir r_{22} .
$i_{L1}(t), i_{L2}(t), i_{L1}, i_{L2}$	– pirmosios ir antrosios ŠJMĮ šakų apvijų induktyvumų srovės.
$K_F(i, v)$	– jėgos koeficientas, apskaičiuojamas iš elektros mašinos duomenų.
K_{pat}	– didžiausios vertės pataisos koeficientas, ištiesinant induktyvumus.
K_{sin}	– induktyvumo koeficientas, kai induktyvumo kitimo dėsnis sinusinis.
K_{ties}	– induktyvumo koeficientas, kai induktyvumo kitimo dėsnis tiesinis.
k, l	– begalinės eilutės narių baigtinis skaičius.
k_{r1}, k_{r2}	– varžų faktoriai.
$k(H_0), k(H_{m,1})$	– santykiniai, švytavimų poslinkio nuolatinės dedamosios ir pirmosios švytavimų poslinkio harmonikos, koeficientai.
$k_1(h, v), k_2(h, v), k(h, v)$	– ŠJMĮ pirmosios, antrosios apvijų ir abipusio induktyvumo koeficientai, priklausantys nuo poslinkio ir greičio.
$k_1(\omega_n), k_2(\omega_n), k_3(\omega_n), k_4(\omega_n), k_5(\omega_n), k_6(\omega_n), k_7(\omega_n), k_8(\omega_n)$	– koeficientai, kurie priklauso nuo pastoviųjų ŠJMĮ mechaninės posistemės parametru ir dažnio.
L	– induktyvumas.
$L_i(h(t))$	– ŠJMĮ i -osios ($i = 1, 2, 3, 4...$) apvijos netiesinis induktyvumas.
$L_1(h), L_1(t), L_2(h), L_2(t)$	– ŠJMĮ pirmosios ir antrosios apvijų netiesiniai induktyvumai.
$L_{1,2}(t,k)$	– ištiesinta netiesinio induktyvumo funkcija.
L_{max}, L_{min}	– didžiausios ir mažiausios apvijų induktyvumo vertės, esant didžiausiai mechatroninio įtaiso švytavimų poslinkio amplitudei.
L_0	– apvijų induktyvumas, kai ŠJMĮ judžioji dalis yra vidurinėje padėtyje ($h(t) = 0$).

$L_{m,1,2,n}$	– L_1 ir L_2 induktyvumų n -osios harmonikos amplitudės.
\mathbf{M}	– abipusių induktyvumų matrica.
$M_{ij}(h(t))$	– ŠJMĮ abipusis netiesinis induktyvumas tarp i -osios ($i = 1,2,3,4\dots$) ir j -osios ($j = 1,2,3,4\dots; j \neq i$) įtaiso apvijų.
$M_{12}(h(t)), M_{12}(t), M_{21}(h(t)), M_{21}(t), M(h), M(t)$	– ŠJMĮ abipusis netiesinis induktyvumas tarp pirmosios ir antrosios apvijų.
m_1	– įtaiso „statoriaus“ masė.
m_2	– įtaiso judžiosios dalies masė.
n	– harmonikos numeris, $n=0, 1, 2, \dots$
$P_m, P_{ef}, P_{m,n}$	– galios amplitudė, efektinė vertė, n -osios harmonikos amplitudė.
p_1	– įsiurbiamo oro (atmosferinis) slėgis.
p_2	– suspausto oro slėgis.
p_{21}, p_{22}	– pirmosios ir antrosios kompresoriaus kamerų slėgiai.
$R_{K\text{omp}}$	– ekvivalentinė aktyvioji mechaninė varža (slopinimo koeficientas), įvertinanti atliktą darbą.
R_{mech1}	– mechaninė varža tarp „statoriaus“ ir aplinkos (slopinimo koeficientas).
R'_{mech2}	– mechaninė varža tarp „statoriaus“ ir judžiosios dalies (slopinimo koeficientas).
R_{mech2}	– ekvivalentinė mechaninė varža, įvertinanti kompresoriaus naudingą darbą ir trintį tarp „statoriaus“ ir judžiosios dalies (slopinimo koeficientas).
$R_{\text{mech2,opt}}$	– optimali apkrovos mechaninės aktyviosios varžos vertė.
r	– aktyvioji grandinės varža.
r_{i1}	– ŠJMĮ i -osios ($i = 1,2,3,4\dots$) apvijos laidininkų aktyvioji varža.
r_{11}, r_{21}	– ŠJMĮ pirmosios ir antrosios apvijų laidininkų aktyviosios varžos.
r_{i2}	– ŠJMĮ i -ojo ($i = 1,2,3,4\dots$) magnetolaidžio ekvivalentinė varža, įvertinanti nuostolius magnetolaidyje.
r_{12}, r_{22}	– ŠJMĮ pirmojo ir antrojo magnetolaidžių ekvivalentinės varžos, įvertinančios nuostolius magnetolaidyje.
$r_{\text{gr.r.}}$	– srovės matavimo šunto varža.
S_{Vp}	– indikatorinės diagramos plotas.
sc_{Vp}	– indikatorinės diagramos mastelis.
sc_p	– indikatorinės diagramos slėgio mastelis.
sc_v	– indikatorinės diagramos tūrio mastelis.
T	– temperatūra.
$T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, T_{m4}, T_{m5}, T_{m6}$	– mechaninės posistemės laiko pastoviosios.
$U_{\text{užd}}$	– užduoties įtampa.
U_v	– valdymo įtampa.
$u_{\text{gr.r.}}$	– grįžtamojo ryšio signalo įtampa.
$u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1}), u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2})$	– įtampos kritimai ant pirmosios ir antrosios įtaiso šakų tiristorių.
$\underline{V}_n, V_{m,n}$	– reliatyviųjų švytavimų greičio n -oji harmonika, išreikšta kompleksiniais skaičiais, ir jos modulis.
$V_1(p), V_2(p), V(p)$	– kintamųjų $v_1(t), v_2(t), v(t)$ atvaizdai operatorinėje formoje.

V_{tir}	– kompresoriaus kameros tūris.
$v, v(t)$	– įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų greitis.
$v_1, v_1(t)$	– įtaiso „statoriaus“ absoliučiuųjų švytavimų greitis.
$v_2, v_2(t)$	– įtaiso judžiosios dalies absoliučiuųjų švytavimų greitis.
$v_m, v_{\text{ef}}, v_{m,n}$	– įtaiso JD švytavimų greičio amplitudė, efektinė vertė, n -osios harmonikos amplitudė.
$Z_{\text{mech},n}$	– mechaninė kompleksinė varža n -ajai elektromagnetinės jėgos harmonikai, išreikšta kompleksiniais dydžiais.
z	– begalinės eilutės kintamasis.
$W_{A1}(p), W_{A2}(p), W_A(p)$	– švytavimų pagreičių perdavimo funkcijos, elektromagnetinės jėgos atžvilgiu.
$W_{H1}(p), W_{H2}(p), W_H(p)$	– švytavimų poslinkių perdavimo funkcijos, elektromagnetinės jėgos atžvilgiu.
$W_{H1,H2}(p)$	– „statoriaus“ švytavimų poslinkio amplitudės priklausomybė nuo judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės.
$W_{V1}(p), W_{V2}(p), W_V(p)$	– švytavimų greičių perdavimo funkcijos elektromagnetinės jėgos atžvilgiu.
X_{Komp}	– kompresoriaus ekvivalentinė reaktyvioji mechaninė varža.
\mathbf{x}	– kintamųjų vektorių-stulpelis.
\mathbf{x}_{mech}	– mechaninių kintamųjų vektorių-stulpelis.
Q	– kompresoriaus našumas.
α	– ekvivalentinės elipsės posvyrio kampas.
$\alpha_{\text{Tir1}}, \alpha_{\text{Tir2}}$	– pirmojo ir antrojo tiristorių atidarymo kampai.
$\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$	– Hurvico kriterijaus determinantai.
ΔL_0	– induktyvumo pokytis, dėl švytavimų poslinkio centro poslinkio.
η	– naudingumo faktorius.
$\lambda(\alpha_{\text{Tir}}, \varphi)$	– tiristorių laidumo kampas, kuris priklauso nuo tiristorių atidarymo kampo ir apkrovos fazės.
Φ	– magnetinis srautas oro tarpe.
$\varphi_A(\omega_n)$	– reliatyviųjų švytavimų n -osios pagreičio harmonikos fazė, elektromagnetinės jėgos fazės atžvilgiu.
$\varphi_{\text{Felm},n}(\omega_n)$	– elektromagnetinės jėgos n -osios harmonikos fazė, maitinančiosios įtampos fazės atžvilgiu.
$\varphi_H(\omega_n)$	– reliatyviųjų švytavimų n -osios poslinkio harmonikos fazė, elektromagnetinės jėgos fazės atžvilgiu.
$\varphi_I(\omega_n)$	– bendrosios srovės pradinė fazė.
$\varphi_{L1,2,n}$	– L_1 ir L_2 induktyvumų n -osios harmonikos fazė.
$\varphi_V(\omega_n)$	– reliatyviųjų švytavimų greičio n -osios harmonikos fazė.
$\varphi_{Z\text{mech}}(\omega_n)$	– mechaninės posistemės apkrovos varžos fazė, n -ajai reliatyviųjų švytavimų harmonikai.
ω_1	– pirmosios harmonikos kampinis dažnis.
ω_n	– n -osios harmonikos kampinis dažnis $\omega_n = n \cdot \omega_1$.
$\omega_{\text{rez1,2}}$	– ŠJMĮ „statoriaus“ (1) ir JD (2) mechaninio rezonanso dažniai.
$\omega_{\text{r.slp.1,2,3}}$	– ŠJMĮ mechaninio rezonanso dažniai – slopinimo dažniai.
$\omega_{Z\text{mech2,slp.1,2}}$	– ŠJMĮ rezonanso dažniai – slopinimo dažniai, nustatyti iš Z_{mech2} .

$\omega_{Z_{\text{mech.slp,1,2}}}$ – ŠJMĮ rezonanso dažniai – slopinimo dažniai, nustatyti iš Z_{mech} .

4 skyrius

$C_{\text{mech1.vid}}$	– vidutinis eksperimentinis „statorių“ laikančių spyruoklių standis.
D_s	– stūmoklio skersmuo.
E_M	– vidinė įtampa, indukuota kitos apvijos magnetinio lauko.
F_s	– sunkio jėga.
F_{sp}	– „statoriaus“ spyruoklių įtempimo jėga.
g	– laisvojo kritimo pagreitis, $9,81 \text{ m/s}^2$.
I_n	– nominalioji įtaiso srovė.
k_{komp}	– kompresoriaus konstanta.
l	– judžiosios dalies ilgis.
n	– politropės laipsnis.
U_n	– nominalioji efektinė įtampa.
Q_n	– kompresoriaus nominalusis našumas.
Δx_{sp}	– spyruoklės deformacija.
λ	– tūrinis pataisos koeficientas, kuris nusako išilimo, droseliavimo, nesandarumo, drėgmės ir nepilnos eigos įtaką kompresoriaus našumui Q . Šis koeficientas būna nuo 0,8 iki 0,95 ir siekiama, kad jis būtų kuo arčiau vieneto.
τ	– kompresoriaus suspaudimo laipsnis.

IVADAS

Elektros mašinų raidoje buvo kuriamos įvairių konstrukcijų mašinos, tačiau pramonėje ir buityje labiausiai paplito sukiojo judesio – jų konstrukcijos išstobulintos, universalus jų panaudojimas. Sukiosios elektros mašinos naudojamos įvairiems mechanizmams varyti (tas pats variklis gali dirbti tiek kompresoriaus, tiek lifto elektros pavaroje ir t.t.). Šiuo metu pasaulyje vyrauja dvi pagrindinės elektros mašinų kūrimo kryptys:

a) tradicinių sukiojo judesio elektros mašinų kūrimas, projektavimas ir gamyba. Šių elektros mašinų populiarumą lemia:

- serijinė gamyba ir pritaikomumas įvairiose srityse ir mechanizmuose;
- išstobulintas projektavimas, plačios žinios apie konstrukcijas;
- gerai išvystytos valdymo sistemos;
- geri energetiniai rodikliai;
- mechaninių perdavų, skirtų sukiojo judesio transformavimui, įvairovė (reduktoriai, švaistiklio-skriejicklio, kumšteliniai, kulisės ir kitos perdavos), gilios mechanizmų teorinės žinios ir išvystytas perdavų projektavimas;

- tradicijos;

b) specialiųjų elektros mašinų, skirtų konkrečiam tipo mechanizmams, kūrimas, projektavimas ir gamyba. Specialiųjų mašinų ir mechanizmų, kurių judesys nėra pastovus sukusis (stūmokliniai kompresoriai, kalimo-štamposimo mechanizmai, stūmokliniai siurbliai, membraniniai siurbliai, automobilio vožtuvai, vidaus degimo varikliai, vakuomo siurbliai, elektriniai traukiniai ant magnetinių „pagalvių“, siaurapjūkliai, vibromaitintuvai, laikrodžiuose įmontuoti mikrogeneratoriai, garsiakalbiai, vidaus degimo variklių vožtuvai, dirbtinės širdies aparatai, pjezo varikliai, vykdikliai ir kiti [1, 2]), pasaulyje yra didelė įvairovė. Šiuo metu vyrauja tendencija kurti įvairaus tipo specialiąsias elektros mašinas, kurioms nereiktų mechaninio judesio perdavos – tai riedančio rotoriaus, tiesiaieigio-švytuojamojo judesio, sukamojo-švytuojamojo judesio, tiesiaieigio judesio ir kitokie elektros varikliai. Taip pat kuriami tiesiaieigio ir sukamojo švytuojamojo judesio elektros generatoriai, kurių konstrukcija yra pritaikyta ne pastoviam judesiui (kaip hidrogeneratoriai, vėjo elektrinių generatoriai, dujų turbinų generatoriai), o laiko ir amplitudės atžvilgiu neapibrėžtam judesiui (jūros bangų elektros generatoriai, Stirlingo varikliai su švytuojamojo judesio generatoriais [1]).

Lietuvoje specialiųjų elektros mašinų ir jų sistemų tyrimus vykdo Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) mokslininkai – prof. A. J. Poška, prof. A. Smilgevičius, prof. R. Rinkevičienė, doc. E. Matkevičius, B. Karaliūnas ir kiti. Šios grupės tyrimai susiję su tiesiaieigių asinchroninių variklių (TAV) charakteristikų skaičiavimu, projektavimu, jų pritaikymu vykdiklių mechanizmuose. VGTU mokslininkai atliko įrenginių magnetinių grandinių, elektromagnetinės jėgos skaičiavimus, stabdymo režimų tyrimus, ištyrė pereinamuosius ir nusistovėjusius vyksmus; pateikė valdymo būdus, plačiai išnagrinėjo TAV ir jų sistemų modeliavimą [2, 17-47].

Buęs ilgametis Klaipėdos universiteto (KU) Elektrotechnikos katedros profesorius S. Kudarauskas [1, 6] ir kiti esami ir buvę KU Elektrotechnikos katedros

mokslininkai – dr. V. Cirtautas [11, 14], dr. A. Brazaitis [8-10, 13, 16], dr. J. Šatas, dr. E. Guseinovicė [3, 7-14, 16], dr. L. Simanygienė [4], dr. A. Samuitis, dr. V. Česonis, dr. J. Vaupšas [15], dr. A. Maironis, dr. V. Baranauskas, jau daugiau kaip 50 metų vykdo tyrimus specialiųjų elektros mašinų – švytuojamojo judesio elektros mašinų srityje. KU mokslininkų darbuose plačiai išnagrinėtas švytuojamojo judesio elektros mašinų nusistovėjęs darbas ir pereinamieji vyksmai, šių mašinų darbas stūmoklinio kompresoriaus pavaroje, nagrinėti tiek žadinamieji, tiek ir nežadinamieji švytuojamojo judesio elektros varikliai. Darbuose pateikta jų klasifikacija, nagrinėtos valdymo galimybės ir priemonės, panaudojant įvairaus tipo elektros energijos keitiklius, išnagrinėti energetiniai rodikliai, pateiktos rekomendacijos optimaliam šių įrenginių darbui ir konstrukcijai [1, 3-16].

Kauno technologijos universitete (KTU) atliekami mechatroninių sistemų tyrimai analizuojantys šių sistemų darbą, pozicionavimą, elektropneumatinės sistemas, jų valdymą (prof. V. Geleževičius [51-54]), pritaikymą elektros mašinų specialioms poreikiams (prof. S. Gečys, P. Smolskas [14, 55-58]), mechatroninių sistemų kūrimą (prof. D. Eidukas [7, 11]).

Užsienio mokslininkų darbai sutelkti ties žadinamųjų švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų (ŠJMĮ) tyrimais, sudarant jų matematinius modelius, analizuojant įtaisų judžiosios dalies (JD) švytavimų poslinkio amplitudės valdymą ir jų konstrukcijos ypatumus. Deja, daugumoje Lietuvos ir užsienio mokslininkų darbų mažai nagrinėjami dvimasiai dvipusiai nežadinamieji mechatroniniai įtaisai, valdomi įtampos keitikliu. Daugiausia šios srities darbų atlikta KU Elektrotechnikos katedroje, tačiau apsiribojant tik vienmasės sistemos analize ir analizuojant tik vienpusį, o ne bendrą ŠJMĮ darbą [1, 3-16].

Disertacijoje nagrinėjami mechanizmai ir įtaisai, kurių judesys yra tiesiaeigis, tiesiaeigis grįžtamasis arba švytuojamasis. Darbe pateikiamas dvimasio dvipusio bespyruoklio nežadinamojo, tiristoriniu įtampos keitikliu valdomo, mechatroninio įtaiso matematinis modelis, suskirstant įtaisą į posistemas. Pateikiama induktyvumų analizė ir valdymo posistemės algoritmai, ištirtas įtaiso srovės informacijos panaudojimas JD švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui, švytavimų centro poslinkio sąsaja su bendrąja įtaiso srove. Taip pat nustatytos informatyvosios srovės harmonikos ir jų panaudojimas atliekant įrenginio diagnostiką.

Taigi, disertacinis darbas skirtas švytuojamųjų mechatroninių įtaisų sistemų analitiniam tyrimui, valdymo sistemų tobulinimui ir ŠJMĮ diagnostikai.

Daktaro disertaciją sudaro keturi skyriai.

Pirmajame skyriuje apžvelgti specialiųjų ŠJMĮ tyrimai Lietuvoje ir užsienyje. Išanalizuotos įtaisų pritaikymo sritys, JD poslinkio ir greičio valdymo, nustatymo būdai ir algoritmai. Skyriuje pateikta konstrukcijų įvairovė, tipinės tokių įtaisų darbo sąlygos, įrenginių diagnostika. Išnagrinėti esami mechatroninių įtaisų matematiniai modeliai ir jų sudarymo metodai. Skyriaus pabaigoje pateiktos išvados.

Antrasis skyrius skirtas tiriamojo įtaiso bendrosios sistemos sudarymui, kai įtaisas yra sukonkretintas – tiristoriniu įtampos keitikliu valdomas dvimasis dvipusis bespyruoklis švytuojamojo judesio pulsuojamosios srovės sinchroninis nežadinamasis elektros variklis kompresoriaus pavaroje (įtaiso pasirinkimą lėmė platus ir perspektyvus pritaikymas). Analizuojant sistemą išskirtos mechaninė,

elektromagnetinė, galios keitiklio (elektromagnetinė ir galios keitiklio posistemės sudaro bendrą elektrinę posistemę) ir valdymo posistemės. Sudarytos mechaninės posistemės JD švytavimų poslinkio amplitudės ir fazių analitinės išraiškos, nustatytos dvimasės sistemos stabilumo sąlygos. Sudarytos išraiškos tiksliai mechaninės posistemės parametrų nustatyti, kuriems esant įtaisy dirba rezonansiniu režimu. Sudarytos įrenginio mechaninės charakteristikos, ištytos rezonansinių dažnių priklausomybės nuo sistemos parametrų, pateikta JD švytavimų poslinkio amplitudės pilnojo diferencialo išraiška. Atlikta induktyvumų ir sistemos kintamųjų harmoninė analizė, srovės informatyviųjų harmonikų skaičiaus nustatymas. Nustatytos priklausomybės – tarp įtaiso JD švytavimų poslinkio ir elektromagnetinės jėgos harmonikų amplitudžių; tarp įtaiso JD švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės pirmųjų harmonikų amplitudžių; tarp įtaiso švytavimų centro poslinkio ir bendrosios srovės nuolatinės dedamosios. Paašškintos švytavimų centro poslinkio atsiradimo priežastys. Pateiktas algoritmas JD švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui, panaudojant bendrosios srovės informatyviuosius harmonikos parametrus – bendrosios srovės 1-osios harmonikos amplitudę ir nuolatinę dedamąją. Pateikti įtaiso gedimai ir jų sąryšis su bendrosios srovės informacija. Skyriaus pabaigoje pateiktos išvados.

Trečiame skyriuje pateikti ŠJMĮ modeliavimo rezultatai. Sudarytas bendrasis įtaiso matematinis modelis. Išanalizuoti mechaninių ir elektrinių kintamųjų pereinamieji ir kvazistacionarūs vyksmai. Ištyta įtaiso JD švytavimų poslinkio amplitudės priklausomybė nuo tiristorių atidarymo kampo ir apkrovos, atlikta visų sistemos kintamųjų harmoninė analizė. Sudarytos grafinės priklausomybės tarp bendrosios srovės ir JD švytavimų poslinkio harmonikų amplitudžių. Taip pat pateikti sąryšiai tarp bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir JD švytavimų centro poslinkio. Gauti modeliavimo rezultatai palyginti su analitinių skaičiavimų rezultatais. Skyriaus pabaigoje pateiktos išvados.

Ketvirtasis skyrius skirtas ŠJMĮ eksperimentiniam tyrimui, kurio metu buvo nustatytos priklausomybės tarp įtaiso JD švytavimų centro poslinkio ir bendrosios srovės nuolatinės dedamosios. Atlikta „statoriaus“ ir bendrosios srovės harmoninė analizė ir rezultatai sulyginami su skaičiavimų rezultatais. Nustatytas eksperimentinis sąryšis tarp bendrosios srovės pirmosios harmonikos ir švytavimų poslinkio amplitudžių. Atliktas įtaiso apvijų abipusio induktyvumo nustatymas. Skyriaus pabaigoje pateiktos išvados.

Darbo pabaigoje pateiktos bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus paskelbtų publikacijų sąrašas disertacijos tema ir priedai, papildantys disertaciją.

Temos aktualumas

Dažnai įvairiems tiesiaiegiams švytuojamojo judesio mechanizmams panaudojami tradiciniai elektros varikliai, tačiau tam tikslui aktualiau naudoti specialiuosius – švytuojamojo judesio elektros variklius. Plačiai naudojami cilindrinės formos vienapvijai, nuolatiniais magnetais žadinami, švytuojamojo judesio elektros varikliai, valdomi dažniniu būdu. Šiuo atveju žadinimui būtini specialios formos nuolatiniai retųjų metalų magnetai, kurie žymiai pabrangina įrenginį. Taip pat daugumoje tokių įtaisų yra naudojamos grąžinamosios spyruoklės,

kurios yra papildoma nenaudinga reaktyvioji apkrova ir gedimo šaltinis. Aktualu yra ištirti dviemasių dvipusį bespyruoklį švytuojamojo judesio pulsuojamąsios srovės sinchroninį nežadinamąjį elektros variklį, valdomą įtampos keitikliu, kurio JD švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui ir valdymui panaudojama įrenginio srovės informacija. Ši informacija taip pat tinkama įtaiso gedimų nustatymui. Aktualu valdyti bespyruoklio įtaiso JD švytavimų centro poslinkį jį stabilizuojant. Perspektyvu švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui panaudoti srovės jutiklį, kuris fiziškai nesusietas su ŠJMĮ ir gali būti integruotas į valdymo grandinę, atliekančią valdymą ir gedimų nustatymą. Srovės jutiklio panaudojimas pagerina šias įtaiso savybes – atpigina švytavimų poslinkio matavimo jutiklį (srovės matuoklis); matavimo jutiklis panaudojamas švytavimų poslinkio netiesioginiam nustatymui, įtaiso diagnostikai nuotoliniu būdu; sumažėja jutiklio gedimo tikimybė; pigesni eksploatacija ir remontas. Siekiant įgyvendinti „bejutiklį“ įtaiso valdymą ir diagnostiką, panaudojant tik bendrosios srovės informaciją, būtina atlikti ŠJMĮ bendrosios srovės informatyviųjų parametrų nustatymą, sudaryti sąryšius tarp švytavimų poslinkio amplitudės ir bendrosios srovės spektro informacijos. Gedimų nustatymui naudojamos informatyviosios harmonikos, kurių sąryšis su gedimais yra vienareikšmis.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – ištirti dviemasių švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso darbo režimus, judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo ir valdymo, įtaiso diagnostikos aspektus, panaudojant švytavimų poslinkio ir srovės spektro informatyviuosius parametrus.

Darbo tikslui pasiekti išskelti šie **uždaviniai**:

1. Išanalizuoti esamus švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų darbo ypatumus, poslinkio nustatymo ir valdymo metodus, taikomus diagnostikos metodus.

2. Nustatyti švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso srovės harmonikų parametrus, teikiančius informaciją apie švytavimų poslinkio amplitudę, sudaryti sąryšį tarp švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės harmonikų parametrų.

3. Sudaryti švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso matematinį modelį, įvertinantį dviemasių įtaiso sistemą, dvipusį veikimą, netiesinius induktyvumus, švytavimų poslinkio ir srovės parametrų nustatymą.

4. Sudaryti įtampos keitikliu valdomo švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso struktūrinę schemą, švytavimų poslinkio amplitudės netiesioginio nustatymo ir valdymo algoritmą, įtaiso gedimų nustatymo seką.

5. Nustatyti švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso gedimų aibę ir gedimų sąryšį su įtaiso srovės informatyviais parametrais.

6. Natūrinio eksperimento metodu nustatyti tiriamojo fizinio modelio – įtampos keitikliu valdomo švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso darbo charakteristikas ir patikrinti gautų matematinio modeliavimo ir analitinio skaičiavimo rezultatų atitikimą.

Mokslinis naujumas

Švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų variklio srovės spektro informacijos panaudojimas judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui netiesioginiu būdu ir įtaiso diagnostikai yra naujas tuo, kad srovės spektro informacija iki šiol atliktuose tyrimuose nebuvo naudojama švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui, valdymui ir įtaiso gedimų diagnostikai atlikti. Mokslinį naujumą sudaro ir nustatyti sąryšiai tarp įtaiso judžiosios dalies švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės harmonikų amplitudžių.

Praktinė vertė

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės netiesioginis nustatymo metodas, lyginant su tiesioginiu matavimu, turi tokius privalumus: poslinkio matavimui neturi įtakos mechaninės vibracijos; mažesnė matuoklio gedimo tikimybė; nėra matuoklio užteršimo tepalais ar kitais skysčiais galimybės; nėra būtinybės išdėstyti matuoklį ŠJMĮ viduje; srovės spektras suteikia išsamesnę informaciją apie švytavimų amplitudę ir centro poslinkį nei matuojant tik srovės efektines vertes. Šis metodas gali būti panaudotas ne tik švytuojamojo judesio, bet ir kitokios trajektorijos ar periodiškumo veikimo įtaisams, todėl naudojant šį metodą supaprastėja jutiklis, jo montavimas, priežiūra ir remontas. Taip pat ŠJMĮ srovės spektro informacija panaudojama įrenginio gedimų nustatymui.

Ginamieji teiginiai

1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės priklausomybės nuo bendrosios srovės spektro nustatymo metodas, įvertinant bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir pirmosios harmonikos įtaką.
2. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso švytavimų poslinkio valdymo metodas, besiremiantis švytavimų poslinkio amplitudės apskaičiavimu iš srovės pirmosios harmonikos amplitudės verčių.
3. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso diagnostikos metodas, panaudojant srovės nuolatinę dedamąją ir pirmąsias tris harmonikas.

Darbo aprobavimas

Tyrimų rezultatai aprobuoti 11-oje mokslinių straipsnių (4 ISI Web of Science ir 4 Lietuvos mokslo tarybos duomenų bazėse) ir 10-yje mokslinių konferencijų:

1. 15-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2011“. Generalized mathematical model of controlled linear oscillating mechatronic device. 2011 m. gegužės 17-19 d. Kaunas, Lietuva.
2. 14-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2010“. Research of Correlation between the Oscillation Amplitude and Current Spectrum of Oscillating Electrical Motors. 2010 m. gegužės 18-20 d. Kaunas, Lietuva.

3. 8-oji tarptautinė konferencija “Vibroinžinerija-2009“. Control Possibilities of Oscillating Electrical Motor Using FFT Analysis Data. 2009 m. rugsėjo 16-19 d. Klaipėda, Lietuva.

4. 13-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2009“. Investigation of Magnetic Field of Controlled Oscillating Electrical Machine. 2009 m. gegužės 12-14 d. Kaunas, Lietuva.

5. 12-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2008“ (pranešimas plenarinėje sesijoje). Simulation of Transient Behaviour of Thyristor Controlled Oscillating Current Motor. 2008 m. gegužės 21-22 d. Kaunas, Lietuva.

6. VI konferencija „Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje“. Švytuojamojo tiesiaieigio judesio variklio-kompresoriaus matematinio modelio struktūros kaita ir analizė. 2008 m. kovo 27-28 d. Klaipėda, Lietuva.

7. 11-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2007“. Experimental investigation of oscillation center displacement of oscillating pulsating current motor and springless compressor drive. 2007 m. gegužės 16-17 d. Kaunas, Lietuva.

8. 8-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2004“. Švytuojamojo variklio-kompresoriaus švytavimų centro valdymas. 2004 m. gegužės 18-20 d. Kaunas, Lietuva.

9. 7-oji tarptautinė konferencija „Elektronika-2003“. Švytuojamasis sinchroninis pulsuojamosios srovės variklis, maitinamas stačiakampe įtampa. 2003 m. gegužės 20-22 d. Kaunas, Lietuva.

10. 13th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, EDPE'03. Some control problems of oscillating synchronous pulsating current motor. 2003 m. rugsėjo 24-26 d. Aukštieji Tatrai, Slovakija.

Darbo struktūra

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas ir priedai. Bendra disertacijos apimtis 146 puslapiai, iš jų 73 paveikslai, 3 lentelės ir 133 bibliografinės nuorodos, ir 44 puslapiai priedų.

1. SPECIALIŲJŲ MECHATRONINIŲ ĮTAISŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Specialieji mechatroniniai įtaisai – tai įvairaus tipo ir konstrukcijų valdomos specialiosios elektros mašinos be perdavos sujungtos su varomuoju mechanizmu, siekiant sumažinti mechaninius nuostolius, efektyviau išnaudoti medžiagas, elektros energiją, optimaliau suderinti mechanizmo ir valdomos elektros mašinos charakteristikas. Darbe tiriamas tiristoriniu įtampos keitikliu valdomas švytuojamojo tiesiaeigio judesio sinchroninio pulsuojamosios srovės elektros variklis dvipusio bespyruoklio kompresoriaus pavaroje. Šio tipo švytuojamojo judesio varikliai buvo pradėti tirti XX a. pradžioje ir, su pertraukomis, tiriami iki šiol (LG Electronics švytuojamojo judesio kompresorius montuoja į šaldytuvus, NASA kuria efektyvius Stirlingo variklius su švytuojamojo judesio elektros generatoriais, skirtus elektros energijos gamybai kosminėse stotyse, JAV firma “Sunpower” kuria švytuojamojo judesio variklius kompresoriaus pavaroje šaldymo įrangai, kt.).

Tačiau pasaulyje ir Lietuvoje atliekami tyrimai neapsiriboja tik minėtojo tipo specialiųjų mechatroninių įtaisų tyrimais. Analizuojant Lietuvos ir užsienio mokslininkų darbus, nustatytos kelios tyrimų kryptys ir tematikos:

- specialiųjų mechatroninių įtaisų pritaikomumas, klasifikacija;
- įtaisų konstrukcijų optimizavimo uždavinių sprendimas;
- energetinių parametrų tyrimai;
- švytavimų poslinkio arba jo amplitudės nustatymo metodai;
- valdomų elektros energijos keitiklių panaudojimas;
- įtaisų magnetinių grandinių tyrimai;
- matematinio modelio sudarymas;
- poslinkio amplitudės ir jėgos valdymo algoritmų sudarymas;
- įtaisų sistemos kintamųjų spektrinė analizė;
- įtaisų stacionariųjų ir pereinamųjų vyksmų tyrimai.

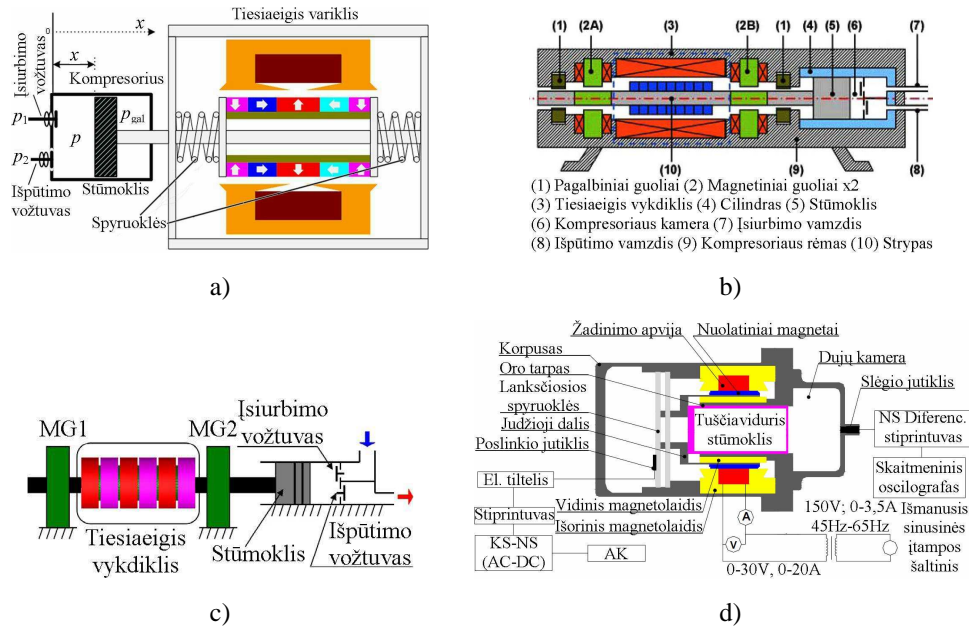
Kadangi švytuojamojo judesio mašinų tyrimai Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedroje pradėti jau prieš 50 metų, yra šių darbų tęstinumas, todėl vienas literatūros šaltinių yra prof. habil. dr. S. Kudarausko monografija [1], kurioje autorius išsamiai nagrinėja įvairius klausimus, susijusius su švytuojamojo judesio elektros mašinų teorija, veikimu, panaudojimu. Autorius apžvelgė švytuojamojo judesio elektros mašinų vystymosi raidą, pasiūlė jų klasifikaciją pagal judesio trajektorijos ir laikines savybes. Autorius nagrinėja klausimus, susijusius su šių mašinų konstrukcija, ypatybėmis, maitinimo galimybėmis, charakteristikų sudarymu, efektyviu panaudojimu, pateikia naujų konstrukcinių sprendimų.

1.1. Specialiųjų ir švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų klasifikacija, charakteristikos, tyrimai

Specialiųjų elektros mašinų pritaikomumas yra platus ten, kur mechanizmo judesys nėra sukamojo judesio, o turi kitokią trajektoriją ir laikines charakteristikas – judesys yra impulsinis arba švytuojamasis tiesiaeigis. Specialiosios elektros mašinos kartu su apkrovos mechanizmais ir jų valdymo sistemomis yra pritaikomos:

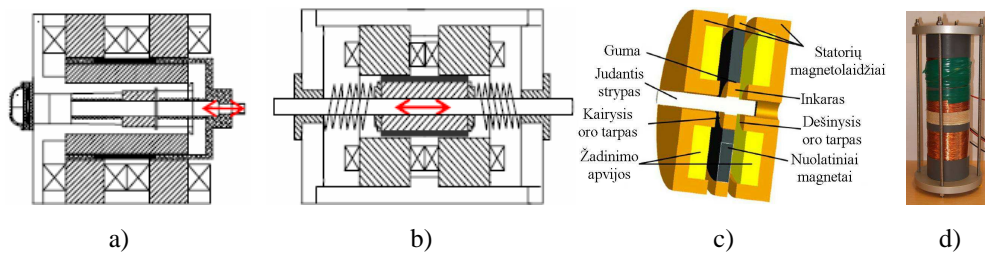
- Stūmokliniuose kompresoriuose (1.1 pav.) [1, 3, 4, 60-74, kt.] – tai vienas žinomiausių šių įtaisų pritaikymo pavyzdžių. Tai nustatyta remiantis mokslinės

literatūros gausa šia tematika tiek Lietuvoje, tiek ir užsienyje. Nagrinėti atvejai, kai kompresorius yra vienpusis arba, retesniu atveju, dvipusis [1, 4]. Kompresoriaus stūmoklio poslinkis tiek ašine, tiek ir skersine kryptimi stabilizuojamas panaudojant įvairaus tipo spyruokles (vienpusiam kompresoriui jos yra būtinos), magnetinius guolius. Esant dvipusiam kompresoriui – galimas ir bespyruoklis šio įtaiso darbas [1].



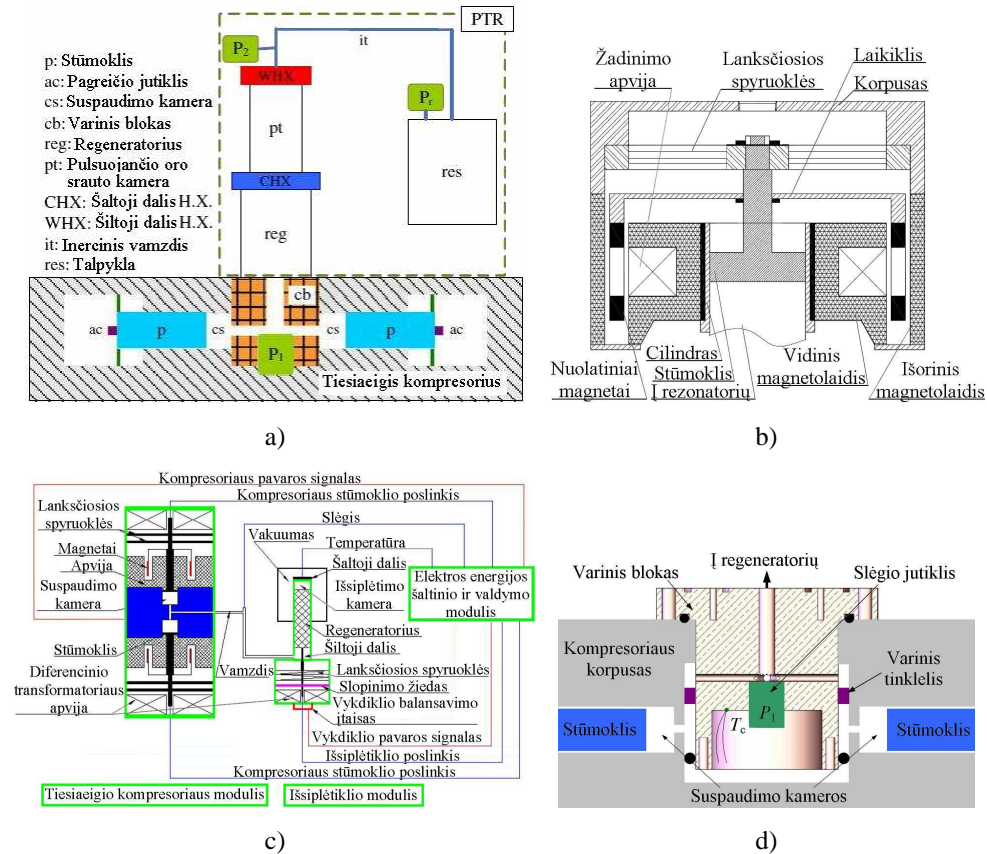
1.1 pav. ŠJMĮ stūmoklinio kompresoriaus mechanizmuose: a) [61], b) [60], c) [62], d) [70]

• Tiesiaeigio arba tiesiaeigio švytuojamojo judesio vykdikliuose (1.2 pav.) [2, 17-20, 25-28, 75-88, kt.]. Šių mechanizmų varymui panaudotos švytuojamojo tiesiaeigio judesio sinchroninės žadinamosios ir nežadinamosios elektros mašinos, asinchroninės švytuojamojo judesio elektros mašinos arba TAV. Šių vykdiklių judesio kelias gali būti nuo kelių milimetrų iki keliasdešimt kilometrų (traukiniai ant magnetinės pagalvės), priklausomai nuo konstrukcijos ir paskirties. Jie naudojami pakeisti pneumatinius vykdiklius (tiesiaeigiuose pastūmos mechanizmuose), kai pneumatinės sistemos prievadas prie technologinio proceso atskiros vietos nėra tikslingas ir ekonomiškai efektyviau panaudoti tiesiaeigius elektrinius vykdiklius.



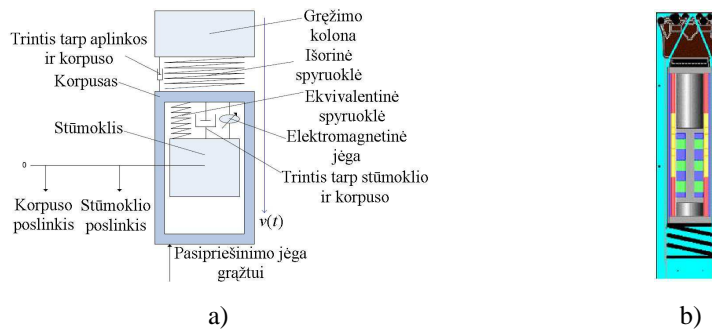
1.2 pav. ŠJMĮ tiesiaeigio švytuojamojo judesio vykdikliuose: a) ir b) [75], c) [77], d) [79]

- Bendrose sistemose su Stirlingingo šilumine mašina (1.3 pav.) [89-93] – tai dažniausiai šaldymo sistemos arba sistemos, kurios atlieka darbą varydamos švytuojamojo judesio generatorių.



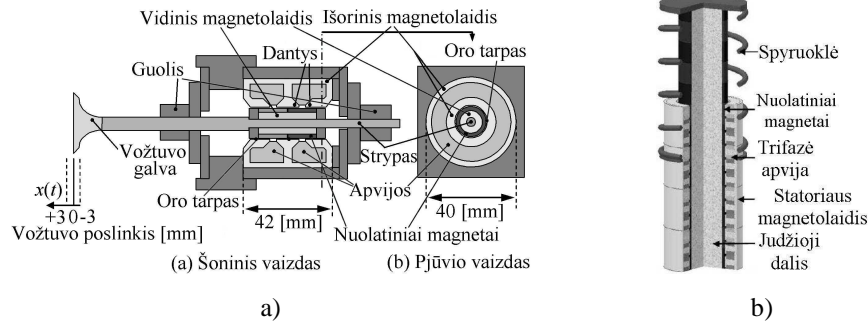
1.3 pav. ŠJMĮ su Stirlingingo šilumine mašina: a) [90], b) [91], c) [92], d) [93]

- Smūginiams gręžimo įrenginiams (1.4 pav.) [94, 95]. Šiuose įrenginiuose panaudojamas įtaiso JD trumpos švytavimų poslinkio amplitudės judesys akmenuoto arba kieto grunto skaldymui, tuo pagerinant gręžimo efektyvumą.



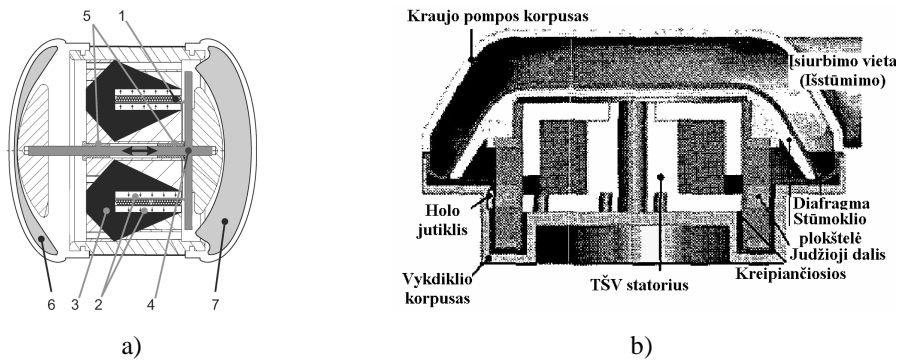
1.4 pav. ŠJMĮ gręžimo įrenginiuose: a) [94], b) [95]

- Automobilio amortizatoriams ir elektrinėms vožtuvų pavaroms (1.5 pav.) [96, 97]. Automobilio elektrinio vožtuvo mechanizmuose mechatroninis įtaisas (dažniausiai būna dviejų arba trijų magnetovaru) dirba arba švytuojamojo judesio, trumpalaikiu kartotiniu arba impulsiniu režimu. Trumpalaikio kartotinio arba impulsinio režimo atveju vožtuvo galvutė sustoja kraštinėse judėjimo padėtyse tam tikrą laiką. Amortizatoriuose šie įtaisai atlieka dvi pagrindines funkcijas – pakabos amortizavimo ir elektros generavimo, amortizavimo energiją panaudojant transporto priemonių baterijų pakrovimui.



1.5 pav. ŠJMĮ pritaikymas automobilio vožtuvų ir pakabos mechanizmas: a) [97], b) [96]

- Dirbtinės širdies aparatams (1.6 pav.) [98, 99].



1.6 pav. ŠJMĮ pritaikymas dirbtiniams širdies aparatams: a) [99], b) [98]

- Elektromagnetinio pabūklo kūrimui [100, 101] – naudojamos sistemos, kai vienoje įtaiso apvijoje sukuriama stiprus elektromagnetinis impulsas veikia sviedinį (atitinkantį trumpai jungtą viją) ir panaudojant abipusės indukcijos srautus, išvystomas didelis sviedinio greitis. Šiuo principu kuriamos ir eksperimentinės katapultos kosminių aparatų paleidimui.

- Tiesiaeigiams vykdikliams, kurių judesys nėra būtinai švytuojamasis – tai linijine trajektorija judantys traukiniai ant magnetinės pagalvės, robotai. Tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimus Lietuvoje atlieka VGTU mokslininkų grupė. Darbuose nagrinėjami klausimai, susiję su paleidimo ir stabdymo jėgų skaičiavimu, nagrinėjant jėgos sudedamąsias, priklausančias nuo galų reiškinio įtakos ir antrinio elemento padėties [2, 17-47].

- ŠJMĮ taip pat pritaikomi elektrinio plaktuko, siaurapjūkliai mechanizmuose, barzdaskutėse, elektrinėse plaukų kirpimo mašinėlėse, vandens ar kitokio skysčio siurbliuose, kaip generatoriai kartu su vidaus degimo varikliais [1]. Toks platus šių įtaisų panaudojimo spektras ir didelė Lietuvos ir užsienio mokslininkų publikacijų gausa paskutiniaisiais metais, lemia šių įtaisų tyrimų aktualumą.

Konstrukciniu požiūriu visos apžvelgtos specialiųjų įtaisų sistemos yra dvimasis (išskyrus laisvųjų judesių švytuojamojo judesio generatorių [1, 6]), sudarytos iš judžiosios dalies ir „statoriaus“. Pagrindiniai „statoriaus“ tvirtinimo prie pagrindo būdai yra šie – standus, panaudojant vibroslopintuvus, ir liaunas, panaudojant spyruokles. Taip pat konstruojami ir tiriami cilindriniai [1, 2] arba ne cilindrinės [2, 17-47] formos mechatroniniai įtaisai.

Specialiųjų mechatroninių įtaisų elektromagnetinės grandinės, pagal žadinimo būdą, apvijų išdėstymą, išsamiai aprašytos moksliniuose darbuose [1, 2]. Iš minėtų specialiųjų įtaisų labiausiai paplitę yra:

- žadinamieji sinchroniniai elektros varikliai su nuolatinais magnetais JD ir viena arba dviem kintamosios srovės magnetovaromis „statoriuje“ („C-core“ arba „E-core“ magnetolaidžių tipai) [59-97];

- tiesiaiegiai asinchroniniai varikliai (TAV) [2, 17-47].

Pirmųjų paplitimas, lyginant su nežadinamaisiais varikliais, grindžiamas šių įtaisų didesniu naudingumo koeficientu, geresniais energetiniais rodikliais, galios ir masės santykiu [1]. Tačiau žadinamųjų variklių gamybos kaina – didesnė [1]. Dėl minėtų priežasčių, nežadinamųjų sinchroninių elektros variklių tyrimų rezultatai, užsienio mokslininkų darbuose retai aptinkami, nors nežadinamųjų variklių energetinės charakteristikos nėra žymiai prastesnės [1]. Nežadinamųjų elektros variklių tyrimai plačiau atspindėti Lietuvos mokslininkų darbuose [1, 3, 4, 7-14], kuriuose nagrinėtos nežadinamųjų švytuojamojo judesio sinchroninių elektros variklių problemos ir jų sprendimai. Minėtuose šaltiniuose nėra plačiai išnagrinėtos tokios temos kaip: analitinio dvimasio dvipusio veikimo švytuojamojo judesio variklio charakteristikų sudarymas; analitinių modelių panaudojimas valdymo sistemose; netiesioginis JD švytavimų poslinkio ir jo amplitudės nustatymas; srovės arba spektro informacijos panaudojimas valdymo sistemoje; JD švytavimų centro stabilizavimas; įtaisų diagnostika.

Platesnė mokslinių darbų analizė išryškino tyrimų kryptis, susijusias su ŠJMĮ. Švytuojamojo judesio žadinamųjų elektros variklių konstrukcijų optimizavimo problemas ir tyrimus galima suskirstyti į grupes:

- elektromagnetinės jėgos skaičiavimo uždaviniai, analizuojant įtaiso magnetinės grandinės parametrus analitiniais arba baigtinių elementų metodais [62, 75-77, 80, 89, 91, 102];

- oro tarpo magnetinio lauko analizė [75-77, 80];

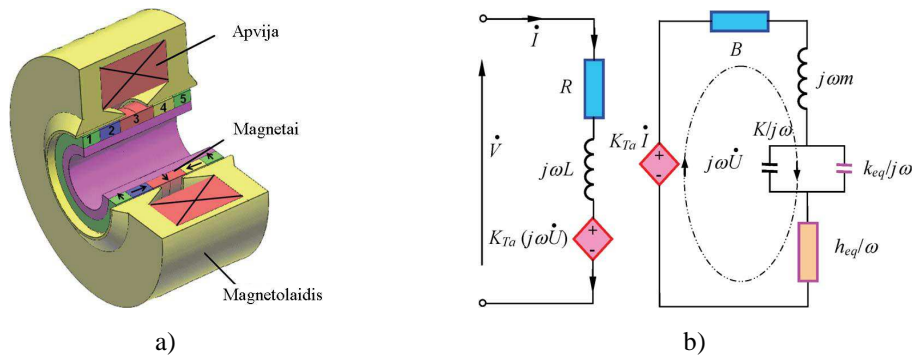
- induktyvumų nustatymas, panaudojant ekvivalentinių magnetinių grandinių skaičiavimo metodus [80, 91];

- apvijų ir magnetų tarpusavio išdėstymo uždaviniai, tiek „statoriuje“, tiek ir JD [76, 77, 80];

- nuostolių skaičiavimas magnetinėje grandinėje [64, 65, 80], liekamojo įmagnetinimo įtaka ir magnetų storio įtakos įvertinimas [65];

- judžiosios dalies reakcijos įvertinimas [76];
- apvijų projektavimo uždavinys [65, 76];
- magnetinės grandinės patikslinimas, panaudojant ekvivalentines magnetinės grandinės schemas [76, 91];
- atliktų pirminių skaičiavimų patikrinimas baigtinių elementų ir modeliavimo metodais, eksperimentinio modelio duomenų palyginimas su skaičiavimo rezultatais [76, 77, 80, 102, 103].

Visi minėti uždaviniai sprendžiami panaudojant Maksvelo lygčių sistemą, Faradėjaus, Puasono, pilnosios srovės ir abipusės indukcijos dėsnius. Darbuose siekiama nustatyti optimalią įtaiso konstrukciją, didžiausios sukuriamos jėgos atžvilgiu. Šių tyrimų rezultatai yra susiję su švytuojamojo judesio žadinamaisiais elektros varikliais ir vykdykliais, turinčiais dvi magnetovaras (1.7 pav.). Optimalios konstrukcijos sukūrimui žadinimo grandinėje panaudojamas nuolatinių magnetų išdėstymas pagal Halbacho schemą (Halbach) [64, 65, 69, 80, 104-107]. Tokie įtaisai savaime privalo turėti spyruokles JD padėčiai stabilizuoti.



1.7 pav. Žadinamasis švytuojamojo judesio variklis (a) ir jo mechaninės ir elektrinės grandinių ekvivalentinė schema (b) [65]

Minėtuose darbuose išnagrinėti tokio tipo variklių-kompresorių konstrukcijos optimizavimo klausimai, analizuojant šių įrenginių naudingumo koeficientą, optimalų „statoriaus“ apvijų skaičių, magnetinius nuostolius, „statoriaus“ magnetolaidžio konstrukciją. Tokių konstrukcijų optimizavimo uždaviniai taikytini analizuojant ir nežadinamuosius sinchroninius elektros variklius [1, 3-14, 16]. Tačiau tik dalis informacijos šia tema randama KU mokslininkų darbuose.

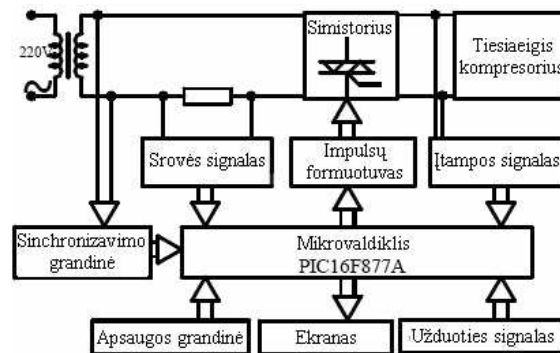
1.2. Švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų valdymo sistemų, švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo ir įtaisų diagnostikos metodų tyrimai

Vienas iš plačiau išnagrinėtų klausimų švytuojamojo judesio žadinamųjų elektros mašinų (vykdyklių ar variklių) srityje, yra įtaiso švytavimų poslinkio ir jo amplitudės nustatymo metodai, kurie skirstomi į dvi pagrindines grupes:

- tiesioginis poslinkio matavimas, panaudojant linijinius jutiklius poslinkiui išmatuoti realiu laiku. Šiuo atveju dažniausiai naudojami optiniai (Grėjaus kodo, lazeriniai) [7, 97, 113, 114] ir indukciniai jutikliai (linijiniai skirtuminiai transformatoriai) [9, 10, 60, 71];

- netiesioginis judžiosios dalies švytavimų poslinkio nustatymo metodas. Šio metodo realizacijų yra keletas:

- ŠJMĮ judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudė nustatoma panaudojant kompresoriaus našumo priklausomybę nuo simistoriaus atidarymo kampo [59]. Ši priklausomybė yra susieta su įtaiso grandinės matuojama srove. Minėta charakteristika sudaroma vieną kartą ir įrašoma į mikrovaldiklį, kuris vykdo valdymui skirtą algoritmą, remdamasis technologinio proceso reikalavimais (našumo poreikiu arba jo stabilizavimu). Paleidžiant arba stabdant šį įtaisą, simistoriaus atidarymo kampai atitinkamai iš lėto mažinami arba didinami. Ši sistema taikoma konkrečiam įrenginiui arba technologiniam procesui, ji nėra universali, nes keičiant įrenginį kitu, būtina atnaujinti sistemos duomenis. Sistemos struktūra pavaizduota 1.8 paveiksle. Straipsnyje [59] pateiktos srovės oscilogramos, rodo įrenginio „statoriaus“ grandinės darbą trūkių srovių režimu, kuris nėra efektyvus. Šios sistemos papildomas trūkumas – simistoriaus valdomumo sumažėjimas, esant aktyviajai-induktyviajai keitiklio apkrovai.



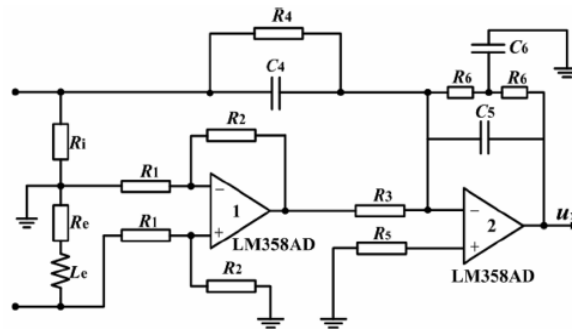
1.8 pav. ŠJMĮ valdymo sistema, kai įtaiso duomenys įrašomi į mikrovaldiklį, o valdymo metu JD poslinkio amplitudė nustatoma, lyginant įrašytus duomenis su srovės matavimo duomenimis [59]

- Švytavimų poslinkio nustatymo metodas pagrįstas įtampos ir srovės matavimu ir analitiniu švytavimų poslinkio apskaičiavimu, remiantis išraiška [67]:

$$x(t) = \frac{1}{K_F} \int \left[u(t) - R_{ekv} i(t) - L_{ekv} \frac{di(t)}{dt} \right]. \quad (1.1)$$

Remiantis (1.1) išraiška, sudarytas padėties nustatymo įrenginys, kurio schema pateikiama 1.9 paveiksle. Schema įgyvendina (1.1) poslinkio nustatymo dėsnį, o išėjimas u_x yra proporcingas švytavimų poslinkiui $x(t)$. Autorių teigimu, šis poslinkio nustatymo metodas yra geras tuo, kad nebūtina žinoti įtaiso apkrovos parametru, o tik elektrinės grandinės ekvivalentinę varžą R_{ekv} , induktyvumą L_{ekv} ir elektromagnetinės jėgos konstantą K_F . Metodo korekcija būtina dėl magnetinės grandinės prisotinimo efekto, kai įrenginys švytuoja arti didžiausios švytavimų amplitudės. Autorių teigimu, metodas neįtraukia net induktyvumų kitimui. Darbe pateikiamos ir švytavimų poslinkio nustatymo, įrenginio parametru apskaičiavimo

sąlygos. Metodas pritaikytas vienos apvijos žadinamajam ŠJMĮ su spyruoklėmis, kai nėra būtina švytavimų centro stabilizacija. Šis metodas, lyginant su prieš tai pateiktu, yra universalesnis, nes paremtas analitiniu skaičiavimu.



1.9 pav. ŠJMĮ švytavimų poslinkio netiesioginio nustatymo įrenginio schema [67]

Metodo variantai pateikti ir kituose darbuose [109, 110]. Darbe [110] pateikiamas metodas, kai švytavimų poslinkis nustatomas panaudojant vidinę įtampą. Įtaiso vidinė įtampa nustatoma matuojant įtaiso srovę ir įtampą. Atlikus skaičiavimus poslinkio nustatymui, yra pašalinama atsiradusi poslinkio paklaida (nuolatinė švytavimų poslinkio komponentė), atsiradusi dėl aukšto dažnio filtro panaudojimo matavimo sistemoje, ir gautas rezultatas naudojamas valdymo algoritmui vykdyti.

o Darbe [108] pateikiamas švytuojamojo judesio įtaiso JD švytavimų poslinkio nustatymo metodas, panaudojant įtaiso mechaninės ir elektrinės sistemų diferencialines lygtis algebrinėje formoje. Metodui įgyvendinti priimtos prielaidos, kad įtaiso induktyvumas nekinta, o mechaninė sistema yra tiesinė. Darbe pateikiama sudaryta perdavimo funkcija – švytavimų poslinkio priklausomybė nuo srovės, kuriai atliktas Furjė pakeitimas [108]:

$$\frac{x(p)}{i(p)} = \frac{K_F}{mp^2 + R_{\text{mech}}p + C_{\text{mech}}} = \frac{K_F}{C_{\text{mech}} - m\omega^2 + j\omega R_{\text{mech}}} . \quad (1.2)$$

Išraiška (1.2) taikytina visais įtaiso apkrovos atvejais, tačiau, kaip teigia metodo autorius, įtaisas efektyviausiai dirba rezonanso atveju, todėl išraišką (1.2) galima perrašyti:

$$\frac{x(j\omega)}{i(j\omega)} = \frac{K_F}{j\omega R_{\text{mech}}} \rightarrow x(j\omega) = \frac{K_F}{j\omega R_{\text{mech}}} i(j\omega) . \quad (1.3)$$

Darbe [108] aptariamas dviejų apvijų „statorius“, tačiau išsamiai nagrinėjama tik vienos apvijos grandinės diferencialinė lygtis, neanalizuojant bendrosios sistemos, vertinama tik vienmasė sistema, nors įtaiso pakaba ir „statoriaus“ masė turi įtakos rezonansinio dažnio dydžiui. Darbe metodo algoritmo nėra, tačiau pateiktas įtaiso poslinkio nustatymo eksperimentinių ir skaičiavimo rezultatų palyginimas, esant rezonansiniam dažniui. Eksperimentų ir skaičiavimų rezultatų paklaida neviršija 5 %, o srovė poslinkį aplenkia 90°. Pažymėtina, kad atlikti

eksperimentai parodė, kad įtaisas efektyviausiai dirba ties 21 Hz, nesant apkrovos, ir 26 Hz, esant apkrovai. Tai parodo, kad įtaisas suprojektuotas ne tinklo dažniui, todėl optimaliam darbo režimui pasiekti būtinas dažnio keitiklis.

Tikslesni analitiniai sąryšiai šiam metodui pateikiami kitame darbe [70]. Poslinkio ir srovės amplitudžių sąryšiai (1.4) pritaikyti vienmasei sistemai ir vienos apvijos „statoriaus“ konstrukcijai. Pateikiama švytavimų poslinkio fazė srovės atžvilgiu (1.5):

$$\frac{X_m}{I_m} = \frac{K_F}{\sqrt{(C_{\text{mech}} - m\omega^2)^2 + (R_{\text{mech}}\omega)^2}}, \quad (1.4)$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{R_{\text{mech}}\omega}{C_{\text{mech}} - m\omega^2}\right). \quad (1.5)$$

Pateiktame metode matuojant srovės amplitudę, galima nustatyti švytavimų poslinkio amplitudę. Tačiau darbe nėra pateikta koeficiento K_F skaičiavimo metodika. Atitinkamai pateikti maitinančiosios įtampos ir švytavimų poslinkio amplitudžių (1.6), fazių skirtumo tarp įtampos ir švytavimų poslinkio, sąryšiai (1.7):

$$\frac{X_m}{U_m} = \frac{K_F}{\sqrt{\left[\frac{r}{K_F}(C_{\text{mech}} - m\omega^2) - \frac{A_3}{K_F}R_{\text{mech}}\omega^2\right]^2 + \left[\omega\left(r\frac{R_{\text{mech}}}{K_F} + A_4 + \frac{A_3}{K_F}(C_{\text{mech}} - m\omega^2)\right)\right]^2}}, \quad (1.6)$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{\omega\left(r\frac{R_{\text{mech}}}{K_F} + A_4 + \frac{A_3}{K_F}(C_{\text{mech}} - m\omega^2)\right)}{\frac{r}{K_F}(C_{\text{mech}} - m\omega^2) - \frac{A_3}{K_F}R_{\text{mech}}\omega^2}\right). \quad (1.7)$$

Pateiktos išraiškos tinka vienmasei sistemai, neįvertina magnetinių nuostolių, nepateikti A_3 ir A_4 koeficientų apskaičiavimo būdai. Iš darbo neaišku, ar yra įvertintas induktyvumo kitimas.

o Darbuose [16, 112] pateikiama ŠJMĮ uždara valdymo sistema, skirta švytavimų poslinkio valdymui netiesioginiu būdu. Valdymui yra panaudojamas standartinio sinusinio srovės signalo palyginimas su srovės grįžtamoju ryšiu. Šio standartinio srovės signalo forma yra įrašoma į mikrovaldiklį ir keičiant signalo amplitudės dydį, keičiama ir švytavimų poslinkio amplitudė. Tokiu būdu atliekant valdymą vykdomos dvi funkcijos – srovės stabilizavimo ir srovės parametrų valdymo. Abu metodai panašūs srovės panaudojimo aspektu, tačiau skiriasi jų įgyvendinimo metodai.

Darbe [16] pateiktas netiesioginis švytavimų poslinkio valdymo metodas, analizuojant bendrosios srovės informaciją (tiek amplitudines, tiek ir efektines vertes). Pateikti netiesioginiai poslinkio nustatymo metodai nėra susieti su apkrovos dviemasių sistemos parametrais, taip pat nenagrinėti atvejai, kai įtaisas yra nežadinamas ir dviejų apvijų.

Kitas platus nagrinėjimo aspektas susijęs su švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų valdymo sistemomis, algoritmais arba valdymo modeliais. Valdymui galios grandinėje naudojami šie keitikliai:

- tiristorinis įtampos keitiklis [1, 2];
- ITM keitiklis, skirtas reguliuoti dažniui ir įtampai [61, 71-74, 84, 97, 109, 110, 112-114];
- simistorių panaudojimas įtampai keisti [59, 67].

Taigi, keitiklių panaudojimas šių įrenginių valdymui nėra platus. Disertacijoje nagrinėjamas dvipusis (dviejų apvijų) ŠJMĮ, kurio kiekvienos apvijos maitinimo įtampą galima valdyti panaudojant tiristorius, kuriems nėra būtina išjungimo grandinė. Tokios dvipusės sistemos tyrimų, išskyrus [1], paskelbta nedaug.

Įtaisų valdymo sistemos dažniausiai yra skirtos valdyti švytavimų poslinkio, greičio amplitudes arba su šiais kintamaisiais susijusius technologinius parametrus – slėgį, našumą, temperatūrą. Kuriamos ir tiriamos švytavimų dažnio ir elektromagnetinės jėgos dydžio valdymo sistemų struktūros.

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso matematinių modelių įvairovė nėra labai plati – ji susideda iš dviejų pagrindinių dalių:

a) mechaninės posistemės (dažniausiai vienmasės, dvimasės sistemos atvejais analizuojamas retai [66, 72, 92, 94]) diferencialinės lygties, sudarytos pagal antrąjį Niutono dėsnį. Šioje lygtyje įvertinama įtaiso JD masė, slopinimo koeficientas, sistemos standis tarp JD ir nejudamo statoriaus [1, 3-14, 16, 89, 108, 115]. Taip pat, poveikiui aprašyti, vietoje ekvivalentinio standžio, kuris įvertina slėgio poveikius JD, naudojamas visas indikatorinės diagramos ciklas [1, 61, 72, 92]. Kai kuriuose mechaninės posistemės modeliuose yra įvertinama JD tamprios atatrakos įtaka „statoriui“ [66, 94, 116].

b) pagal II Kirchhofo dėsnį sudarytos elektrinės grandinės diferencialinės lygtys [1, 3, 4, 8-13, 16, 61, 89, 94, 108] arba lygčių sistemos [1, 7, 11, 115], kuriose įvertinta apvijų aktyvioji varža [1, 3, 4, 8-13, 16, 61, 67, 89, 94, 109], magnetinius nuostolius atitinkanti aktyvioji varža [1, 3, 4, 67, 72, 108, 109], induktyvumas [61, 67, 89, 94, 108, 109] ir jo kaita [1, 3, 4, 8-13, 61]. Taip pat pateikiamos elektros grandinės vidinės įtampos konstantų priklausomybės nuo srovės ir švytavimų poslinkio [61, 67, 94]. Darbuose, kuriuose matematiniai modeliai susiję su magnetinės grandinės analize, magnetinės grandinės parametrų nustatymui ir optimizavimui, naudojamas baigtinių elementų metodas (baigtinių elementų programose naudojama Maksvelo lygčių sistema).

Daugumoje darbų, išskyrus [1, 2, 3, 4, 8], analizuojamos pirmosios švytavimų poslinkio ir srovės harmonikos, o aukštesniųjų harmonikų ir nuolatinės srovės dedamosios įtaka, kuri gali atsirasti dėl bespyruoklio dvipusio švytuojamojo judesio įtaiso nesimetriško darbo, nėra plačiai išnagrinėta. Harmonikų analizės tyrimai [1, 3, 8], dažniausiai susiję su vienpusiu švytuojamojo judesio įtaisu, tuo tarpu dvipusio įtaiso harmonikų analizė nėra plačiau išnagrinėta. Įtaiso vienos pusės darbo ir harmonikų tyrimai nesuteikia pilnos informacijos apie viso įtaiso darbo ypatumus.

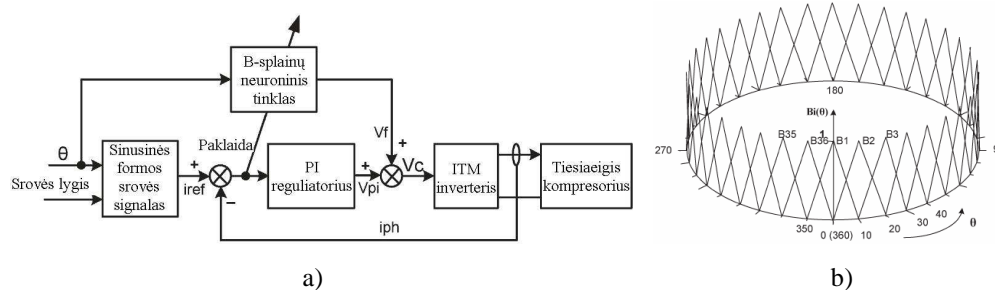
ŠJMĮ valdymo metodų ir sistemų tyrimus galima suskirstyti į šias grupes:

- valdymo objekto (valdomo kintamojo) pasirinkimas;
- valdymo metodo pasirinkimas ir įgyvendinimas;

- struktūrinių schemų sudarymas valdymo sistemai;
- valdymo sistemos modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai.

Išanalizavus atliktus tyrimus, pastebėta, kad pagrindinis valdymo objektas yra ŠJMĮ švytavimų poslinkis arba jo amplitudė. Valdymo objektas yra aiškus, kai švytavimų poslinkis ar jo amplitudė yra valdomi tiesiogiai juos matuojant. Esant netiesioginiam švytavimų poslinkio matavimui, valdymo sistemoje valdymo objektais tampa: rezonansinis dažnis [71, 83, 84, 117], švytuojamojo judesio įtaiso srovė [8, 16, 59, 61, 97, 109, 112, 114, 116], švytavimų greitis [115] arba elektromagnetinė jėga [115]. Dar kitais atvejais, valdymo objektu tampa technologiniai parametrai (našumas [59], temperatūra [72]). Toks platus valdymo objektų pasirinkimas yra sąlygotas tuo, kad švytavimų poslinkio amplitudės dydį galima nustatyti analizuojant ne vieną, o kelis įtaiso kintamuosius. Minėtuose moksliniuose darbuose, netiesioginiu būdu nustatyta švytavimų poslinkio amplitudė valdoma siekiant šių pagrindinių tikslų – įtaisą valdyti taip, kad jis dirbtų rezonanso sąlygomis ir dažniausiai tam naudoti srovės kintamąjį. Gali būti panaudoti tokie valdymo principai:

- Švytavimų poslinkio amplitudės valdymas atliekamas, panaudojant kintamosios (dažniausiai sinusinės) srovės užduoties signalo palyginimą su grįžtamojo ryšio akimirkiniu signalu. Tokios sistemos struktūrinė schema ir neuroninių tinklų apsimokymo bazinė funkcija pateikta 1.10 paveiksle. Sistemoje B splainų neuroninių tinklų apsimokanti grandis yra skirta triukšmų ir trikdžių valdymui, o PI reguliatorius – pereinamųjų vyksmų reguliavimui. Pagal sistemos reakciją, panaudojant B splainus ir neuroninius tinklus vykdomas sistemos apsimokymas [61, 112], siekiant kompensuoti PI reguliatoriaus išėjimo signalo paklaidą. Valdymo sistemoje naudojamas PI tipo reguliatorius, srovės reguliavimo kontūrai valdyti, kaip kombinuotojo valdymo sistemos dalis.



1.10 pav. Švytavimų poslinkio amplitudės valdymo sistema (a) ir B splainų neuroninių tinklų apsimokymo bazinė funkcija (b) [61]

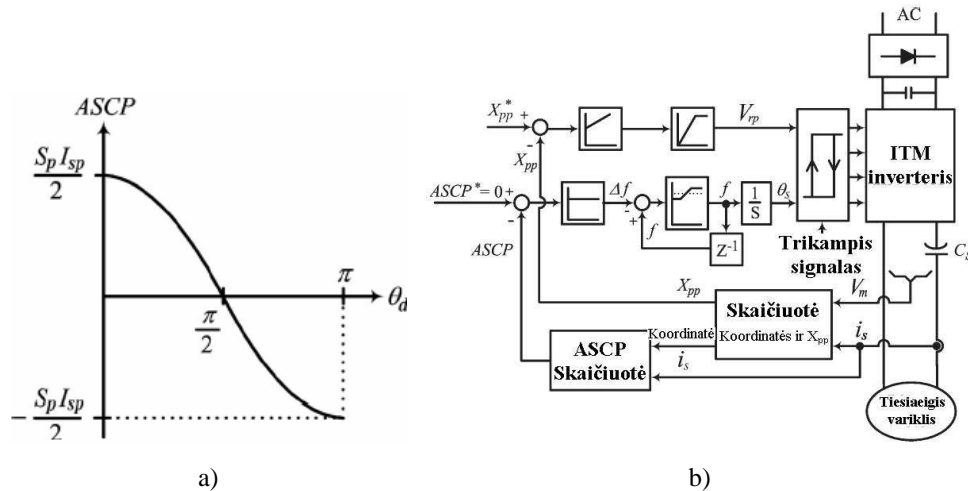
Sistemos įėjimo signalai – tai sinusinė užduoties srovė ir jos fazės kampas, kuris skirtas sistemos rezonansinio darbo sekimui. Šią funkciją atlieka B splainų neuroninių tinklų apsimokanti grandis. Panaši valdymo sistema pateikta ir darbe [16], tik valdymas skirtas vienmasiams reaktyviesiems švytuojamojo judesio varikliams su viena apvija. Srovės užduoties signalas įrašomas į mikrovaldiklį, nevertinant srovės fazės švytavimų poslinkio atžvilgiu (1.11 pav.).

- Taip pat galimas valdymo būdas pagal (1.1) išraišką, nustatant švytavimų poslinkį ir lyginant gautą signalą su užduotuoju. Sistemos valdymas vykdomas, įvertinant poslinkio koregavimą ties didžiausia švytavimų amplitude. Tai paprasta, vieno grįžtamojo ryšio valdymo sistema. Minėtu atveju nėra aptariamas reguliatorių panaudojimas, tačiau pereinamųjų vyksmų kokybei pagerinti, sistemoje galėtų būti panaudotas PI tipo reguliatorius [67].

- Mokslininkų pasiūlytas dar vienas valdymo principas ASCP („Average value of Stroke-Current Product“) – vidutinių verčių srovės ir švytavimų poslinkio amplitudžių sandaugos metodas. Metodo esmė – dviejų sinusinių dydžių sandauga [109]:

$$ASCP = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} X_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t + \theta_d) d(\omega t) = \frac{X_m I_m}{2} \cos(\theta_d). \quad (1.10)$$

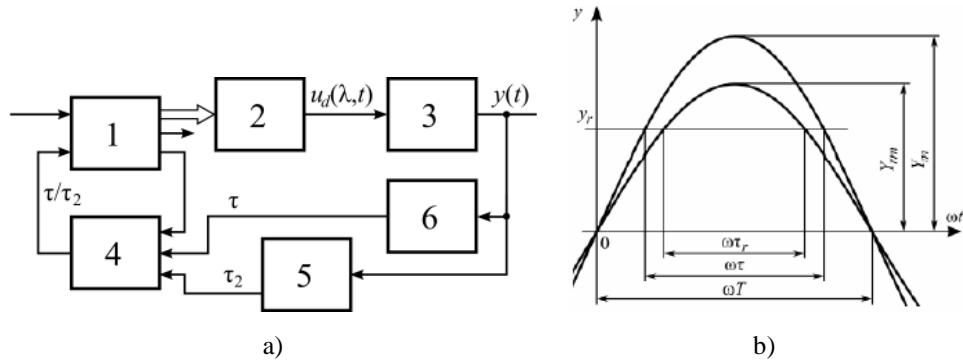
Valdymo sistema siekia, kad ši sandauga būtų lygi nuliui, ir kampas θ_d tarp srovės ir poslinkio būtų 90° . Tuomet sistema dirbtų rezonanso sąlygomis. Poslinkį šiame metode siūloma nustatyti netiesioginiu būdu, panaudojant (1.1) išraišką. Pasiūlyto metodo struktūrinė-funkcinė schema ir ASCP charakteristikos priklausomybė nuo kampo pateikta 1.13 paveiksle.



1.13 pav. ASCP metodo charakteristika (a) ir ASCP pritaikymo struktūrinė-funkcinė schema poslinkio amplitudės valdymui (b) [109]

- Poslinkio amplitudės valdymo metodas [10], kuriame realiu laiku yra sekamas švytavimų poslinkis diskrečiais laiko momentais ir formuojamas impulsas, kurio trukmė – proporcinga švytavimų poslinkio amplitudės pokyčiui. Šiam valdymui naudojamas poslinkio padėties jutiklis, o valdymo struktūra ir grafinė valdymo metodo esmė pateikti (1.14 pav.). Šis metodas turi trūkumą, susijusį su poslinkio matavimu, kuris atliekamas ant vibruojančio paviršiaus. Dėl minėtos priežasties, formuojamas laiko impulsas turi paklaidą, susijusią su triukšmo atsiradimu poslinkio matavimo elektrinėje grandinėje. Paklaida atsirandanti dėl

triukšmų, esant mažoms švytavimų poslinkio amplitudėms, gali būti didelė, tačiau ją galima būtų sumažinti panaudojant specialius filtrus.



1.14 pav. Poslinkio amplitudės valdymo metodas realiu laiku, paverčiant poslinkio signalą laiko trukmės signalu [10]: a) 1 – mikrovaldiklis su valdymo algoritmu, 2 – valdomas maitinimo šaltinis, 3 – švytuojamojo judesio mechatroninis įtaisas (vykdiklis), 4 – grįžtamojo ryšio signalų keitiklis, 5,6 – švytavimų poslinkio signalų jutikliai ir keitikliai; b) valdymo esmė grafiškai

Laiko trukmės priklausomybių nuo poslinkio ir laiko paklaidos lygčių sistema:

$$\begin{cases} \tau = \frac{1}{\omega} \left(\pi - 2 \arcsin \frac{y_r}{Y_m} \right), \\ \tau_r = \frac{1}{\omega} \left(\pi - 2 \arcsin \frac{y_r}{Y_{rm}} \right), \\ \varepsilon = \tau_r - \tau. \end{cases} \quad (1.11)$$

Darbe pateiktas ir realizuotas valdymo algoritmas. Valdymo pagrindas – mažinti signalo paklaidą ε , kuri savo ruožtu mažina ir poslinkio signalo paklaidą.

Elektros mašinų diagnostikos tyrimai. Elektros mašinų diagnostikos tyrimai daugumoje atvejų yra susiję su sukiosiomis elektros mašinomis ir įtaisais. Rotorinių elektros mašinų gedimai nustatomi:

1. Matuojant korpuso arba guoliaviečių vibracijų greičio vidutinę vertę ir palyginant su standartuose nustatytais vertėmis. Šiuo metodu yra nustatoma ar yra padidėjęs virpesių lygis, tačiau gedimo priežastis nustatyti šiuo metodu yra sudėtinga [119-122].

2. Matuojant korpuso arba guoliaviečių pagreičių ir greičių momentines vertes, atliekama gautų duomenų spektrinė analizė panaudojant greitąją Furjė transformaciją (GFT). Šis metodas yra universalesnis, nes suteikia informaciją ne tik apie gedimo egzistavimą, bet ir jo šaltinį. Gedimo pobūdį (tepalų trūkumą guoliuose, disbalansą, guolių ir guoliaviečių gedimus, krumplių gedimus – esant perdavai ir kt.) apsprendžia gedimo šaltinio vieta [119-122].

3. Matuojant besisukančio veleno poslinkius dviašėje koordinacių sistemoje, kuri yra statmena sukimosi ašiai. Šiuo atveju dažniausiai naudojami du poslinkio jutikliai, kurie montuojami statmenai vienas kitam. Matavimo rezultatas – veleno ašies orbita, kuri parodo ar sukioji mašina dirba be gedimų. Be gedimų dirbančios mašinos orbita yra taisyklingos formos. Priklausomai nuo darbo sąlygų, esant nukrypimams nuo šios formos, nustatomas gedimo šaltinis ir galimas gedimas (disbalansas, ekscentricitetas, veleno įlinkiai, veleno trūkiai) [119-122].

4. Temperatūrinis diagnostikos metodas – atliekamas panaudojant temperatūrinius jutiklius dažniausiai gendančiose mašinų dalyse [121] arba termoviziją [123]. Apie gedimo šaltinį sprendžiama iš padidėjusios temperatūros tiriamajame mašinos mazge.

5. Akustinis gedimų diagnostikos metodas – matuojamas aplinkos triukšmo lygis arba atliekama triukšmo lygio spektrinė analizė. Pagal padidėjusį garso lygį arba išryškėjusią harmoniką sprendžiama apie galimą gedimą. Šis metodas labai netikslus, nes priklauso nuo aplinkos triukšmo lygio ir išorinių triukšmo šaltinių [125]. Akustinio metodo tyrimų paskutiniaisiais metais yra sumažėję, dėl atsiradusių tikslesnių ir greitesnių elektros mašinų gedimų diagnostikos metodų.

6. Norint atlikti išsamesnę gedimų analizę, taip pat neretai naudojamos prieš tai išvardintų metodų kombinacijos [121, 122].

7. Naudojamas metodas, kuris skirtas netiesioginei mechaninių gedimų diagnostikai, analizuojant elektros mašinos srovę, ir tuo remiantis sprendžiama apie mašinos ar įrenginio būklę. Šis metodas vadinamas variklio srovės požymių analize (VSPA, angl. MSCA – motor current signature analysis). Metodas pagrįstas srovės spektro analize, ko pasekoje, pagal indikacijas, nustatomas elektros mašinos gedimų šaltinis. Šio metodo išsami analizė pateikta įvairių mokslininkų darbuose. Metodui įgyvendinti naudojami keletas signalų informacijos apdorojimo metodų:

- o greitoji Furjė transformacija (GFT), panaudojama šiems gedimams nustatyti – rotoriaus apvijos trūkis [127], ekscentricitetas [128], reduktoriaus gedimas [129], guolių gedimas [129], užtrumpintos apvijos gedimas [130];

- o trumpojo laiko Furjė transformacija (STFT) [127] – rotoriaus apvijos trūkis;

- o Vignerio pasiskirstymas (Wigner distribution) [131] – guolių gedimas;

- o Geiboro transformacija (Gabor transform) [132] – užtrumpintos apvijos gedimas;

- o Wavelet transformacija (Wavelet transform) – rotoriaus apvijos trūkis, užtrumpintos apvijos gedimas [126, 130]. Paskutiniu metu, atliekant įrenginių diagnostiką, šis metodas yra labai paplitęs, nes tinka nestacionarių signalų analizei (kintant įrenginio apkrovai, esant dažniems pereinamiesiems vyksmams);

- o Parko vektorius (Park's vector) [133] – užtrumpintos apvijos ir guolių gedimas;

- o Hilberto transformacija (Hilbert transformation) ir „Laiško“ analizė (Envelope analysis) – guolių gedimai: Brinelio efektas, guolio taškinis gedimas [118].

Visi paminėti diagnostikos metodai taikomi nuolatinės ir kintamosios srovės rotorinių elektros mašinų diagnostikai, tačiau šiuos metodus būtų galima sėkmingai

taikyti ir švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų gedimams nustatyti. Gedimų nustatymo metodai, susiję su įrenginio srovės analize, turi bendrą bruožą – tai srovės signalo spektrinės analizės atlikimas ir vertinimas. Pagrindinis šių metodų skirtumas – spektrinės analizės atlikimo metodas (GFT, STFT ir kt.), nuo kurio priklauso gedimo nustatymo tikslumas. Šiuo metu stacionariems ir nestacionariems signalams plačiai taikomas Wavelet metodas, tačiau plačiausiai išnagrinėtas GFT metodas.

Mokslinių darbų, kurie būtų susiję su švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų diagnostika (panaudojant vibracijų, temperatūrinę, srovės arba įtampos informaciją gedimų nustatymui ir prevencijai), aptikta labai mažai [116]. Darbe pateikiamas siūlymas, kaip išvengti švytuojamojo judesio įtaisų JD „daužymosi“ į „statorių“, analizuojant virtualaus pagreičio matuoklio signalą, kurį galima apskaičiuoti remiantis išraiška:

$$a(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \frac{du(t)}{dt} - R_{ekv} \frac{di(t)}{dt} - L_{ekv} \frac{d^2 i(t)}{dt^2} . \quad (1.12)$$

Kadangi gautasis signalas aplenkia poslinkį 180°, tai šį signalą galima panaudoti apsaugai nuo „daužymosi“. Darbe nepateikiamas konkretaus algoritmo įgyvendinamas, tačiau pateikiami rezultatai, kurie parodo metodo veiksmingumą, tyrinėjamos problemos atveju.

ŠJMĮ gedimų aibės ir jų indikacijų nustatymas, panaudojant įtaiso srovės parametrų informaciją (naudojant ne tik srovės spektro informaciją, bet ir srovės iškraipymo, amplitudės koeficientus, THD, fazių kitimą ir kt.), yra aktuali ir neišnagrinėta problema.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados

Specialūs ir švytuojamojo judesio mechatroniniai įtaisai dažniausiai siejami su tiesiaiegiu švytuojamuoju judesiu. Plačiausia švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų pritaikymo sritis yra stūmokliniai kompresoriai.

1. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, kad pasaulyje paplitę žadinamųjų švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų, kurių judžiojoje dalyje yra sumontuoti nuolatiniai magnetai, tyrimai. Dažna magnetų išdėstymo schema – Halbacho seka, kuri pasiteisina žadinamųjų švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų konstrukcijose. Daugumos mechatroninių įtaisų „statoriaus“ dalyje montuojama viena arba dvi apvijos (dažniau viena). Nežadinamieji vienpusiai švytuojamojo judesio mechatroniniai įtaisai plačiau ištyrinėti Lietuvoje, tačiau tyrimų, kai įvertinama dvimasis bespyruoklė sistema ir abipusė įtaiso veika, yra nedaug.

2. Apžvelgus tyrimus nustatyta, kad dažniausiai naudojamas ITM elektros energijos keitiklis ŠJMĮ dažnio keitimui, tačiau metodai pritaikomi tik vienapvijams žadinamiesiems įtaisams. Tiristorinis valdymas dvipusiam švytuojamojo judesio mechatroniniam nežadinamajam įtaiso atvejui nėra plačiai aptariamasi, o tai būtų aktualu, norint valdyti tokį dvipusį įtaisą.

3. Mokslininkų tyrimuose analizuojamas tiesioginis ir netiesioginis švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo būdai. Paskutiniųjų metų mokslininkų tyrimų

tendencijos krypsta į netiesioginį šio kintamojo nustatymo būdą. Pateikti švytavimų poslinkio ar jos amplitudės nustatymo algoritmai yra gana universalūs, tačiau nagrinėjant dvipusį bespyruoklį švytuojamojo judesio įtaisą aktualu stebėti ne tik švytavimų amplitudę, bet ir švytavimų centro poslinkį, kuris gali atsirasti dėl nenormalių ŠJMĮ darbo sąlygų. Visuose išnagrinėtuose netiesioginio švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo metoduose, šis klausimas beveik nepalietas.

4. Daugumoje darbų pabrėžiamas rezonansinis mechaninės sistemos darbas ir apsiribojama vienmasės sistemos rezonansinio dažnio nustatymu, o tai sudaro prielaidas paklaidų atsiradimui, kai nevertinama „statoriaus“ parametrų įtaka sistemos rezonansiniam dažniui. Aktualu nustatyti, kokiomis sąlygomis, esant pastoviam dažniui, ŠJMĮ gali dirbti geriausiu režimu. Daugumoje darbų, skirtų ŠJMĮ valdymui, įtaiso rezonansinį dažnį apskaičiuoja plačiose ribose – nuo 1 iki 60 Hz, nors maitinančiosios įtampos dažnis yra pastovus (50 Hz). Darbo režimas, esant įvairiems dažniams, galima įgyvendinti panaudojant dažnio keitiklį, tačiau įtaiso darbas žemu rezonansiniu dažniu yra neefektyvus. Žemo rezonansinio dažnio įtaiso matmenys didesni. Įtaiso mechaninių parametrų nustatymas tinklo dažniui yra būtinas uždavinys.

5. ŠJMĮ srovės harmonikų arba bendrosios srovės informacijos panaudojimas gedimų nustatymui nėra plačiai išnagrinėtas. Gedimų diagnostikos metodai kuriami sukiosioms elektros mašinoms ir įtaisams, tačiau specialiosios paskirties švytuojamojo judesio įtaisams nėra pritaikomi. Gedimai, galintys pasitaikyti esant dvipusiu bespyruokliui ŠJMĮ – tai švytavimų centro poslinkis dėl elektrinės grandies gedimo (tiristorių valdymo kampų nevienodas atidarymas, vožtuvų gedimai, elektrinės dalies apvijų gedimai), taip pat tepimo sutrikimai, įtaiso „daužymasis“ į „statorių“. Šie gedimai galėtų būti nustatyti panaudojant bendrosios srovės informaciją. Kai kurie gedimai yra neaktualūs, kai sistema turi centrą stabilizuojančias spyruokles, tačiau tai yra papildoma nepageidautina reaktyvioji apkrova, kuri dvipusio įtaiso atveju nenaudotina. Šių įtaisų gedimų nustatymui būtų perspektyvus MCSA ir kitų srovės signalo parametrų apdoravimo metodas.

6. Atliekant matematinių modelių apžvalgą, buvo nustatyta, kad dauguma autorių naudoja tas pačias įtaisų mechaninės ir elektrinės dalies lygčių sistemas. Sistemos aprašymui naudojami antrieji Niutono ir Kirchhofo dėsniai, tačiau pilnas dvimasio dvipusio bespyruoklio švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso matematinis modelis, kuriame būtų įvertinamas induktyvumo kitimas, tiristorinis valdymas, nuostolių įvertinimas tiek apvijose, tiek ir magnetolaidyje, dvimase ištiesinta sistema, nenagrinėtas.

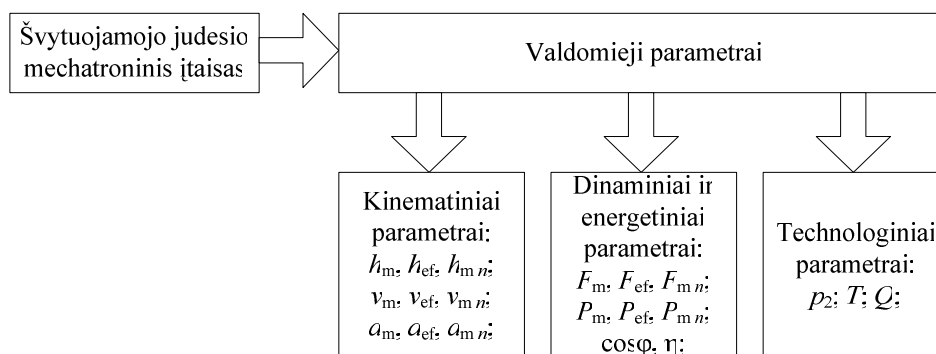
2. DVIMASIO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO SISTEMOS ANALITINIS TYRIMAS SPEKTRINIŲ ASPEKTU

Mokslinių darbų apžvalgos rezultatų pagrindu galima teigti, kad švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų tyrimų tematika yra plati ir leidžia suformuoti tyrimo objektą ir papildyti esamų tyrimų rezultatų spektrą. ŠJMĮ tyrimo objektas ir kryptys:

- Švytuojamojo judesio mechatroninis įtaisas – tai valdomas dvipusės veikos dvimasis bespyruoklis tiesiaiegis simetrinis nežadinamasis pulsuojamosios srovės elektros variklis, dirbantis kompresoriaus arba kitokio tiesiaiegio mechanizmo pavaroje [1, 3, 4]. Įtaiso pasirinkimas nulemtas šių priežasčių: šie įtaisai dažniausiai naudojami tiesiaiegių stūmoklinių kompresorių pavarose; dvimasis sistemos ypatumai dirbant kompresoriaus pavaroje nėra plačiai išanalizuoti; dvipusis įrenginys gali būti bespyruoklis; nežadinamųjų dvipusių elektros variklių tyrimai menkiausiai išplėtoti. Taip pat autoriaus [1] teigimu, tokių tipų variklių savitoji galia ir naudingumo faktorius – aukšti, galios faktorius, valdymo galimybės ir gamybos kaina – vidutiniai, inertiškumas – žemas.

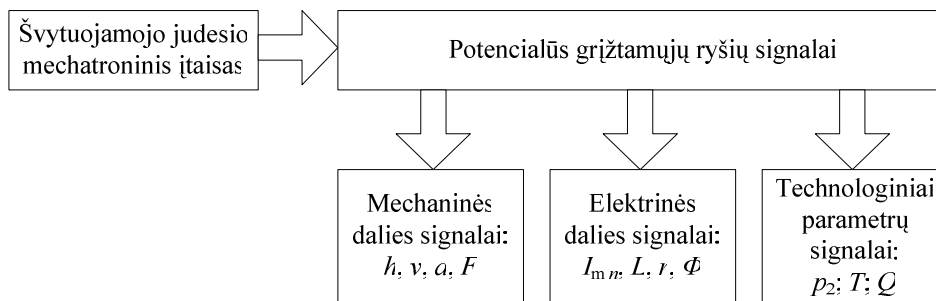
- Įtaisu skirtas elektros energijos keitiklis – tiristorinis įtampos keitiklis. Tokį pasirinkimą lėmė elementari schema, tiristorių savaiminis užsidarymas periodo metu, pilnas tiristorių valdomumas, net esant induktyviajai apkrovai (ši trūkumą turi simistorius). Lyginant su dažnio keitikliu – įtampos keitiklis paprastesnis. Dvipusio valdomo įtaiso problematika, panaudojant tiristorius, nėra plačiai išnagrinėta (aptarti vienpusių arba žadinamųjų ŠJMĮ su ITM [1, 3, 4]).

- Pagrindinis įtaiso valdomas kintamasis – reliatyviųjų švytavimų poslinkis arba jo amplitudė (darbe žodis „reliatyviųjų“ praleistas, jei nenurodyta kitaip). Valdant šį kintamąjį keičiami technologiniai sistemos parametrai – šiuo atveju našumas. Kiti galimi valdomieji dydžiai pateikti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Valdymo parametrai

- ŠJMĮ pagrindinio valdomo kintamojo – švytavimų poslinkio amplitudės, nustatymo metodas pasirinktas netiesioginis, dėl šio metodo privalumų, mokslinio aktualumo ir galimybės pritaikyti nežadinamiesiems įtaisams. Įtaiso švytavimų poslinkio amplitudė nustatoma panaudojant bendrosios srovės informaciją – tiek jos harmonikų parametrų (amplitudžių, fazių), tiek ir efektyvių verčių. Kiti potencialūs grįžtamųjų ryšių signalai pateikti 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Grįžtamųjų ryšių signalai

- ŠJMĮ apibendrintojo matematinio modelio sudarymas, įvertinant apvijų ir abipusį induktyvumą, jų kaitą, nuostolius apvijose ir magnetolaidyje, tiristorinį įtampos keitiklį ir dvimase bespyruoklę sistemą. Įtaiso posistemų struktūrų sudarymas.

- Sistemos kintamųjų sąryšių analitinių priklausomybių sudarymas ir rezonansinio darbo sąlygų nustatymas, esant dvimasei sistemai.

- Įtaiso švytavimų poslinkio amplitudės, nustatytos netiesioginiu metodu, valdymo sistemos ir algoritmo sudarymas.

- Įtaiso bendrosios srovės harmonikų informacijos panaudojimas įtaiso gedimų nustatymui, sudaryti galimų gedimų ir jų indikacijų (indikacijos – srovė ir jos harmonikų parametrai) aibę.

Taigi, nagrinėtinų temų, susijusių su nežadinamaisiais švytuojamojo judesio įtaisais gausa, yra didelė. Šios temos nagrinėjamos darbe.

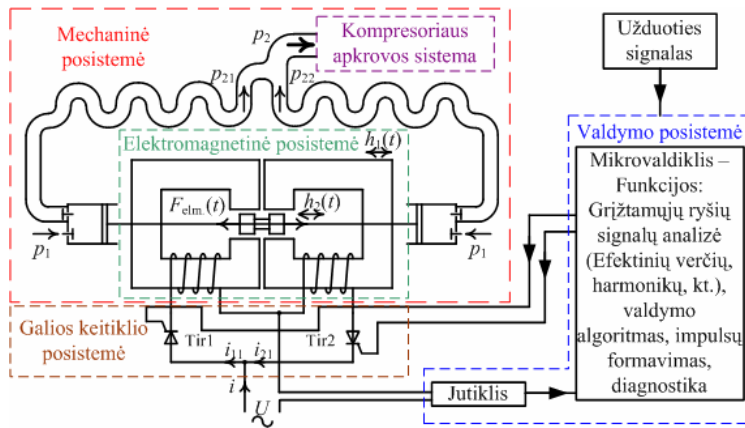
2.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendros sistemos analizė

Pasirinktasis švytuojamojo judesio mechatroninis įtaisas, kuris aprašytas aukščiau, yra tik vienas iš šių įtaisų įgyvendinimo pavyzdžių, tačiau geriausiai atspindi tokių įtaisų panaudojimą. Taip pat švytuojamojo judesio gali būti ir sukamojo judesio elektros varikliai arba generatoriai [1, 6]. ŠJMĮ galima suskirstyti į keturias pagrindines posistemas (2.3 pav.):

- mechaninę;
- elektromagnetinę;
- galios keitiklio;
- valdymo.

Šis suskirstymas į posistemas yra sąlyginis, ypač kai mechaninė ir elektromagnetinė posistemės tokiuose įtaisuose yra tarpiai susijusios, tačiau tai leidžia įtaisą struktūrizuoti. Kiekviena posistemė turi savo struktūrą ir funkcijas.

Mechaninės posistemės struktūra ir funkcijos. Mechaninę posistemę sudaro dvi tarpiai susijusios pagrindinės dalys – variklis ir darbo mechanizmas. Mechaninė posistemė susideda iš JD ir „statoriaus“. Pagalbinės dalys, tokios kaip „statoriaus“ pakaba (spyruoklės arba standūs slopintuvai), taip pat yra mechanizmo sudėtinės dalys, kurių įvairovė priklauso nuo mechanizmo tipo (kompresoriaus atveju – tai į „statoriaus“ sudėtį įeinančios kameros, vožtuvai ir kita; automobilio elektrinio vožtuvo atžvilgiu – sudėtingesnė judžioji dalis kartu su vožtuvo galvute).



2.3 pav. Nagrinėjamojo valdomo ŠJMĮ struktūrinė-blokinė schema su posistemėmis

Pagrindinė mechaninės posistemės funkcija – atlikti naudingą darbą, reikalingą pagal technologinio proceso reikalavimus ar užduotus rodiklius. Antrinė funkcija – elektromagnetinę jėgą panaudoti judžiosios dalies švytuojamajam judesiui atlikti.

Mechaninė posistemė yra parametrų (švytavimų poslinkis, greitis, pagreitis, jėga, technologiniai kintamieji – našumas, slėgis, temperatūra ir kiti, 2.1 pav.), skirtų valdymo sistemai, informacinis šaltinis.

Elektromagnetinės posistemės struktūra ir funkcijos. Elektromagnetinei posistemei priklauso viena ar daugiau apvijų su magnetolaidžiais „statoriuje“ ir įtaiso JD sumontuotos magnetolaidžio dalys. Apvijų išdėstymas priklauso nuo įtaiso konstrukcijos ypatumų. Dažniausiai naudojami du apvijų išdėstymo būdai – tarpusavyje statmenai (tuomet gaunamas nykstamai mažas abipusis induktyvumas) arba tarpusavyje lygiagrečiai (šiuo atveju savitarpio induktyvumas turi būti įvertinamas). Tiriamasis įtaisas turi dvi statmenai viena kitai išdėstytas apvijas ir magnetolaidžius judžiojoje dalyje.

Elektromagnetinės posistemės pagrindinė funkcija – elektros energijos šaltinio energiją paversti mechanine ir atlikti naudingą darbą. Antrinė funkcija – magnetinio srauto ir induktyvumo kaita.

Galios keitiklio posistemės struktūra ir funkcijos. Šiai posistemei priklauso valdomas tiristorinis įtampos keitiklis (po vieną tiristorių kiekvienai apvijai). Vietoje darbe nagrinėjamo įtampos tiristorinio keitiklio, gali būti panaudotas tranzistorinis įtampos keitiklis arba dažnio keitiklis.

Elektros energijos keitiklio posistemės funkcijos – efektyviausiu būdu keisti tinklo elektros energijos kiekį ir jos parametrus, reikalingus technologiniam procesui. Taip pat ši posistemė yra kintamųjų (įtampos, srovės, dažnio ar kitų), skirtų valdymo sistemai, informacinis šaltinis.

Valdymo posistemės struktūra ir funkcijos. Valdymo posistemę sudaro grįžtamųjų ryšių (2.2 pav.) signalų jutikliai, mikroprocesorinis valdymo įtaisas su informacine valdymo sistemos dalimi. Sistemos grįžtamasis ryšys realizuojamas panaudojant vienintelį srovės jutiklį, kurio signalo naudinga informacija panaudojama įtaiso švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui ir valdymui. Įprastai šiam tikslui naudojamas padėties, o ne srovės jutiklis.

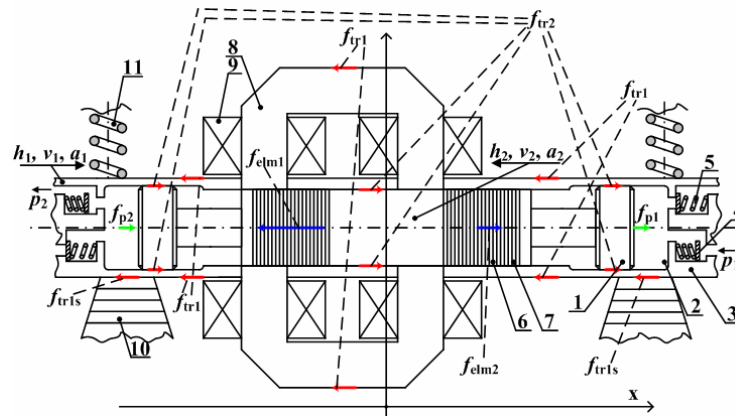
Valdymo posistemės struktūroje esantis srovės grįžtamasis ryšys gali būti realizuotas srovės transformatoriumi arba šuntu su galvaniniu atskyrimu (darbe naudojamas būdas). Srovės transformatoriaus panaudojimas turi keletą privalumų lyginant su šunto realizacija – egzistuojantis galvaninis atskyrimas, bendrosios srovės nuolatinės dedamosios filtras. Šie privalumai tinka, esant tradicinėms kintamosios srovės elektros mašinų sistemoms, tačiau tiriant ŠJMĮ būtina žinoti tiek srovės nuolatinę dedamąją, tiek ir turėti neiškraipytą grįžtamojo ryšio signalą, kai analizuojamos bendrosios srovės harmonikos.

Valdymo posistemės pagrindinė funkcija – vykdyti valdymo algoritmą, panaudojant grįžtamųjų ryšių ir užduoties signalus, atlikti įtaiso gedimų diagnostiką.

Tolesniuose poskyriuose analizuojamos visos įtaiso posistemės ir jų savybės, reikalingos švytavimų poslinkio amplitudės nustatymui ir įtaiso diagnostikai, panaudojant bendrosios srovės informaciją.

2.1.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso mechaninės posistemės analitinis modelis ir elektromagnetinės jėgos analizė

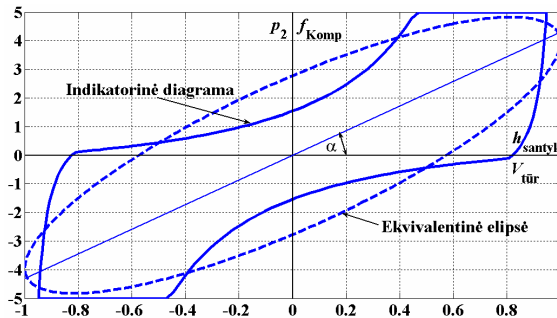
Tiriamąjį įtaisą – variklio-kompresoriaus, konstrukcijos eskizas pateiktas 2.4 paveiksle. Jėgos paveiksle – švytuojamojo judesio variklio apkrova. Tiriamąjį įtaisą mechaninės posistemės apkrovą galima suskaidyti į dvi pagrindines dedamąsias – aktyvią ir reaktyvią [1, 3, 4, 13, 70, 108]. Apkrovos aktyvioji dedamoji apibūdina energijos virsmą iš, šiuo atveju, elektromagnetinės energijos į naudingą darbą ir šiluminę energiją. Reaktyviosios dedamosios atspindi sistemos inerciją ir potencines mechaninės posistemės savybes.



2.4 pav. ŠJMĮ bendras eskizas: 1 – stūmoklis; 2 – slėgio kamera; 3 – „statoriaus“ korpusas; 4 – vožtuvai (sąlyginis žymėjimas); 5 – vožtuvų spyruoklės; 6, 7 – JD magnetolaidis; 8 – „statoriaus“ magnetolaidis; 9 – „statoriaus“ apvijos; 10 – standus įtaiso tvirtinimas – slopintuvai (I variantas); 11 – įtaiso nestandaus tvirtinimo spyruoklės (II variantas); p_1 – išsiurbimo (atmosferos) slėgis; p_2 – suspausto oro slėgis; f_{p1} ir f_{p2} – JD veikiančios slėgio jėgos; f_{elm1} ir f_{elm2} – JD veikiančios elektromagnetinės jėgos; f_{tr1} – trinties jėgos, veikiančios tarp „statoriaus“ ir aplinkos; f_{tr1s} – trinties jėgos, veikiančios tarp „statoriaus“ ir slopintuvų – sausoji trintis; f_{tr2} – trinties jėgos, veikiančios tarp „statoriaus“ ir JD; h_1, v_1, a_1 – „statoriaus“ švytavimų poslinkis, greitis ir pagreitis nejudžios koordinačių ašies x atžvilgiu; h_2, v_2, a_2 – JD švytavimų poslinkis, greitis ir pagreitis nejudžios koordinačių ašies x atžvilgiu

Kompresoriaus darbą apibūdina indikatorinė diagrama (2.5 pav.). Kompresoriaus dalies matematinio modelio sudarymui priimamos prielaidos:

- kompresoriaus indikatorinė diagrama $p_2 = f(V_{tūr})$ arba $f_{komp} = f(h_{santyk})$ [1, 4] yra supaprastinta – schematizuota (2.5 pav., ištisinė linija, h_{santyk} – santykinis reliatyviųjų JD švytavimų poslinkis, f_{komp} – kompresoriaus ekvivalentinė slėgio jėga);
- kompresoriaus vožtuvai užsidaro ir atsidaro akimirksniu be tamprių smūgių;
- oro suspaudimas ir išsiplėtimas vyksta pagal politropės procesą; politropės laipsnis vykstant šiems procesams lieka pastovus;
- įsiurbiamo oro slėgis lygus atmosferiniam, o temperatūra lygi 293 K;
- suspaudimo ir įsiurbimo slėgiai yra pastovūs;
- kompresorius turi nesuspaudžiamą tūrį suspausto oro išpūtimo pabaigoje;
- kompresorius bespyruoklis;
- trinties jėga priklauso nuo kompresoriaus judžiosios dalies judėjimo, „statoriaus“ atžvilgiu, greičio;
- kompresorius yra sandarus, modeliuojant tiristorinį įtaiso valdymą (našumo valdymas). Atliekant švytavimų centro poslinkio valdymo modeliavimą, priimama, kad kompresorius nesandarus arba jo JD veikia pastovi nuolatinė jėga (sunkio, jei įtaisas dirba vertikaliai).



2.5 pav. Dvipusio kompresoriaus schematizuota indikatorinė diagrama ir jos ištiesinimas ekvivalentine elipse [1]

Supaprastintoji indikatorinė diagrama ištiesinama ekvivalentine elipse (2.5 pav.) [1, 4] pagal pirmąją slėgio švytavimų poslinkio harmoniką. Ekvivalentinė elipsė plotu, kurio dydis apibūdina ekvivalentinę aktyviąją mechaninę varžą R_{komp} ir atliekamą naudingą darbą, atitinka indikatorinės diagramos plotą, o elipsės posvyrio kampas α – ekvivalentinę reaktyviąją mechaninę varžą X_{komp} . Šis įtaiso netiesinės apkrovos ištiesinimas atliekamas, panaudojant šaltiniuose pateikiamas išraiškas [1] (galimi ir kitokie šių koeficientų skaičiavimo metodai [70, 92]):

$$R_{komp} = \frac{S_{vp} \cdot sc_{vp}}{\pi \cdot \omega_1 \cdot H_m}, \quad (2.1)$$

$$X_{komp} = \frac{tg\alpha \cdot sc_p}{\omega_1 \cdot sc_v}. \quad (2.2)$$

Tuomet kompresoriaus ekvivalentinis standis C_{mech2} :

$$C_{\text{mech2}} = \frac{X_{\text{Komp}}}{\omega_1}. \quad (2.3)$$

Kompresoriaus standis yra viena iš potencinės apkrovos dedamųjų, apibūdinanti kompresoriaus kameros suspaudžiamo oro standumą ir, jei yra, gražinančiųjų spyruoklių standumą [1]. Antroji dedamoji apibūdina įtaiso „statoriaus“ pakabos elementų standį, kuris gali kisti plačiose ribose (2.4 pav.). Pakabos standis, esant slopintuvams, yra didelis, o naudojant spyruoklinę pakabą – mažas, ir priklauso nuo spyruoklių tipo. Tolesniuose skaičiavimuose tarp JD ir „statoriaus“ esančios „oro spyruoklės“ apibūdinamos ekvivalentiniu standžiu C_{mech2} , o tarp „statoriaus“ ir pakabos – ekvivalentiniu standžiu C_{mech1} . Šios apkrovos dedamosios yra proporcingos įtaiso dalių švytavimų poslinkiams $h_1(t)$ ir $h_2(t)$:

- analizuojant „statoriaus“ judėjimą:

$$f_{\text{pot1.1}} = (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})h_1(t), \quad (2.4)$$

$$f_{\text{pot1.2}} = C_{\text{mech2}}h_2(t), \quad (2.5)$$

- analizuojant įtaiso JD judėjimą:

$$f_{\text{pot2.1}} = C_{\text{mech2}}(h_2(t) - h_1(t)) = C_{\text{mech2}}h(t). \quad (2.6)$$

Mechaninės posistemės aktyviosios dedamosios yra trinties jėgos – klampioji f_{tr1} arba sausoji f_{tr1s} (Kulono trintis), arba abi kartu veikiančios (žr. 2.4 pav.) [1, 60], ir naudingą darbą apibūdinanti mechaninė aktyvioji varža R_{Komp} . Trinties jėgos yra nepageidautinos, dėl energijos praradimų, mažinančių įtaiso naudingumo faktorių, kuris yra atvirkščiai proporcingas pilnai mechaninei aktyviajai varžai [66, 70, 108]. Šios trintys yra:

a) klampioji trintis pasireiškia kai du tepami paviršiai slysta vienas kitu [1]. Daugumos tiesiaeigių ŠJMĮ įtaisų, tarpusavio slydimo paviršiai yra tepami trintį mažinančiomis priemonėmis (tepalais, antifrikcinėmis skystosiomis medžiagomis [1]). Tiriamuoju atveju, tarp „statoriaus“ ir JD (įtaisas yra tepamas) ir „statoriaus“ ir aplinkos (darbas aušinimo skystyje arba ore darant prielaidą, kad oras yra išretintas skystis) veikia klampiosios trinties jėgos f_{tr2} ir f_{tr1} , kurios proporcingos įtaiso „statoriaus“ ir JD greičiams $v_1(t)$ ir $v_2(t)$:

- analizuojant „statoriaus“ judėjimą:

$$f_{\text{tr1.1}} = (R_{\text{mech1}} + R'_{\text{mech2}})v_1(t), \quad (2.7)$$

$$f_{\text{tr1.2}} = R'_{\text{mech2}}v_2(t), \quad (2.8)$$

- analizuojant įtaiso JD judėjimą:

$$f_{\text{tr2.1}} = R'_{\text{mech2}}(v_2(t) - v_1(t)), \quad (2.9)$$

b) sausoji trintis f_{tr1s} atsiranda dėl blogo tepimo arba dėl nenaudotino paviršių tepimo (medicininė įranga, technologinių procesų apribojimai [1]). Ši trintis taip pat pasireiškia tarp „statoriaus“ ir pakabos slopintuvų (2.4 pav. 10 elementas). Dėl tiriamojo įtaiso paviršių tepimo ir virpesių slopintuvų nenaudojimo, ši trintis nevertinama.

c) naudingoji kompresoriaus aktyvioji mechaninės posistemės jėgos dedamoji išreiškiama:

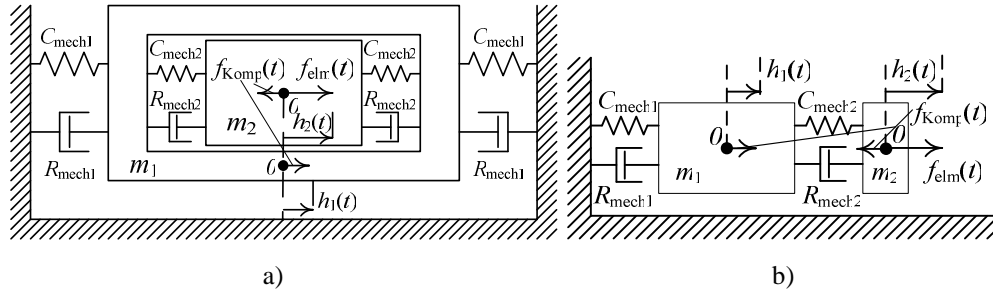
$$f_{Komp} = R_{Komp} (v_2(t) - v_1(t)). \quad (2.10)$$

Įtaiso mechaninės posistemės inercines savybes apibūdina reaktyviosios apkrovos dedamosios, susijusios su įtaiso dalių masėmis. ŠJMĮ dažniausiai kuriami, naudojant dvi [1-16, kt.] arba tris [6, 63, 95] konstrukcines dalis. Dvimasės sistemos gaminamos su „statoriaus“ švytavimų judesio slopinimo elementais [1, 64, 65]. Trimasės sistemos projektuojamos taip, kad trečiosios masės inercijos jėga atsvertų „statorių“ veikiančią inercijos jėgą, ir idealiu atveju panaikintų „statoriaus“ švytavimus. Dėl konstrukcijų sudėtingumo trimasė sistema naudojama ten, kur „statoriaus“ švytavimai yra neleistini [63]. Tiriamojo įtaiso „statoriaus“ ir JD inertinės jėgos f_{in1} ir f_{in2} yra proporcingos įtaiso dalių pagreičiams $a_1(t)$ ir $a_2(t)$:

$$f_{in1} = m_1 a_1(t), \quad (2.11)$$

$$f_{in2} = m_2 a_2(t). \quad (2.12)$$

Remiantis pateiktomis prielaidomis ir paaiškinimais, susijusiais su ŠJMĮ mechaninės posistemės veika, darbo ypatumais, sudaroma detalizuota supaprastinta įtaiso schema (2.6 pav. a), kurioje pateikti visi paminėtieji mechaniniai poveikiai ir įtaiso judžiąją dalį veikianti elektromagnetinė jėga $f_{elm}(t)$. Šią dvimasės sistemos schemą, sujungtą su standžiu pagrindu, galima dar supaprastinti (2.6 pav. b).



2.6 pav. Mechaninės posistemės ekvivalentinės schemas: a) detalizuota, b) supaprastinta

Remiantis supaprastinta ekvivalentine mechanine schema (2.6 pav. b) ir Niutono dėsniais, sudaryta mechaninės posistemės dinamikos lygčių sistema:

$$\begin{cases} f_{in1}(t) + f_{tr1.1}(t) - f_{tr1.2}(t) - f_{komp}(t) + f_{pot1.1}(t) - f_{pot1.2}(t) = 0, \\ f_{in2}(t) + f_{tr2.1}(t) + f_{komp}(t) + f_{pot2.1}(t) = f_{elm}(t). \end{cases} \quad (2.13)$$

Lygčių sistema (2.13) pertvarkoma įvertinant išraiškas (2.4)-(2.12). Pakeistoji dinamikos lygčių sistema (2.13) priklauso nuo kelių kintamųjų – poslinkio, greičio ir pagreičio, tačiau kelių kintamųjų naudojimas matematiniam modelyje yra neracionalus. Įvertinus įtaiso švytavimų greičių $v_1(t)$ ir $v_2(t)$, pagreičių $a_1(t)$ ir $a_2(t)$ priklausomybes nuo įtaiso dalių švytavimų poslinkių $h_1(t)$ ir $h_2(t)$, (2.13) lygčių sistema pakeičiama pirmosios eilės diferencialinių lygčių ekvivalentine sistema, įtaiso JD ir „statoriaus“ švytavimų poslinkių $h_1(t)$ ir $h_2(t)$ atžvilgiu:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1(t)}{dt} = v_1(t), \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = v_2(t), \\ \frac{dv_1(t)}{dt} = -\frac{R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}}{m_1} v_1(t) + \frac{R_{\text{mech2}}}{m_1} v_2(t) - \\ - \frac{C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}}{m_1} h_1(t) + \frac{C_{\text{mech2}}}{m_1} h_2(t), \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{R_{\text{mech2}}}{m_2} v_1(t) - \frac{R_{\text{mech2}}}{m_2} v_2(t) + \frac{C_{\text{mech2}}}{m_2} h_1(t) - \\ - \frac{C_{\text{mech2}}}{m_2} h_2(t) + \frac{f_{\text{elm}}(t)}{m_2}. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

čia $R_{\text{mech2}} = R'_{\text{mech2}} + R_{\text{Komp}}$.

Pertvarkius (2.14) lygčių sistemą ir įvedus mechaninių laiko pastoviųjų pažymėjimus, gaunama:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1(t)}{dt} = v_1(t), \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = v_2(t), \\ \frac{dv_1(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{m1}} v_1(t) + \frac{1}{T_{m2}} v_2(t) - \frac{1}{T_{m3}^2} h_1(t) + \frac{1}{T_{m4}^2} h_2(t), \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m5}} v_1(t) - \frac{1}{T_{m5}} v_2(t) + \frac{1}{T_{m6}^2} h_1(t) - \frac{1}{T_{m6}^2} h_2(t) + \frac{f_{\text{elm}}(t)}{m_2}. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

čia $T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, T_{m4}, T_{m5}, T_{m6}$ – mechaninės posistemės laiko pastoviosios:

$$T_{m1} = \frac{m_1}{R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}}, \quad T_{m2} = \frac{m_1}{R_{\text{mech2}}}, \quad T_{m3} = \sqrt{\frac{m_1}{C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}}}, \quad T_{m4} = \sqrt{\frac{m_1}{C_{\text{mech2}}}},$$

$$T_{m5} = \frac{m_2}{R_{\text{mech2}}}, \quad T_{m6} = \sqrt{\frac{m_2}{C_{\text{mech2}}}}.$$

Diferencialinių lygčių sistemos (2.15) sprendimui naudojama matricinė forma:

$$\frac{d\mathbf{x}_{\text{mech}}}{dt} = \mathbf{A}_{\text{mech}} \mathbf{x}_{\text{mech}} + \mathbf{b}_{\text{mech}}. \quad (2.16)$$

Dydžiai (2.16) yra lygūs:

$$\mathbf{x}_{\text{mech}} = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\text{mech}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_{m3}^2} & \frac{1}{T_{m4}^2} & -\frac{1}{T_{m1}} & \frac{1}{T_{m2}} \\ \frac{1}{T_{m6}^2} & \frac{1}{T_{m6}^2} & \frac{1}{T_{m5}} & -\frac{1}{T_{m5}} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_{\text{mech}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{f_{\text{elm}}(t)}{m_2} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Ši diferencialinių lygčių sistema (2.16) naudojama pereinamųjų vyksmų skaičiavimams, nusistovėjusio režimo analizei, įtaiso pagreičių, greičių ir poslinkių tyrimui, panaudojant harmoninę analizę. Pasinaudojant modeliavimo rezultatais, nusistovėjusiame režime galima apskaičiuoti įtaiso akimirkinę ir efektingą aktyviasias galias, įtaiso (variklio-kompresoriaus) naudingumo faktorių. Atskiras variklio ir kompresoriaus naudingumo faktorių nagrinėjimas turi prasmę kuriant įtaiso dalis ir siekiant didžiausios viso įtaiso naudingumo faktoriaus vertės. Tai aktualu dėl įtaiso integralumo savybių tarp variklio ir mechanizmo.

Mechaninės posistemės dalių – judžiosios dalies ir „statoriaus“ – mechaniniai kintamieji: švytavimų poslinkiai $h_1(t)$ ir $h_2(t)$, greičiai $v_1(t)$ ir $v_2(t)$, pagreičiai $a_1(t)$ ir $a_2(t)$ yra susieti su nejudžia koordinacių sistema ir parodo absoliučiuosius kintamųjų pokyčius. Tiriant įtaiso darbą yra aktualūs reliatyviųjų švytavimų šių kintamųjų pokyčiai, t.y. kaip įtaiso JD juda „statoriaus“ atžvilgiu. Tuo tikslu yra naudojami reliatyviųjų švytavimų kintamieji – poslinkis $h'(t)$, greitis $v(t)$ ir pagreitis $a(t)$:

$$h'(t) = h_2(t) - h_1(t), \quad (2.18)$$

$$v(t) = v_2(t) - v_1(t), \quad (2.19)$$

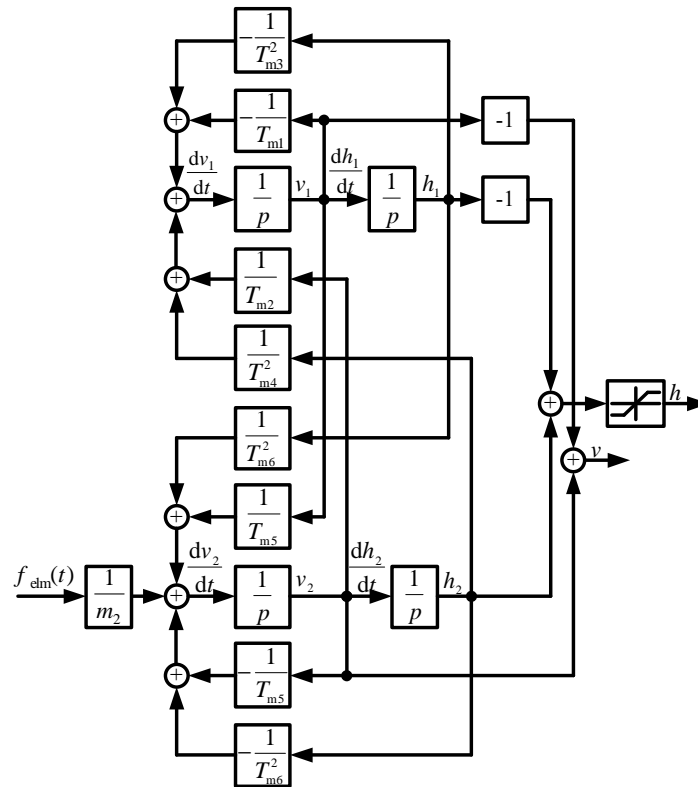
$$a(t) = a_2(t) - a_1(t). \quad (2.20)$$

Reliatyviųjų švytavimų poslinkis $h(t)$ yra apribotas didžiausios reliatyviųjų švytavimų poslinkio amplitudės H_m , kurią sąlygoja didžiausias įtaiso kompresoriaus kameros ilgis. Įtaiso reliatyviųjų švytavimų poslinkio analitinė išraiška, įvertinant švytavimų amplitudės apribojimą, yra:

$$h(t) = \begin{cases} h'(t), & \text{kai } |h'(t)| < H_m, \\ H_m \operatorname{sgn}(h'(t)), & |h'(t)| \geq H_m. \end{cases} \quad (2.21)$$

Esant (2.21) išraiškos antrajai sąlygai vyksta judžiosios dalies „daužymasis“ į „statorių“, kurio, valdant įtaisą, siekiama išvengti [116]. Kadangi, „daužymosi“ vyksmas nėra pagrindinis darbo režimas, tai likusiais atvejais mechaninę posistemę galima laikyti tiesine, įvertinus visas anksčiau padarytas prielaidas ją ištiesinant.

Remiantis išraiškomis (2.15), (2.18-2.21) sudaryta mechaninės posistemės struktūrinė schema (2.7 pav.) (pateiktoje schemoje mechaninių kintamųjų – poslinkio, greičio ir pagreičio priklausomumas nuo laiko, neatvaizduotas). Ši struktūrinė schema yra dalis visos įtaiso sistemos ir skirta sudaryti bendrai viso ŠJMĮ struktūrinei schemai. Tiriant tiesinę mechaninę posistemę, elektromagnetinė jėga $f_{em}(t)$ yra priimta kaip simetrinis periodinis nesinusinis dydis, kuris bendru atveju išskaidomas į nuolatinę dedamąją, pirmąją ir aukštesniąsias harmonikas. Remiantis superpozicijos principu, galima teigti, kad nuolatinė dedamoji ir kiekviena elektromagnetinės jėgos $f_{em}(t)$ harmonika sukuria atitinkamas įtaiso švytavimų poslinkių, greičių ir pagreičių harmonikas.



2.7 pav. ŠJMĮ mechaninės posistemės struktūrinė schema

Nagrinėjant atskirų elektromagnetinės jėgos dedamųjų poveikį, lygčių (2.13) (įvertinus išraiškas (2.4)-(2.12)) sistemai ir (2.18)-(2.20) išraiškoms taikoma Laplaso (tapačius veiksmus atlieka ir kiti autoriai, tik vienmasei sistemai [71]) arba Furjė transformacija [83, 84]. Atlikus Laplaso transformaciją, sudaroma algebrinių lygčių sistema operacinėje formoje, kai pradinės mechaninės posistemės kintamųjų (švytavimų poslinkio, greičio ir pagreičio) sąlygos yra nulinės:

$$H(p) = H_2(p) - H_1(p), \quad (2.22)$$

$$V(p) = V_2(p) - V_1(p), \quad (2.23)$$

$$A(p) = A_2(p) - A_1(p), \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} m_1 p^2 H_1(p) + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) p H_1(p) - R_{\text{mech2}} p H_2(p) + \\ + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) H_1(p) - C_{\text{mech2}} H_2(p) = 0, \\ m_2 p^2 H_2(p) - R_{\text{mech2}} p H_1(p) + R_{\text{mech2}} p H_2(p) - \\ - C_{\text{mech2}} H_1(p) + C_{\text{mech2}} H_2(p) = F_{\text{elm}}(p). \end{cases} \quad (2.25)$$

čia p – Laplaso transformacijos operatorius, $H_1(p)$, $H_2(p)$, $H(p)$, $V_1(p)$, $V_2(p)$, $V(p)$, $A_1(p)$, $A_2(p)$, $A(p)$, $F_{\text{elm}}(p)$ – kintamųjų $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h(t)$, $v_1(t)$, $v_2(t)$, $v(t)$, $a_1(t)$, $a_2(t)$, $a(t)$, $f_{\text{elm}}(t)$ atvaizdai operacinėje formoje.

Remiantis (2.22)-(2.25), galima sudaryti visų ŠJMI kintamųjų $H_1(p)$, $H_2(p)$, $H(p)$, $V_1(p)$, $V_2(p)$, $V(p)$, $A_1(p)$, $A_2(p)$, $A(p)$ perdavimo funkcijas operacinėje formoje, nuo mechaninės sistemos įėjimo poveikio – elektromagnetinės jėgos $F_{\text{elm}}(p)$.

Kadangi „statoriaus“ švytavimų poslinkis $H_1(p)$ priklauso nuo judžiosios dalies švytavimų poslinkio $H_2(p)$, tai iš (2.25) lygčių sistemos gaunama:

$$H_1(p) = \frac{H_2(p)(R_{\text{mech2}}p + C_{\text{mech2}})}{m_1 p^2 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})p + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}. \quad (2.26)$$

Pasinaudojus (2.26), sudaryta perdavimo funkcija $W_{H_1, H_2}(p)$ – „statoriaus“ švytavimų poslinkio priklausomybė nuo judžiosios dalies poslinkio:

$$W_{H_1, H_2}(p) = \frac{H_1(p)}{H_2(p)} = \frac{(R_{\text{mech2}}p + C_{\text{mech2}})}{m_1 p^2 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})p + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}. \quad (2.27)$$

Švytavimų poslinkių $H_1(p)$, $H_2(p)$ ir $H(p)$ priklausomybės ir atitinkamos perdavimo funkcijos $W_{H_1}(p)$, $W_{H_2}(p)$ ir $W_H(p)$ nuo elektromagnetinės jėgos $F_{\text{elm}}(p)$, sudarytos panaudojus (2.25) lygčių sistemą ir (2.27) išraišką. Įtaiso švytavimų poslinkio $H(p)$ priklausomybė nuo $F_{\text{elm}}(p)$ ir perdavimo funkcija $W_H(p)$ yra lygi (priklausomybės $H_1(p)$, $H_2(p)$ ir perdavimo funkcijos $W_{H_1}(p)$, $W_{H_2}(p)$ pateiktos disertacijos priede nr. 1, išraiškos (1.1)-(1.2)):

$$H(p) = \frac{(c_2 p^2 + c_1 p + c_0) F_{\text{elm}}(p)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \Rightarrow W_H(p) = \frac{H(p)}{F_{\text{elm}}(p)}, \quad (2.28)$$

čia skaitiklio ir vardiklio daugianarių koeficientai:

$$b_4 = m_1 m_2; \quad b_3 = R_{\text{mech1}} m_2 + R_{\text{mech2}} (m_1 + m_2);$$

$$b_2 = C_{\text{mech1}} m_2 + C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}; \quad b_1 = C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} + R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}};$$

$$b_0 = C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}; \quad c_2 = m_1; \quad c_1 = R_{\text{mech1}}; \quad c_0 = C_{\text{mech1}}.$$

Perdavimo funkcijos (2.26)-(2.28) yra universalios dvimasėms slopinamoms sistemoms. Naudojantis jomis sudarytos įtaiso dalių švytavimų greičių $W_{V_1}(p)$, $W_{V_2}(p)$, $W_V(p)$ ir pagreičių $W_{A_1}(p)$, $W_{A_2}(p)$, $W_A(p)$ perdavimo funkcijos (perdavimo funkcijos $W_{V_1}(p)$, $W_{V_2}(p)$ ir $W_{A_1}(p)$, $W_{A_2}(p)$ pateiktos disertacijos priede nr. 1, išraiškos (1.3)-(1.6)):

$$W_V(p) = \frac{V(p)}{F_{\text{elm}}(p)} = \frac{pH(p)}{F_{\text{elm}}(p)} = \frac{p(c_2p^2 + c_1p + c_0)}{b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0}, \quad (2.29)$$

$$W_A(p) = \frac{A(p)}{F_{\text{elm}}(p)} = \frac{p^2H(p)}{F_{\text{elm}}(p)} = \frac{p^2(c_2p^2 + c_1p + c_0)}{b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0}. \quad (2.30)$$

Mechaninės posistemės švytavimų poslinkių, greičių ir pagreičių perdavimo funkcijos leidžia analizuoti šių kintamųjų stabilumą. Stabilumo analizę galima atlikti panaudojant įvairius metodus, tačiau pasirinktas analitinis Hurvico metodas, kuris patogus taikyti gautosioms perdavimo funkcijoms. Perdavimo funkcijų (2.28)-(2.30) ir pateiktų disertacijos priede nr. 1 (išraiškos (1.1)-(1.6)), charakteringoji lygtis yra:

$$b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0 = 0. \quad (2.31)$$

Taikant (2.31) sudaromas Hurvico determinantas:

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_3 & b_1 & 0 & 0 \\ b_4 & b_2 & b_0 & 0 \\ 0 & b_3 & b_1 & 0 \\ 0 & b_4 & b_2 & b_0 \end{vmatrix} > 0. \quad (2.32)$$

Viena, bet nepakankama, stabilumo sąlygų – visi charakteringosios lygties (2.31) daugianario koeficientai turi būti teigiami. Ši sąlyga yra tenkinama, nes remiantis šių koeficientų išraiškomis (2.32), visi mechaninės posistemės parametrai yra teigiami ir nelygūs nuliui. Tada mechaninė posistemė yra stabili, kai:

$$b_4 > 0, \quad \Delta_1 = b_3 > 0, \quad (2.33)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} b_3 & b_1 \\ b_4 & b_2 \end{vmatrix} > 0, \quad (2.34)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} b_3 & b_1 & 0 \\ b_4 & b_2 & b_0 \\ 0 & b_3 & b_1 \end{vmatrix} > 0, \quad (2.35)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} b_3 & b_1 & 0 & 0 \\ b_4 & b_2 & b_0 & 0 \\ 0 & b_3 & b_1 & 0 \\ 0 & b_4 & b_2 & b_0 \end{vmatrix} > 0. \quad (2.36)$$

Pirmosios dvi sąlygos (2.33) išraiškoje visada bus tenkinamos, o kitas sąlygas (2.34)-(2.36) būtina tikrinti. Pertvarkius (2.34) išraišką ir įvertinus mechaninės posistemės parametrus, gaunama:

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})m_2^2 + \\ & + (2R_{\text{mech2}}C_{\text{mech2}}m_1 + R_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}))m_2 + \\ & + m_1R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}} + m_1C_{\text{mech2}}) > 0. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Sąlyga (2.37) visada bus tenkinama, nes mechaninės posistemės parametru vertės visada yra teigiamos. Tapačiai pertvarkius (2.35)-(2.36) išraiškas ir įvertinus mechaninės posistemės parametrus, gautos tokios stabilumo sąlygos:

$$C_{\text{mech2}} \geq C_{\text{mech1}}, \quad (2.38)$$

$$C_{\text{mech2}} > C_{\text{mech1}} - \frac{(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})(R_{\text{mech1}}C_{\text{mech2}} + R_{\text{mech2}}C_{\text{mech1}})}{2C_{\text{mech2}}m_1}, \quad (2.39)$$

kai $m_2 > 0, R_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}} > 0$;

$$\begin{aligned} C_{\text{mech2}} > C_{\text{mech1}} - \frac{(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})(C_{\text{mech1}}^2R_{\text{mech2}} + C_{\text{mech2}}^2R_{\text{mech1}})m_2}{2R_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}}C_{\text{mech2}}m_1} - \\ - \frac{R_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}}C_{\text{mech2}} + m_1C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}}^2C_{\text{mech1}}}{2C_{\text{mech2}}m_2} - \\ - \frac{(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})(R_{\text{mech1}}C_{\text{mech2}} + R_{\text{mech2}}C_{\text{mech1}})}{2C_{\text{mech2}}m_1}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Pertvarkius išraiškas (2.35) ir (2.36), buvo nustatyta, kad determinantų Δ_3 ir Δ_4 dešinėsios pusės yra lygios (su sąlyga, kad $C_{\text{mech1}}C_{\text{mech2}} > 0$), todėl analizuojant mechaninės posistemės stabilumą pakanka patikrinti tik (2.35) sąlygą, o skaičiuoti Hurvico didžiausios eilės determinantą, būtinybės nėra.

Išanalizavus (2.38)-(2.40), nustatyta, kad mechaninės posistemės pakankama stabilumo sąlyga yra (2.38), o jei ji netenkinama – stabilumas tikrinamas pagal (2.39)-(2.40) sąlygas. Priklausomai nuo tikrinimo rezultatų, mechaninė posistemė, gali būti stabili arba ne. Galima teigti, kad jeigu mechaninė posistemė netenkina (2.40) sąlygos, tai atvira ŠJMĮ sistema bus nestabili ir švytavimų poslinkis bus labai priklausomas nuo apkrovos.

Yra žinoma [1], kad judančio kūno greitis yra proporcingas jį veikiančiai jėgai ir atvirkščiai proporcingas kūno judėjimo aplinkos pasipriešinimui. Pritaikius šį apibrėžimą tiriamojo įtaiso atveju ir įvertinus, kad:

a) kiekvieną periodinį nesusintį dydį galima išskaidyti į sinusinių harmonikų sumą – šią sąlygą tenkina ir švytavimų greitis $v(t)$, ir įtaiso JD veikianti elektromagnetinė jėga $f_{\text{elm}}(t)$;

b) aplinkos pasipriešinimo koeficientą galima apibūdinti kompleksine mechanine varža;

c) kiekvieną sinusinį dydį galima išreikšti kompleksine forma ir užrašyti kiekvienai greičio harmonikai:

$$\underline{V}_n = \frac{F_{\text{elm},n}}{Z_{\text{mech},n}} = V_{m,n} e^{j\varphi_v(\omega_n)}. \quad (2.41)$$

Remiantis analogija su tradicinėmis sukiosiomis mašinomis, išraišką (2.41) galima vadinti ŠJMĮ mechanine charakteristika kompleksinėje formoje n -ajai švytavimų greičio harmonikai $\underline{V}_n=f(\underline{F}_{elm,n})$. Panaudojant išraišką (2.41) galima sudaryti mechanines charakteristikas kompleksinėje plokštumoje, tačiau aktualesnės charakteristikos būtų analizuojant išraiškos (2.41) dydžių modulius:

$$|\underline{V}_{m,n}(j\omega_n)| = \frac{|F_{elm,m,n}(j\omega_n)|}{|Z_{mech}(j\omega_n)|}. \quad (2.42)$$

Mechaninės apkrovos varžos $Z_{mech}(p)$ perdavimo funkcija, remiantis (2.29) ir (2.42), lygi greičio atvirkštinei perdavimo funkcijai. Taip pat ir reliatyviųjų švytavimų poslinkio ir pagreičio atvirkštinės perdavimo funkcijos išreiškiamos iš (2.29) ir (2.30) ($Z_{mech1}(p)$, $Z_{mech2}(p)$, $pZ_{mech1}(p)$, $pZ_{mech2}(p)$, $Z_{mech1}(p)/p$ ir $Z_{mech2}(p)/p$ perdavimo funkcijos pateiktos disertacijos priede nr. 1, išraiškos (1.7)-(1.12)):

$$Z_{mech}(p) = \frac{F_{elm}(p)}{V(p)} = \frac{1}{W_V(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p(c_2 p^2 + c_1 p + c_0)}, \quad (2.43)$$

$$pZ_{mech}(p) = \frac{F_{elm}(p)}{H(p)} = \frac{1}{W_H(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{c_2 p^2 + c_1 p + c_0}, \quad (2.44)$$

$$\frac{Z_{mech}(p)}{p} = \frac{F_{elm}(p)}{A(p)} = \frac{1}{W_A(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p^2(c_2 p^2 + c_1 p + c_0)}. \quad (2.45)$$

Atvirkštinėms perdavimo funkcijoms (2.43)-(2.45) atlikus Furjė pakeitimą, gautos pilnosios mechaninės varžos ir išraiškų (2.44)-(2.45) kompleksinės formos $Z_{mech}(j\omega_n)$, $j\omega_n Z_{mech}(j\omega_n)$ ir $Z_{mech2}(j\omega_n)/(j\omega_n)$ (pateikiamos priede nr. 1; išraiškos (1.13), (1.21), (1.24)). Apkrovos varžos modulis ŠJMĮ reliatyviųjų švytavimų judesiui išreiškiamas:

- įtaiso JD reliatyviųjų švytavimų poslinkiui:

$$|j\omega_n Z_{mech}(j\omega_n)| = \sqrt{\frac{m_1^2 m_2^2 \omega_n^8}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{(R_{mech2}^2 (m_1 + m_2)^2 - 2m_1 m_2 (C_{mech2} (m_1 + m_2) + C_{mech1} m_2)) \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{R_{mech1} m_2^2 (R_{mech1} + 2R_{mech2}) \omega_n^6 + m_2^2 (C_{mech1} + C_{mech2})^2 \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{(R_{mech1}^2 (R_{mech2}^2 - 2m_2 C_{mech2}) - 2R_{mech2}^2 C_{mech1} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{m_1 C_{mech2} (2m_2 (2C_{mech1} + C_{mech2}) + m_1 C_{mech2}) \omega_n^4 + R_{mech1}^2 C_{mech2}^2 \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{(R_{mech2}^2 C_{mech1}^2 - 2C_{mech1} C_{mech2} (C_{mech2} (m_1 + m_2) + m_2 C_{mech1})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2} + \frac{C_{mech1}^2 C_{mech2}^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{mech1}^2 - 2m_1 C_{mech1}) \omega_n^2 + C_{mech1}^2}}; \quad (2.46)$$

- reliatyviųjų švytavimų greičiui:

$$|Z_{\text{mech}}(j\omega_n)| = \frac{\frac{m_1^2 m_2^2 \omega_n^8}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2)^2 - 2m_1 m_2 (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + C_{\text{mech1}} m_2)) \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{R_{\text{mech1}} m_2^2 (R_{\text{mech1}} + 2R_{\text{mech2}}) \omega_n^6 + m_2^2 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech1}}^2 (R_{\text{mech2}}^2 - 2m_2 C_{\text{mech2}}) - 2R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{m_1 C_{\text{mech2}} (2m_2 (2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1 C_{\text{mech2}}) \omega_n^4 + R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}^2 - 2C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + m_2 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \frac{C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2}} ; \quad (2.47)$$

- reliatyviųjų švytavimų pagreičiui:

$$\left| \frac{Z_{\text{mech}}(j\omega_n)}{j\omega_n} \right| = \frac{\frac{m_1^2 m_2^2 \omega_n^8}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2)^2 - 2m_1 m_2 (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + C_{\text{mech1}} m_2)) \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{R_{\text{mech1}} m_2^2 (R_{\text{mech1}} + 2R_{\text{mech2}}) \omega_n^6 + m_2^2 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{(R_{\text{mech1}}^2 (R_{\text{mech2}}^2 - 2m_2 C_{\text{mech2}}) - 2R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{mm_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{m_1 C_{\text{mech2}} (2m_2 (2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1 C_{\text{mech2}}) \omega_n^4 + R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}^2 - 2C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + m_2 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4} + \frac{C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2}{m_1^2 \omega_n^8 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^6 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^4}} . \quad (2.48)$$

Gautosios išraiškos (2.46)-(2.48) tapačiai pertvarkytos, kaip tai atlikta disertacijos priede nr. 1 (išraiškos (1.16)-(1.20)). Perdavimo funkcijų $Z_{\text{mech1}}(j\omega_n)$, $Z_{\text{mech2}}(j\omega_n)$, $j\omega_n Z_{\text{mech1}}(j\omega_n)$, $j\omega_n Z_{\text{mech2}}(j\omega_n)$ ir $Z_{\text{mech1}}(j\omega_n)/(j\omega_n)$, $Z_{\text{mech2}}(j\omega_n)/(j\omega_n)$, susijusių su absoliučiuoju įtaiso judėjimu, kompleksinės formos ir jų modulių išraiškos pateikiamos disertacijos priede nr. 1 (išraiškos (1.14)-(1.26)).

ŠJMĮ mechaninės posistemės „statoriaus“ ir judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkio, greičio, pagreičio amplitudžių ir fazių vertės kiekvienos elektromagnetinės jėgos n -osios harmonikos atžvilgiu apskaičiuojamos panaudojant (2.41)-(2.48) išraiškas (fazės $\varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n)$ išraiška pateikta disertacijos priede nr. 1,

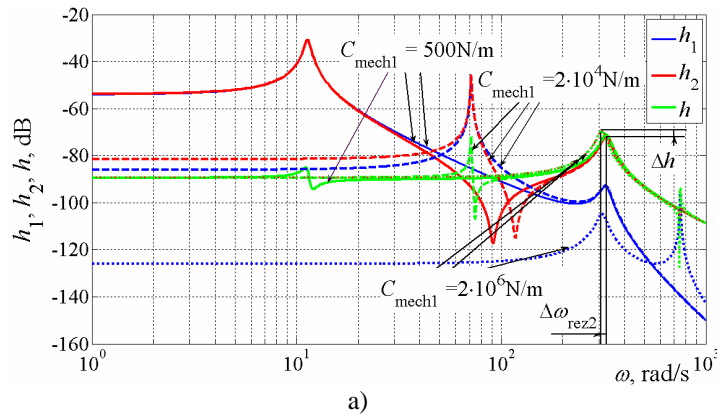
išraiška (1.50)). 2.1 lentelėje pateikiamos įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytvimų poslinkio, greičio ir pagreičio amplitudės ir fazės analitinės išraiškos.

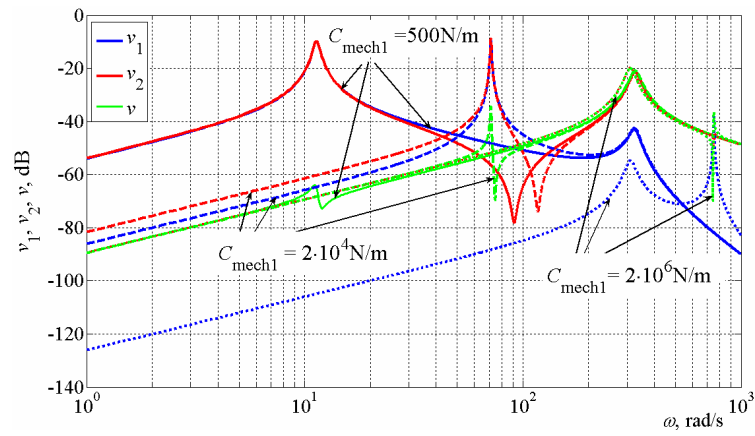
2.1 lentelė. ŠJMI judžiosios dalies kintamųjų analitinės išraiškos.

Kintamieji	Amplitudė	Fazė
Švytvimų poslinkis	$ \underline{H}_{m,n}(j\omega_n) = \frac{ F_{elm,m,n}(j\omega_n) }{ j\omega_n Z_{mech}(j\omega_n) }$	$\varphi_H(\omega_n) = \varphi_{Felm,n}(\omega_n) - \varphi_{Zmech}(\omega_n) - \frac{\pi}{2}$
Švytvimų greitis	$ \underline{V}_{m,n}(j\omega_n) = \frac{ F_{elm,m,n}(j\omega_n) }{ Z_{mech}(j\omega_n) }$	$\varphi_V(\omega_n) = \varphi_{Felm,n}(\omega_n) - \varphi_{Zmech}(\omega_n)$
Švytvimų pagreitis	$ \underline{A}_{m,n}(j\omega_n) = \frac{ F_{elm,m,n}(j\omega_n) }{\frac{ Z_{mech}(j\omega_n) }{j\omega_n}}$	$\varphi_A(\omega_n) = \varphi_{Felm,n}(\omega_n) - \varphi_{Zmech}(\omega_n) + \frac{\pi}{2}$

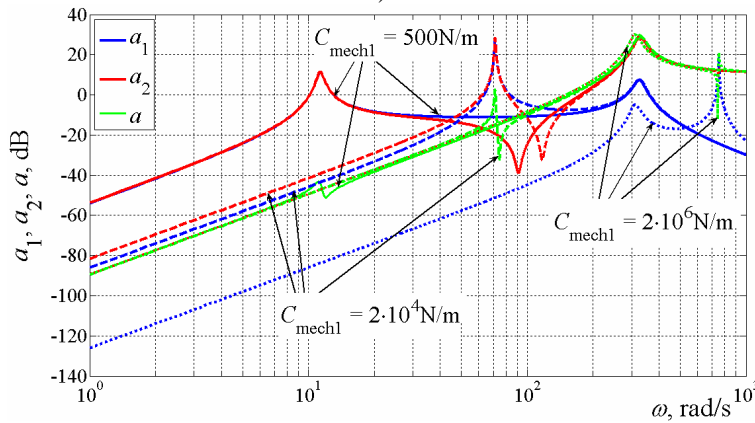
Remiantis (2.46)-(2.48) ir 2.1 lentelės išraiškomis, sudarytos amplitudinės-dažninės ir fazinės-dažninės ŠJMI reliatyviųjų švytvimų poslinkio, greičio ir pagreičio charakteristikos (2.8 pav.). Charakteristikos darbe sudarinėjamos esant įvairiems sistemos parametrams, tačiau kai kurie iš jų yra pastovūs, o kiti kintami. Tiriamojo įtaiso mechaninės posistemės pastovieji parametrai yra artimi arba sutampa su fizinio modelio parametrais ir yra lygūs: $H_m = 8 \cdot 10^{-3}$ m, $C_{mech} = 500$ N/m, $C_{mech2} = 27328$ N/m, $R_{mech1} = 1$ Ns/m, $R_{mech2} = 10$ Ns/m, $m_1 = 3,6$ kg, $m_2 = 0,3$ kg, $F_{elm} = 1$ N, $\omega_1 = 314$ rad/s ($f_1 = 50$ Hz). Skaičiuojant analitinėmis išraiškomis apkrovos parametrai gali būti keičiami: R_{mech2} ribose $[0; 100]$ Ns/m, C_{mech2} ribose $[0; 2 \cdot 10^6]$ N/m. Darbe bus nurodomi tik kintamieji parametrai arba pakeisti pastovūs, o kiti pastovūs bus iš pateiktos aibės šioje pastraipoje.

Charakteristikų universalumui praplėsti, buvo priimta, kad mechaninę posistemę veikia vienetinė elektromagnetinė jėga. Charakteristikų šeimos gaunamos, jas padauginus iš norimo dydžio elektromagnetinės jėgos – tuomet keičiasi tik charakteristikų padėtis ordinačių ašies atžvilgiu. Fazinės-dažninės charakteristikos nepriklauso nuo F_{elm} dydžio, o priklauso tik nuo jėgos fazės maitinančiosios įtampos atžvilgiu. Kadangi, F_{elm} fazių analizė yra pateikiama vėliau, tai (2.8 pav.) fazinės-dažninės charakteristikos sudaromos priimant, kad mechaninės posistemės šaltinis yra F_{elm} ir jos pradinė fazė n -ajai harmonikai $\varphi_{Felm,n}(\omega_n) = 0^\circ$.

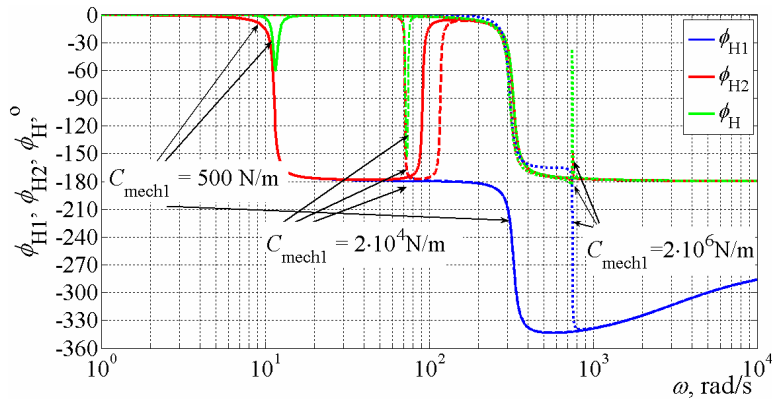




b)



c)



d)

2.8 pav. Įtaiso dalių švytavimų poslinkių $h_1=f(\omega)$, $h_2=f(\omega)$, $h=f(\omega)$ (a), greičių $v_1=f(\omega)$, $v_2=f(\omega)$, $v=f(\omega)$ (b), pagreičių $a_1=f(\omega)$, $a_2=f(\omega)$, $a=f(\omega)$ (c) amplitudinės-dažninės ir fazinės-dažninės $\phi_{H1}=f(\omega)$, $\phi_{H2}=f(\omega)$ ir $\phi_H=f(\omega)$ (d) charakteristikos. Kintami mechaninės posistemės parametrai – $C_{mech1}=\{5 \cdot 10^2; 2 \cdot 10^4; 2 \cdot 10^6\}$ N/m

Išanalizavus (2.8 pav.) charakteristikas galima teigti, kad:

- jei įtaiso pakabos standis $C_{\text{mech1}} \gg C_{\text{mech2}}$ (skaičiuotu atveju 67,7 kartų), tuomet įtaiso JD reliatyviųjų ir absoliučiąjų švytavimų amplitudės ir fazės sutampa, o „statoriaus“ švytavimų poslinkis daug kartų mažesnis už JD poslinkį (skirtumas priklauso nuo sistemos parametrų; skaičiuotu atveju – 56 kartai). Tuomet mechaninė posistemė nagrinėtina kaip vienmasė, nevertinant „statoriaus“ judėjimo įtakos;

- kai ŠJMĮ pakabos standis $C_{\text{mech1}} < C_{\text{mech2}}$, tada JD reliatyviųjų ir absoliučiąjų švytavimų kintamųjų dydžiai ties sistemos pagrindiniu rezonansiniu dažniu ω_{rez2} skiriasi nežymiai ($\Delta h = 1,34$ dB), tačiau „statoriaus“ švytavimų amplitudės žemų dažnių srityje viršija judžiosios dalies švytavimus. Žemų dažnių srityje („statoriaus“ švytavimų antrasis dažnis – 1,81 Hz) F_{elm} harmonikų dydžiai yra labai maži, lyginant su pagrindine F_{elm} harmonika, todėl realus „statoriaus“ dalies švytavimų poslinkis yra mažesnis nei judžiosios dalies;

- greičio ir pagreičio fazinės-dažninės charakteristikos yra tapačios švytavimų poslinkių charakteristikoms savo pobūdžiu (2.1 lentelė), ir skiriasi tik $+\pi/2$ (greičio) ir $+\pi$ (pagreičio), todėl darbe analizuojamos tik švytavimų poslinkių fazinės-dažninės charakteristikos. Nustatyta, kad mechaninė posistemė reliatyviųjų ir absoliučiąjų JD švytavimų atžvilgiu, aukštų dažnių diapazone yra antros eilės sistema, o absoliučiąjų „statoriaus“ švytavimų poslinkių atžvilgiu – trečiosios eilės. Ties sistemos pagrindiniu rezonansiniu dažniu ω_{rez2} sistemos fazė kinta ribose nuo 0° iki 180° , o JD ir „statoriaus“ švytavimų poslinkių fazių skirtumas ties pagrindiniu rezonansiniu dažniu – 180° ;

- toliau darbe nagrinėjamos įtaiso charakteristikos susijusios su pagrindiniu kintamuoju – reliatyviųjų švytavimų poslinkio amplitude (visų kitų kintamųjų charakteristikos pateiktos disertacijos 2 ir 3 prieduose). Remiantis amplitudinėmis-dažninėmis (2.8 pav.) charakteristikomis, galima daryti išvadą, kad ŠJMĮ mechaninė posistemė yra žemo dažnio filtras, švytavimų poslinkių atžvilgiu, todėl sistemą veikiančios F_{elm} aukštesniosios harmonikos sukuria nykstantai mažas aukštesniasias reliatyviųjų švytavimų poslinkių harmonikas.

Reliatyviųjų švytavimų poslinkio skaičiavimų supaprastinimui (2.46) ir (2.1 lentelė) išraiškų analizei daromos tokios prielaidos:

- mechaninės posistemės parametrai R_{mech1} , C_{mech1} , m_1 , m_2 yra pastovūs arba keičiasi nežymiai, nes jie yra parinkto įtaiso parametrai, nepriklausantys nuo apkrovos parametrų R_{mech2} ir C_{mech2} , todėl (2.46) išraišką galima supaprastinti įvedant pastovius koeficientus;

- kadangi mechaninė posistemė yra žemo dažnio filtras, tai aktualu nagrinėti tik pirmąsias tris sistemos kintamųjų harmonikų amplitudes ir nuolatinę dedamąją. Šių harmonikų amplitudės analizuojamos santykiniais vienetais. Įvertinus, kad ŠJMĮ yra dvipusis ir simetrinis, analizuojamos tik nelyginės harmonikos, nes kintamųjų lyginės harmonikos kompensuojasi:

$$f_{\text{elm}}(t) = F_{\text{elm},0} + \sum_{n=1,3} F_{\text{elm},m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_{\text{Felm}}(\omega_n)), \quad (2.49)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1,3} I_{m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_1(\omega_n)), \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned}
h(t) &= H_0 + \sum_{n=1,3} H_{m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_H(\omega_n)) = \\
&= H_0 + \sum_{n=1,3} \frac{|F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n)|}{|j\omega_n Z_{\text{mech}}(j\omega_n)|} \sin(\omega_n t + \varphi_{\text{Felm.n}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n) - \frac{\pi}{2}), \quad (2.51)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v(t) &= \frac{dh(t)}{dt} = \sum_{n=1,3} V_{m,n} \sin(\omega_n t + \varphi_V(\omega_n)) = \\
&= \sum_{n=1,3} \omega_n \frac{|F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n)|}{|j\omega_n Z_{\text{mech}}(j\omega_n)|} \sin(\omega_n t + \varphi_{\text{Felm.n}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n)) = \quad (2.52) \\
&= \sum_{n=1,3} \frac{|F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n)|}{|Z_{\text{mech}}(j\omega_n)|} \sin(\omega_n t + \varphi_{\text{Felm.n}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n)).
\end{aligned}$$

– maitinančiosios įtampos kampinis dažnis yra pastovus, todėl visos sistemoje esančios harmonikos yra įtampos dažnio arba jam kartotinos. Tokiu pačiu dažniu švytuoja įtaiso mechaninė posistemė.

Įvertinus pirmąją prielaidą, gaunama:

$$\begin{aligned}
|H_{m,n}(\omega_n, C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}})| &= \frac{|F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n)|}{|j\omega_n Z_{\text{mech}}(j\omega_n)|} = \\
&= \frac{|F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n)|}{\sqrt{\frac{k_1(\omega_n)(C_{\text{mech2}}^2 + \omega_n^2 R_{\text{mech2}}^2) + k_2(\omega_n)C_{\text{mech2}} + k_3(\omega_n)R_{\text{mech2}} + k_4(\omega_n)}{k_5(\omega_n)}}}; \quad (2.53)
\end{aligned}$$

čia $k_1(\omega_n)$, $k_2(\omega_n)$, $k_3(\omega_n)$, $k_4(\omega_n)$ ir $k_5(\omega_n)$ – koeficientai, priklausantys nuo pastoviųjų mechaninės posistemės parametų ir dažnio:

$$k_1(\omega_n) = (m_1 + m_2)^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2C_{\text{mech1}}(m_1 + m_2))\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2, \quad (2.54)$$

$$k_2(\omega_n) = -2m_2\omega_n^2[m_1(m_1 + m_2)\omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - C_{\text{mech1}}(2m_1 + m_2))\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2], \quad (2.55)$$

$$k_3(\omega_n) = 2R_{\text{mech1}}m_2^2\omega_n^6, \quad (2.56)$$

$$k_4(\omega_n) = k_5(\omega_n)m_2^2\omega_n^4, \quad (2.57)$$

$$k_5(\omega_n) = m_1^2\omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2C_{\text{mech1}}m_1)\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2. \quad (2.58)$$

Tapačiai pertvarkius reliatyviųjų švytavimų poslinkio fazės analitinę išraišką (2.1 lentelė), pateiktą priede nr.1 (išraiška (1.51)), gauname:

$$\begin{aligned}
\varphi_{H,n}(\omega_n, C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}}) &= \\
&= \varphi_{\text{Felm.n}}(\omega_n) - \arctg\left(\frac{k_6(\omega_n)C_{\text{mech2}} + k_8(\omega_n)\omega_n R_{\text{mech2}} + k_7(\omega_n)}{k_8(\omega_n)C_{\text{mech2}} - k_6(\omega_n)\omega_n R_{\text{mech2}}}\right) - \frac{\pi}{2}; \quad (2.59)
\end{aligned}$$

čia $k_6(\omega_n)$, $k_7(\omega_n)$, $k_8(\omega_n)$ – koeficientai, priklausantys nuo pastoviųjų mechaninės sistemos parametrų ir dažnio:

$$k_6(\omega_n) = \frac{k_2(\omega_n)}{2m_2\omega_n^2}, \quad (2.60)$$

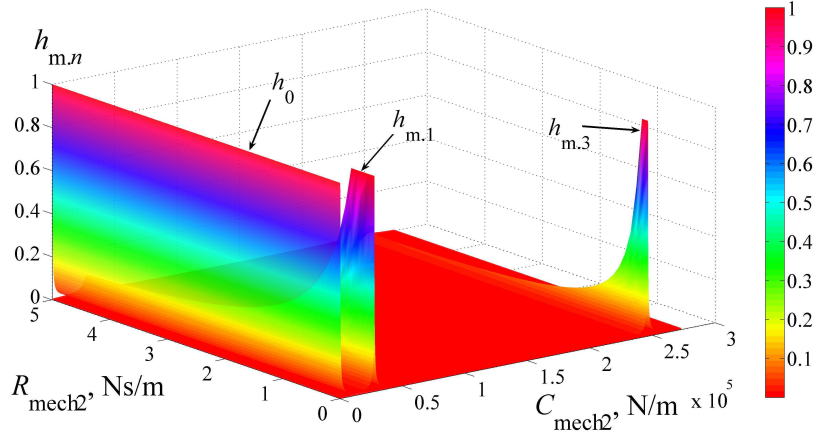
$$k_7(\omega_n) = k_5(\omega_n)m_2\omega_n^2, \quad (2.61)$$

$$k_8(\omega_n) = R_{\text{mech1}}m_2\omega_n^3. \quad (2.62)$$

Švytavių poslinkio amplitudės charakteristiką (2.53), padalinus iš didžiausios švytavių poslinkio amplitudės ir priėmus vienetinę elektromagnetinę jėgą, gaunama universali santykinės švytavių poslinkio amplitudės charakteristika:

$$h_{m,n}(\omega_n, C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}}) = \frac{|H_{m,n}(\omega_n, C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}})|}{H_m} = \frac{1}{H_m \sqrt{\frac{k_1(\omega_n)(C_{\text{mech2}}^2 + \omega_n^2 R_{\text{mech2}}^2) + k_2(\omega_n)C_{\text{mech2}} + k_3(\omega_n)R_{\text{mech2}} + k_4(\omega_n)}{k_5(\omega_n)}}}}. \quad (2.63)$$

Esant pastoviam įtaiso švytavių dažniui, panaudojus (2.63), sudarytos charakteristikos, keičiant apkrovos parametrus R_{mech2} ir C_{mech2} . Tokios charakteristikos sudarytos švytavių centro poslinkiui, pirmajai ir trečiajai harmonikų amplitudėms (2.9 pav.).



2.9 pav. Santykinių švytavių poslinkių $h_0=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$, $h_{m,1}=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$, $h_{m,3}=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$ charakteristikos (parametrų kitimo ribos: $R_{\text{mech2}} \in [0; 5]$ Ns/m, $C_{\text{mech2}} \in [0; 3 \cdot 10^5]$ N/m).

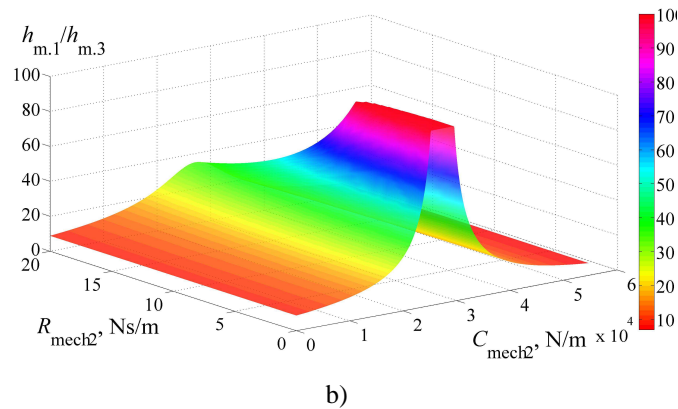
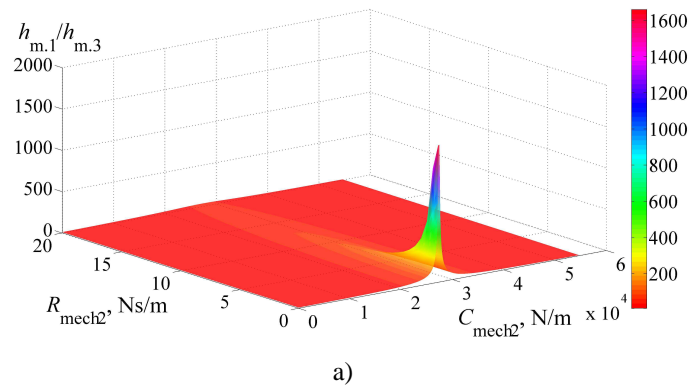
Iš atliktų skaičiavimų rezultatų (2.9 pav.) galima padaryti tokias išvadas:

- įtaisui dirbant pastoviu pagrindiniu dažniu, švytavių centro poslinkis, veikiant vienetinei jėgai, yra mažas ir atvirkščiai proporcingas ekvivalentiniam standžiui C_{mech2} , bet nepriklauso nuo aktyviosios dedamosios R_{mech2} . Tai susiję su

pastovia jėga, kuri veikia ekvivalentinę spyruoklę su standžiu $C_{\text{mech}2}$. Detaliau analizuojant, nustatyta, kad pastovi jėgos dedamoji atsiranda dėl gedimų mechaninėje (vožtuvų gedimai), elektromagnetinėje (apvijų gedimai), galios keitiklio (nevienodas tiristorių atidarymo kampas), valdymo (valdymo impulsų formavimo sutrikimai) posistemėse arba vertikalaus įtaiso montavimo atveju (sunkio jėgos poveikis).

- Švytavimų poslinkio amplitudė, esant rezonansinėms darbo sąlygoms, yra ribojama didžiausios leistino JD poslinkio H_m , net esant vienetinei elektromagnetinei jėgai. Kad nevyktų JD „daužymasis“ į „statorių“, turi būti keičiami tiristorių atidarymo kampai ir elektromagnetinės jėgos dydis.

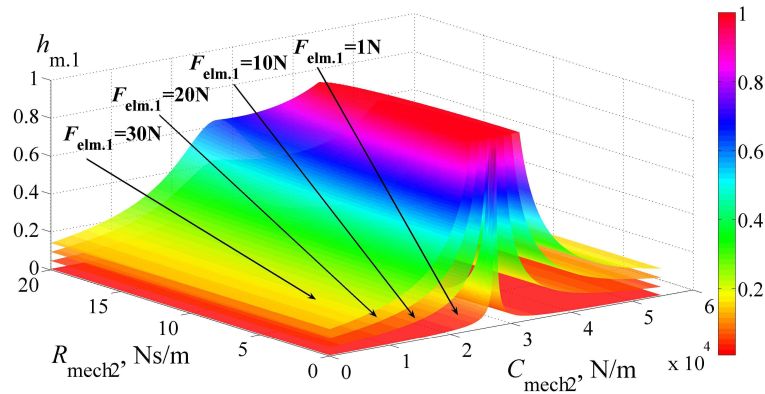
- 3-osios švytavimų poslinkio harmonikos amplitudės rezonansas yra kitame parametrų $R_{\text{mech}2}$ ir $C_{\text{mech}2}$ diapazone. Kai įtaisas dirba 1-osios harmonikos rezonansinėmis sąlygomis (parametrų m_2 ir $C_{\text{mech}2}$ vertėmis suderintomis 50 Hz), jos amplitudė yra nykstamai maža. Taip pat pažymėtina, kad sudarant charakteristikas (2.9 pav.), buvo priimta sąlyga, kad tiek 1-ąją tiek ir 3-ąją harmonikas veikia vienetinė elektromagnetinė jėga. Tačiau elektromagnetinės jėgos aukštesniosios harmonikos mažėja, todėl 3-oji švytavimų harmonika sumažėja dar labiau. Palyginimui nustatyti 1-osios ir 3-osios harmonikų santykiai (2.10 pav.).



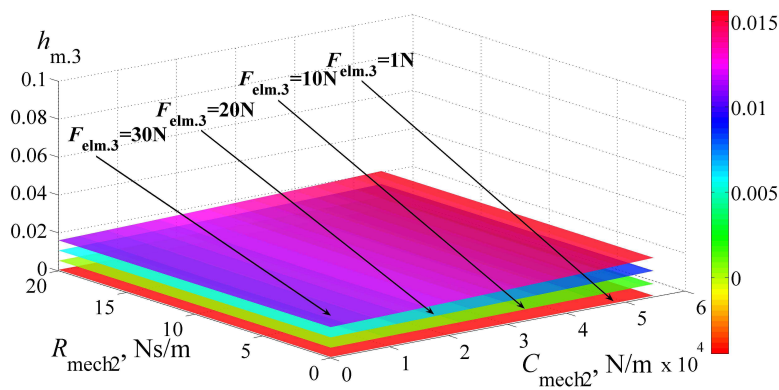
2.10 pav. Švytavimų poslinkių 1-osios ir 3-osios harmonikos santykinių amplitudžių santykių $h_{m.1}/h_{m.3}=f(R_{\text{mech}2}, C_{\text{mech}2})$, charakteristikos (parametrų kitimo ribos: $R_{\text{mech}2} - [0; 20]$ Ns/m, $C_{\text{mech}2} - [0; 5,5 \cdot 10^4]$ N/m): a – pilnas grafikas, b – apribota grafiko skalė iki 100

Šie santykiniai dydžiai ties 1-osios harmonikos rezonanso tašku skiriasi nuo keliasdešimt iki poros tūkstančių kartų, priklausomai nuo mechaninės posistemės aktyviosios apkrovos dydžio (didėjant $R_{\text{mech}2}$, santykis mažėja). Kadangi prietaisas skirtas dirbti mechaninio rezonanso arba jam artimomis sąlygomis, tai švytavių poslinkio 3-osios harmonikos skaičiavimuose galima nevertinti. Taigi, ŠJMĮ švytavių poslinkio amplitudė h_m , esant simetriniam įtaiso darbui yra pilnai apibūdinama 1-ąja švytavių poslinkio harmonikos amplitudė $h_{m,1}$. Esant nesimetriniam darbui – švytavių amplitudę apibūdina švytavių centro poslinkio h_0 ir švytavių poslinkio 1-osios harmonikos amplitudės $h_{m,1}$ suma.

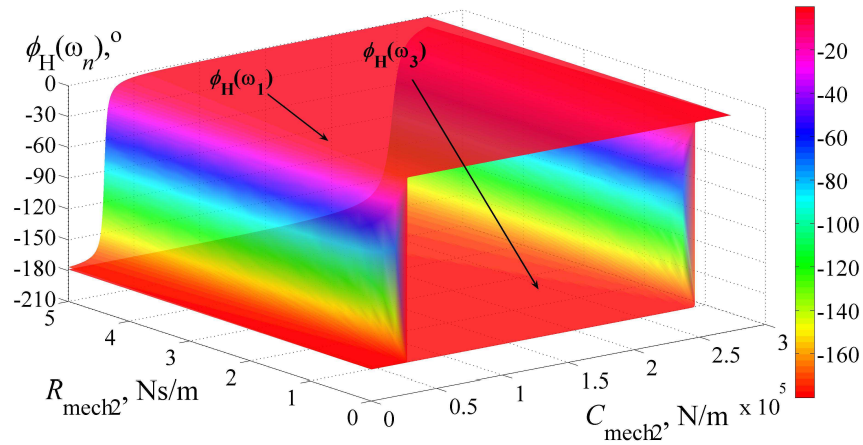
Remiantis (2.63), esant skirtingiems elektromagnetinės jėgos dydžiams, sudarytos charakteristikos (2.11 pav.) 1-ajai ir 3-ajai švytavimo poslinkio harmonikų amplitudėms. Tai parodo gautosios išraiškos universalumą ir patvirtina 3-osios harmonikos santykinai mažas vertes. Švytavių poslinkio 1-osios harmonikos santykinės amplitudės charakteristikos $h_{m,1}=f(R_{\text{mech}2}, C_{\text{mech}2})$ zona, kai švytavių poslinkio amplitudė lygi didžiausiai vertei, plėtėja, didėjant elektromagnetinei jėgai. Todėl, keičiantis apkrovai, būtina stebėti, kad JD nesidaužytų į „statorių“. Švytavių poslinkio amplitudės ribojimas atliekamas didinant tiristorių atidarymo kampą. Taip pat pateiktos ir 1-osios ir 3-osios harmonikos fazių charakteristikos, sudarytos remiantis (2.59).



a)



b)



c)

2.11 pav. Švytavimų poslinkių 1-osios ir 3-osios harmonikos santykinių amplitudžių $h_{m,1}=f(R_{mech2}, C_{mech2})$ (a), $h_{m,3}=f(R_{mech2}, C_{mech2})$ (b) ir fazių $\varphi_H(\omega_n)=f(R_{mech2}, C_{mech2})$ (c) charakteristikos (parametrų kitimo ribos: $R_{mech2} - [0; 20]$ Ns/m, $C_{mech2} - [0; 5,5 \cdot 10^4]$ N/m, $F_{elm} - [1; 10; 20; 30]$ N)

Daugumoje apžvelgtų darbų nagrinėjama vienmasė sistema, tačiau tokio supaprastinimo paklaidos neanalizuotos. Tuo tikslu yra palyginamos švytavimų poslinkio santykinių amplitudžių ir fazių apskaičiavimo procentinės paklaidos. Analizuojama 1-oji harmonika ir jos fazė vienetinės elektromagnetinės jėgos atžvilgiu. Pertvarkius šaltinyje [8] pateiktas išraiškas, gaunama:

$$h_{m,n.vienmasis}(\omega_n, C_{mech2}, R_{mech2}) = \frac{1}{H_m \sqrt{(C_{mech2} - \omega_n^2 m_2)^2 + \omega_n^2 R_{mech2}^2}}, \quad (2.64)$$

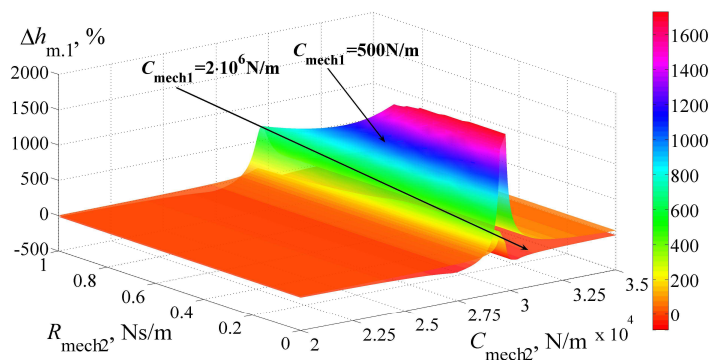
$$\varphi_{H,n.vienmasis}(\omega_n, C_{mech2}, R_{mech2}) = -\arctg\left(\frac{\omega_n^2 m_2 - C_{mech2}}{\omega_n R_{mech2}}\right) - \frac{\pi}{2}. \quad (2.65)$$

Atliktas švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos amplitudės santykinės paklaidos ir švytavimų poslinkio fazės absoliutinės paklaidos skaičiavimas:

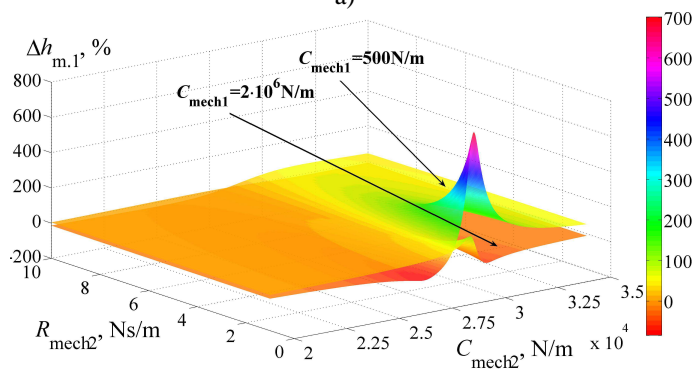
$$\begin{aligned} \Delta h_{m,1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}) &= \\ &= \frac{h_{m,1.vienmasis}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}) - h_{m,1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2})}{h_{m,1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2})} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{H,1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}) &= \\ &= \varphi_{H,1.vienmasis}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}) - \varphi_{H,1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}). \end{aligned} \quad (2.67)$$

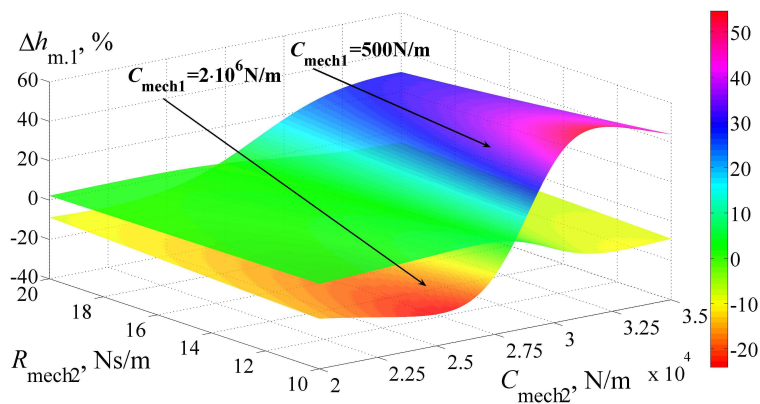
Švytavimų amplitudės paklaidų skaičiavimų rezultatai pateikti paveiksle 2.12. Didžiausios paklaidos yra ties rezonansiniu darbo režimu (apskaičiuotas parametras rezonansui $C_{mech2}=27328$ N/m), ir siekia net kelis tūkstančius procentų.



a)



b)



c)

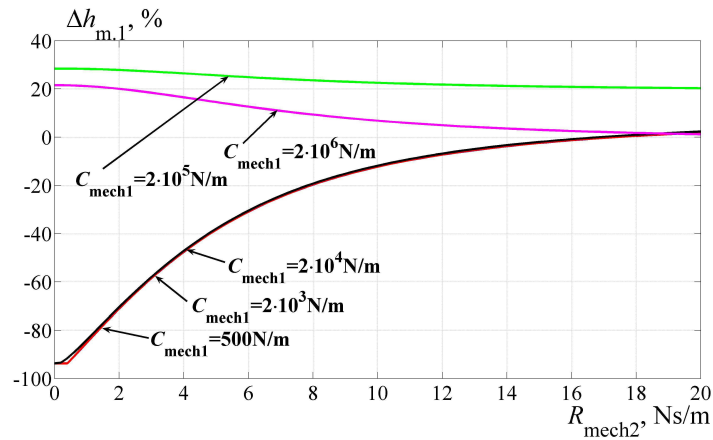
2.12 pav. Švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos santykinės amplitudės paklaidos, lyginant vienmąsę ir dvimąsę sistemas $\Delta h_{m,1} = f(R_{mech2}, C_{mech2})$: a) kai $R_{mech2} \in [0; 1]$ Ns/m; b) kai $R_{mech2} \in [1; 10]$ Ns/m; c) kai $R_{mech2} \in [10; 20]$ Ns/m (parametrų kitimo ribos: $C_{mech2} \in [2 \cdot 10^4; 3,5 \cdot 10^4]$ N/m). Kiti parametrai: $C_{mech1} \in [500; 2 \cdot 10^6]$ N/m

Pastebėtina, kad didinant tiek ŠJMĮ pakabos standį C_{mech1} , tiek ir apkrovos aktyviają varžą R_{mech2} , švytavimų poslinkio paklaida mažėja iki dešimčių procentų, o esant tam tikroms vėrtėms paklaida tampa lygi nuliui. Buvo analizuota „statoriaus“

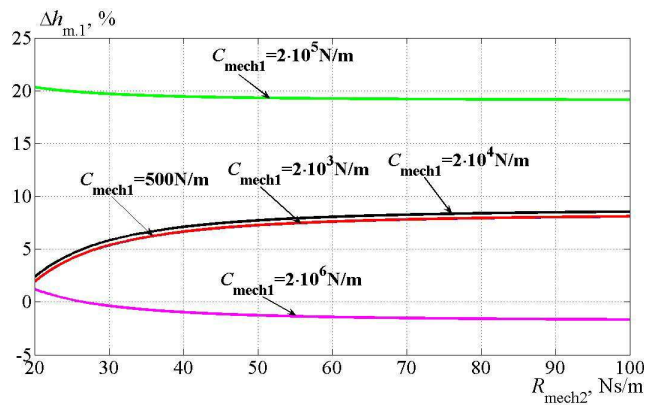
slopinimo koeficiento R_{mech1} įtaka paklaidoms. Šis koeficientas žymesnę įtaką skaičiuotosioms paklaidoms, pagal (2.66) ir (2.67) išraiškas, turėjo tik esant didelėms šio koeficiento vėrtėms (kadangi šis koeficientas parodo galios nuostolius pakaboje, tai jo vėrtę siekiama mažinti, o „statoriaus“ švytavimus mažinti, didinant pakabos standį C_{mech1}). Didėjant šiam parametru, švytavimų poslinkio amplitudės ir fazės paklaidos, lyginant vienmasę ir dvimasę sistemas, mažėja.

Paklaidų dydis 2.12 paveiksle paaiškinamas tuo, kad vienmasės sistemos parametru apskaičiuotasis C_{mech2} ir R_{mech2} skiriasi nuo dvimasės sistemos rezonansinių parametru, o švytavimų poslinkio amplitudės jautrumas šių parametru pokyčiams, remiantis (2.9 pav.), yra didelis.

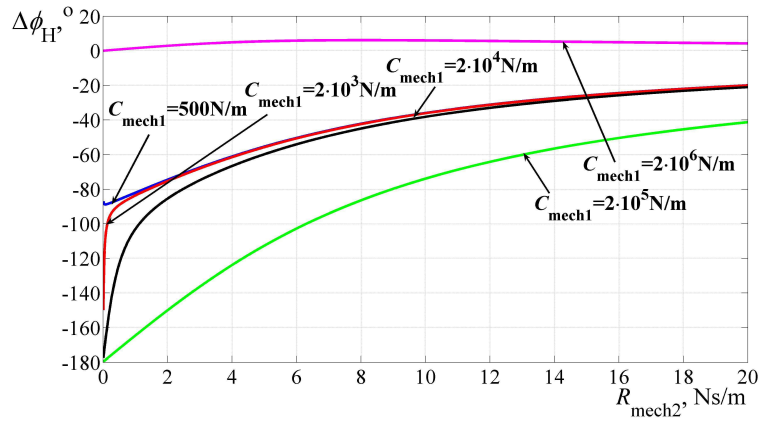
Galima konstatuoti, kad dvimasę sistemą su nestandžia pakaba iki vienmasės galima suprastinti tik tuo atveju, kai ŠJMĮ dirba su didelėmis apkrovomis. Kitu atveju, tiksliai švytavimų poslinkio amplitudei nustatyti, naudotina dvimasei sistemai skirta (2.63) išraiška. Nustatyta, kad sistemai dirbant mechaninio rezonanso režimu ($C_{mech2}=27328$ N/m) ir keičiant tik parametru R_{mech2} , paklaidos neviršijo 100% (2.13 pav.). Esant didelėms R_{mech2} vėrtėms ($R_{mech2} > \approx 60$ Ns/m) paklaidos nusistovi (skaičiuotu atveju – nuo 18% iki – 2%, esant skirtingoms C_{mech1} vėrtėms).



a)



b)



c)

2.13 pav. Švytavimų poslinkių 1-osios harmonikos santykinės amplitudės paklaidos $\Delta h_{m.1}=f(R_{mech2})$: a) kai $R_{mech2} \in [0; 20]$ Ns/m; b) kai $R_{mech2} \in [20; 100]$ Ns/m; ir fazės $\Delta\varphi_H=f(R_{mech2})$ (c) lyginant vienmasę ir dvimasę sistemas (parametrų kitimo ribos: $C_{mech1} = [500, 2 \cdot 10^3, 2 \cdot 10^4, 2 \cdot 10^5, 2 \cdot 10^6]$ N/m)

Švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos fazės paklaidos (2.13 pav. c), didėjant parametru R_{mech2} , artėja prie nulio, ir yra didžiausios esant mažoms šio parametro vertėms. Taigi, vien vienmasės sistemos vertinimas, gali privesti prie klaidingų švytavimų poslinkio amplitudės ir fazės apskaičiavimų.

Projektuojant ŠJMĮ svarbu žinoti apkrovos parametrus R_{mech2} ir C_{mech2} . ŠJMĮ mechaninę posistemę optimalu kurti rezonansinio režimo apkrovos parametrams, (valdant tiristoriniu įtampos keitikliu dažnis pastovus), net jei naudojamas dažnio keitiklis. Rezonansinių R_{mech2} ir C_{mech2} parametrų nustatymui, kai žinoma įrenginio masė ir „statoriaus“ pakabos konstrukcija (R_{mech1} , C_{mech1} , m_1 , m_2 laikomi žinomais), atlikta funkcijos (2.63) ekstremumo paieška ir gautos $R_{mech2,opt}$ ir $C_{mech2,opt}$ išraiškos:

$$C_{mech2,opt} = -\frac{1}{2} \frac{k_2(\omega_n)}{k_1(\omega_n)}, \text{ kadangi } C_{mech2} \geq 0, \text{ tai } \frac{k_2(\omega_n)}{k_1(\omega_n)} \leq 0, \text{ o } k_1(\omega_n) \neq 0, \quad (2.68)$$

$$R_{mech2,opt} = -\frac{1}{2} \frac{k_3(\omega_n)}{k_1(\omega_n)\omega_n^2}, \text{ kadangi } R_{mech2} \geq 0, \text{ tai } \frac{k_3(\omega_n)}{k_1(\omega_n)} \leq 0, \text{ o } k_1(\omega_n) \neq 0. \quad (2.69)$$

Išraiškas (2.68) ir (2.69) įstačius į (2.63), gaunama, minėtų parametrų atžvilgiu, švytavimų poslinkio didžiausios santykinės amplitudės išraiška:

$$h_{m.n,max}(\omega_n) = \frac{1}{H_m \sqrt{\left(-\frac{1}{4k_1(\omega_n)}\right) \frac{(\omega_n k_2(\omega_n))^2 + k_3^2(\omega_n) - 4\omega_n^2 k_4(\omega_n) k_1(\omega_n)}{\omega_n^2 k_5(\omega_n)}}}. \quad (2.70)$$

Įvertinant visus parametrus, būtų galima nustatyti, bendrą ekstremumą dažnio atžvilgiu – tai galėtų būti optimalios mechaninės sistemos projektavimo uždavinys.

Remiantis (2.63) sudarytas švytavimų poslinkio amplitudės pokyčio pilnasis diferencialas apkrovos R_{mech2} ir C_{mech2} parametrų atžvilgiu:

$$\begin{aligned}
\Delta h_{\text{m},n}(\omega_n, \Delta C_{\text{mech2}}, \Delta R_{\text{mech2}}) &= \frac{\partial h_{\text{m},n}(\omega_n, \Delta C_{\text{mech2}}, \Delta R_{\text{mech2}})}{\partial C_{\text{mech2}}} \Delta C_{\text{mech2}} + \\
&+ \frac{\partial h_{\text{m},n}(\omega_n, \Delta C_{\text{mech2}}, \Delta R_{\text{mech2}})}{\partial R_{\text{mech2}}} \Delta R_{\text{mech2}} = \\
&= \frac{-1}{2H_m \sqrt{\left(\frac{k_1(\omega_n)(C_{\text{mech2}}^2 + \omega_n^2 R_{\text{mech2}}^2) + k_2(\omega_n)C_{\text{mech2}} + k_3(\omega_n)R_{\text{mech2}} + k_4(\omega_n)}{k_5(\omega_n)} \right)^3}} \times \\
&\times \left(\frac{2k_1(\omega_n)C_{\text{mech2}} + k_2(\omega_n)}{k_5(\omega_n)} \Delta C_{\text{mech2}} + \frac{2k_1(\omega_n)\omega_n^2 R_{\text{mech2}} + k_3(\omega_n)}{k_5(\omega_n)} \Delta R_{\text{mech2}} \right). \tag{2.71}
\end{aligned}$$

Išraiška (2.71) parodo švytavimų poslinkio amplitudės santykinę pokytį, kai elektromagnetinė jėga yra vienetinė. Galima teigti, kad bet koks parametrų pokytis nuo rezonansinių parametrų verčių lemia švytavimų poslinkio amplitudės mažėjimą. Norint gauti pokyčius esant įvairioms jėgos vertėms, pilnąjį diferencialą reikia padauginti iš jėgos amplitudinės vertės.

ŠJMĮ dviemės mechaninės posistemės rezonansinių dažnių skaičiavimas atliekamas, panaudojant priede nr. 1 pateiktas mechaninės posistemės pilnųjų mechaninių varžų menamųjų dalių išraiškas (priedo nr. 1 išraiškos (1.28), (1.30) ir (1.32)). Sistemos rezonansiniai dažniai nustatomi išsprendus lygtį $\text{Im}(Z_{\text{mech1}}(j\omega_n))=0$ dažnio atžvilgiu ir įvertinus, kad dažniai yra realūs ir teigiami, gauta:

$$\begin{aligned}
\omega_{\text{rez},2} &= \frac{\sqrt{2}}{2m_1 m_2 C_{\text{mech1}} - 2R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech2}}(m_1 + m_2) + R_{\text{mech1}}m_2)} \times \\
&\times \sqrt{\frac{(m_1 m_2 C_{\text{mech1}} - R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech2}}(m_1 + m_2) + R_{\text{mech1}}m_2)) \times}{\left[C_{\text{mech2}}^2(m_1 + m_2) - C_{\text{mech1}}(R_{\text{mech2}}^2 - m_2 C_{\text{mech2}}) \pm [C_{\text{mech2}}^4(m_1 + m_2)^2 + \right.} \\
&\left. + 2C_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2(m_1 + m_2) - 2C_{\text{mech2}}^3 C_{\text{mech1}} m_2(m_1 - m_2) + \right.} \\
&\left. + C_{\text{mech1}}^2(R_{\text{mech1}}^4 + m_2^2 C_{\text{mech2}}^2) - 2m_2 C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}} - 2R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}) \right]} \tag{2.72}
\end{aligned}$$

Atvejis, kai apkrovos varžos menamoji dalis yra lygi begalybei $\text{Im}(Z_{\text{mech1}}(j\omega_n))=\infty$, taip pat yra rezonanso atvejis. Šiuo atveju nustatomi ŠJMĮ rezonansiniai slopinimo dažniai:

$$\omega_{\text{r.slp1}} = 0, \quad \omega_{\text{r.slp2,3}} = \pm j \frac{C_{\text{mech2}}}{R_{\text{mech2}}}. \tag{2.73}$$

Kadangi, pirmasis slopinimo dažnis gaunamas lygus nuliui, o kiti yra menami, tai nagrinėti slopinimo dažnių „statoriui“ nėra tikslinga, nes menamieji dažniai neegzistuoja, o įtaiso darbas vyksta esant nenuliniam tinklo dažniui. Kitų mechaninės posistemės apkrovos varžų menamųjų dalių nagrinėjimas rezonansinių dažnių paieškai nesuteikia papildomos informacijos, nes kaip pateikta

amplitudinėse-dažninėse charakteristikose (2.8 pav.), visų kintamųjų atitinkamų judėjimų – tiek reliatyviųjų, tiek ir absoliučiuųjų – rezonansiniai dažniai sutampa. Kadangi JD slopinimo dažniai esant reliatyviųjų ir absoliučiuųjų švytavimų poslinkio judėjimui nesutampa, būtina išnagrinėti apkrovos varžų menamąsias dalis $\text{Im}(Z_{\text{mech}}(j\omega_n))$ ir $\text{Im}(Z_{\text{mech2}}(j\omega_n))$. Atlikus pertvarkymus, gauta:

- kai analizuojama $\text{Im}(Z_{\text{mech2}}(j\omega_n))$:

$$\omega_{r,\text{slp0}} = 0, \quad (2.74)$$

$$\omega_{Z_{\text{mech2,slp1,2}}} = \frac{\sqrt{2}}{2m_1^2} \sqrt{\frac{2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 \pm \sqrt{(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^4 - 2m_1(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}}{2m_1}}; \quad (2.75)$$

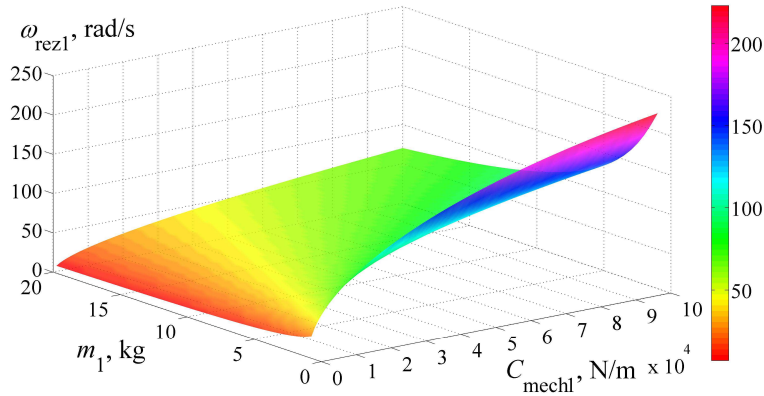
- kai analizuojama $\text{Im}(Z_{\text{mech}}(j\omega_n))$:

$$\omega_{r,\text{slp0}} = 0, \quad (2.76)$$

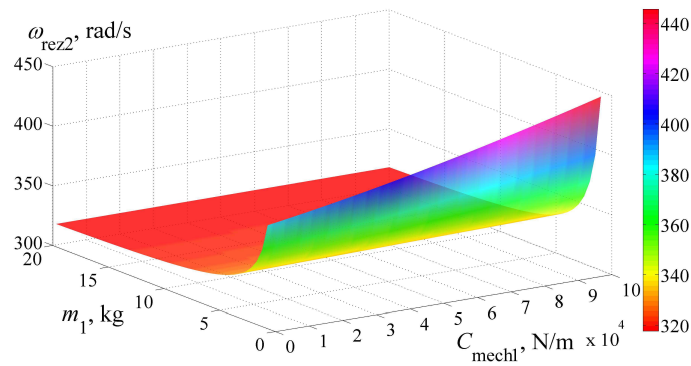
$$\omega_{Z_{\text{mech,slp1,2}}} = \frac{\sqrt{2}}{2m_1} \sqrt{2m_1 C_{\text{mech1}} - R_{\text{mech1}}^2 \pm \sqrt{R_{\text{mech1}}^4 - 2m_1 R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech1}}}}. \quad (2.77)$$

Abiem skaičiavimo atvejais pirmasis slopinimo dažnis $\omega_{r,\text{slp0}}$ yra nulinis. Kiti slopinimo dažniai yra realūs, jei požakniai neneigiami. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, kad $\omega_{Z_{\text{mech,slp1}}} \approx \omega_{Z_{\text{mech,slp2}}}$ ir $\omega_{Z_{\text{mech2,slp1}}} \approx \omega_{Z_{\text{mech2,slp2}}}$. Remiantis analitinėmis rezonansinių ir slopinimo dažnių išraiškomis (2.72)-(2.77), pateikiamos šių dažnių grafinės priklausomybės nuo mechaninės posistemės parametrų (2.14 ir 2.15 pav.).

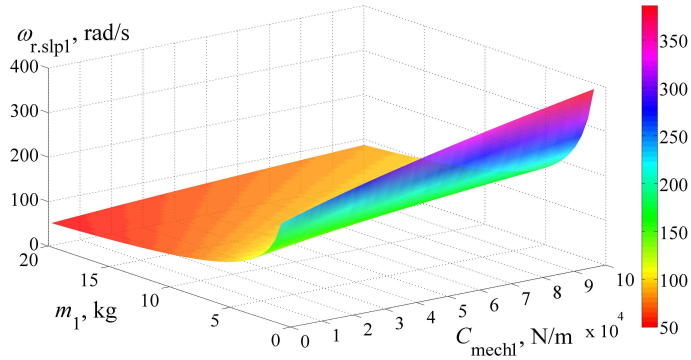
Pagrindinis dažnis, apibūdinantis sistemos darbą, yra antrasis rezonansinis dažnis ω_{rez2} . Šis dažnis nuo „statoriaus“ reaktyviųjų parametrų (m_1 ir C_{mech1}), esant šių parametrų didelėms vertėms, nepriklauso, o tai parodo, kad, kai sistema yra standi arba „statoriaus“ masė yra ne mažiau kaip 25 kartus didesnė (skaičiuotuojų atveju, pagal mechaninės posistemės parametrus pateiktus 2.14 pav.) už JD masę, šią sistemą galima laikyti vienmase. Taip vertinant sistemą aktualūs yra slopinimo dažniai, nes esant netinkamai parinktiems „statoriaus“ mechaninės posistemės parametrams, sistema gali nešvytuoti, nes vyksta švytavimų slopinimas.



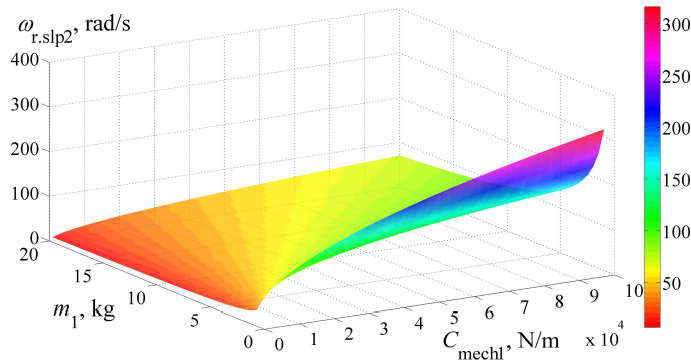
a)



b)



c)

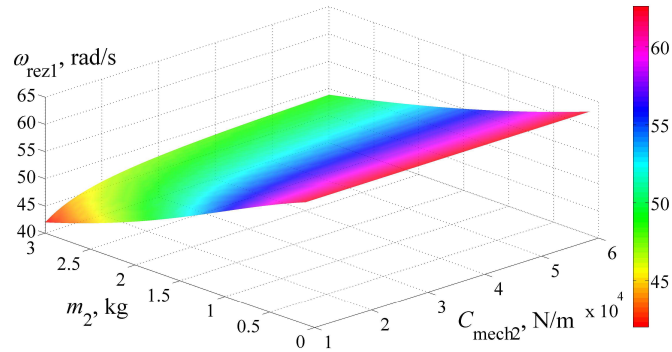


d)

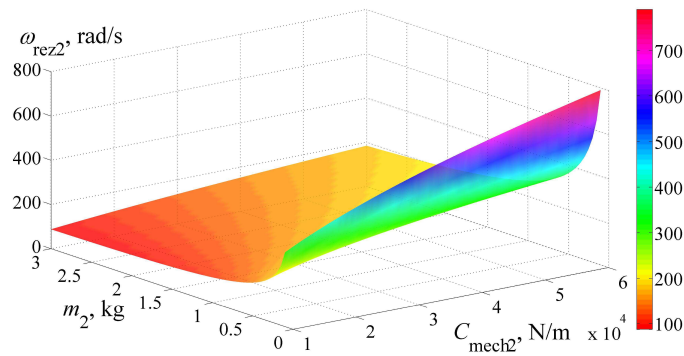
2.14 pav. Rezonansinių dažnių charakteristikos: a) $\omega_{rez1}=f(m_1, C_{mech1})$, b) $\omega_{rez2}=f(m_1, C_{mech1})$, c) $\omega_{r.slp1}=f(m_1, C_{mech1})$, d) $\omega_{r.slp2}=f(m_1, C_{mech1})$; parametų m_1 ir C_{mech1} ribos atitinkamai [1; 20] kg ir [10^3 ; 10^5] N/m

Pagrindinio dažnio ω_{rez2} priklausomybė (2.15 pav.) nuo parametų m_2 ir C_{mech2} pokyčių, esant mažoms JD masės vertėms, yra didelė, todėl siekiant, kad sistemos dažnis būtų pastovus turi, būti didinama JD masė. Tačiau siekiant išlaikyti tą patį rezonansinį dažnį, būtina didinti apkrovos standį (kompresoriaus apkrovos atveju –

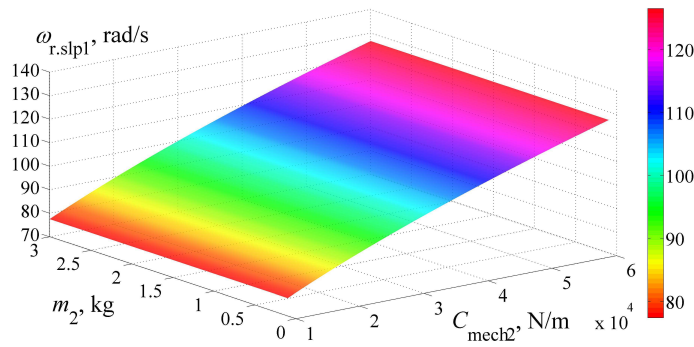
suspaudžiamo oro slėgi), tačiau vienpakopiai stūmokliniai kompresoriai turi didžiausio slėgio ribą, todėl standžio didinimas yra ribotas. Ši riba padidinama papildomai naudojant spyruokles tarp JD ir „statoriaus“. Spyruoklių naudojimas padidina įtaiso gedimų tikimybę, nes dirbant rezonansiniu dažniu prastėja spyruoklės mechaninės savybės ir ilgaamžiškumas. Nenaudojant spyruoklių – būtinas apkrovos standžio parametru sekimas, siekiant stabilizuoti rezonansinį dažnį.



a)



b)



c)

2.15 pav. Rezonansinių dažnių charakteristikos: a) $\omega_{rez1}=f(m_2, C_{mech2})$, b) $\omega_{rez2}=f(m_2, C_{mech2})$, c) $\omega_{r.slp1}=f(m_2, C_{mech2})$; parametru m_2 ir C_{mech2} ribos atitinkamai $[0,1; 3]$ kg ir $[10^4; 6 \cdot 10^4]$ N/m

Pirmasis slopinimo dažnis priklauso tik nuo standžio $C_{\text{mech}2}$, o antrasis slopinimo dažnis – nuo parametru m_2 ir $C_{\text{mech}2}$ nepriklauso.

Rezonansinių dažnių radimas yra atvirkščias uždavinys sistemos parametru radimui ((2.68) ir (2.69)), tačiau dažnių nustatymas naudingas, norint parinkti valdymo būdą, pagal jau egzistuojančios sistemos parametrus. Nustatyta, kad apkrovos parametrai $R_{\text{mech}1}$ ir $R_{\text{mech}2}$ turi nereikšmingą įtaką rezonansiniam dažniui. Šie parametrai turi įtaką švytavimų amplitudei.

Atlikus mechaninės posistemės analizę, galima teigti, kad:

- sudaryta ŠJMĮ dvimasės mechaninės posistemės ekvivalentinė schema; sudarytos JD ir „statoriaus“ švytavimų poslinkių, greičių ir pagreičių perdavimo funkcijos elektromagnetinės jėgos atžvilgiu, sudaryta struktūrinė schema; nustatytos dvimasės sistemos stabilumo sąlygos; sudarytos visų minėtų kintamųjų analitinės išraiškos kaip funkcija nuo elektromagnetinės jėgos ir apkrovos parametru $C_{\text{mech}2}$ ir $R_{\text{mech}2}$; įrodytas žemo filtro efektas, kas lemia tik švytavimų centro poslinkio ir 1-osios švytavimų harmonikos panaudojimą. Palyginta dvimasė ir vienmasė sistemos; pateiktas sistemos supaprastinimo iš dvimasės į vienmasę sistemą paklaidų įvertinimas; sudarytos amplitudinės-dažninės ir fazinės-dažninės charakteristikos; pateikta apkrovos parametru $C_{\text{mech}2}$ ir $R_{\text{mech}2}$ įtaka rezonansiniam dažniui. Pateiktas pilnasis švytavimų poslinkio pokyčių diferencialas nuo apkrovos parametru $C_{\text{mech}2}$ ir $R_{\text{mech}2}$. Nustatytas apkrovos parametru $C_{\text{mech}2}$ ir $R_{\text{mech}2}$ sąryšis su sistemos dažniu.

2.1.2. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso elektromagnetinės ir galios keitiklio posistemų analitinis modelis

ŠJMĮ elektromagnetinės ir galios keitiklio posistemų (toliau vadinama bendrai elektrine posisteme) bendrosios ekvivalentinės elektrinės schemos sudarymui panaudoti šie elektrinės grandinės elementai ir parametrai:

- a) sinusinės įtampos maitinimo šaltinis $u(t)$, su nuline pradine faze;
- b) pastovi apvijos laidininkų varža r_{i1} , neįvertinant varžos kitimo dėl apvijos temperatūros padidėjimo darbo metu;
- c) ekvivalentinė varža r_{i2} , kurioje išskiriama šiluminė energija įvertina galios nuostolius magnetolaidyje, susidarančius dėl histerezės efekto ir sūkurinių srovių. Varža r_{i2} priimama nepriklausanti nuo dažnio, kadangi tiristorinio įtampos valdymo atveju dažnis pastovus ir keičiant tiristorių atidarymo kampą, apvijų srovėse egzistuoja tos pačios pirmosios harmonikos ir nuolatinė dedamoji (teoriškai pirmos 10 harmonikų, praktiškai – pirmos trys, o aukštesnės nykstamai mažos). Tačiau, esant dažniniam valdymui, būtina įvertinti r_{i2} varžos priklausomybę nuo dažnio. Magnetinės indukcijos amplitudė magnetolaidyje mažai įtakoja varžą r_{i2} . Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad įtaisas švytuoja, keičiant tiristorių atidarymo kampą nuo 0° iki 90° . Dėl valdymo keičiasi magnetinės indukcijos amplitudė, tačiau remiantis darbais [1, 3], šis pokytis suteikia varžai r_{i2} kelių procentų kaitą, todėl ši varža laikoma pastovaus dydžio;
- d) apvijos netiesinis (atskiru atveju – tiesinis) induktyvumas $L_i(h(t))$, priklausantis nuo įtaiso reliatyviųjų švytavimų poslinkio h , o tuo pačiu ir nuo laiko t ;

e) abipusis apvijų netiesinis induktyvumas $M_{ij}(h(t))$, priklausantis nuo reliatyviųjų švytavimų poslinkio h , o tuo pačiu ir nuo laiko t . Taip pat šis induktyvumas priklauso nuo apvijų tarpusavio padėties;

f) netiesiniai galios grandinės elektronikos elementai – valdomi tiristoriai.

Apvijų ekvivalentinės schemos sudarymas priklauso nuo įtaiso konstrukcijos. Tokių schemų sudarymas plačiai išnagrinėtas, kai įtaisas neturi nuolatinių magnetų arba papildomos žadinimo grandinės JD arba „statoriuje“ [1, 3, 4, 10, 13]. Tačiau minėtuose darbuose yra nagrinėjamas tik vienpusio veikimo švytuojamojo judesio įtaisas arba, jei ir analizuojamas dvipusis, tai neįvertinamas abipusis induktyvumas. Remiantis minėtais darbais ir įvertinus abipusį induktyvumą, sudaroma vienos apvijų ekvivalentinė schema be galios elektronikos elementų (2.16 pav. a). Apvijų ekvivalentinę elektrinę schemą galima supaprastinti darant prielaidas:

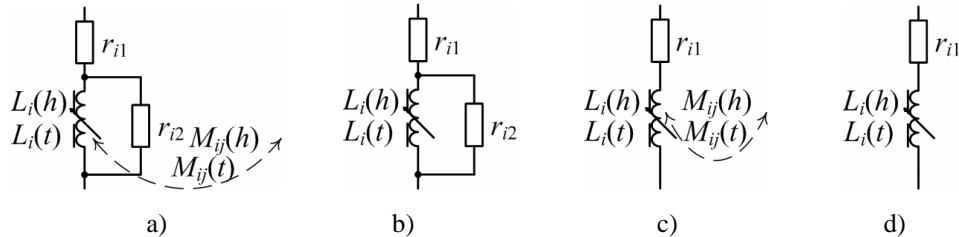
a) neįvertinamas apvijų abipusis induktyvumas $M_{ij}(h)$, tačiau įvertinami nuostoliai magnetolaidyje, susidarantys ekvivalentinėje varžoje r_{i2} (2.16 pav. b);

b) neįvertinami nuostoliai magnetolaidyje, susidarantys ekvivalentinėje varžoje r_{i2} , tačiau įvertinamas apvijų abipusis induktyvumas $M_{ij}(h)$ (2.16 pav. c);

c) neįvertinami nei nuostoliai magnetolaidyje ekvivalentine varža r_{i2} , nei apvijų abipusis induktyvumas $M_{ij}(h)$ (2.16 pav. d).

Šie pakeitimai galimi norint atlikti preliminarius skaičiavimus, sutrumpinti skaičiavimo laiką, supaprastinti skaičiavimų eigą, tačiau norint gauti tikslesnius rezultatus, turi būti įvertinti visi parametrai, esantys ekvivalentinėje apvijų schemoje (2.16 pav. a).

Atliekant matematinę modeliavimą, naudojamos 2.16 paveiksle pavaizduotos a) ir b) varianto schemos. Preliminarių skaičiavimų atlikimui buvo naudojama supaprastintoji schema, kurioje neįvertinamas abipusis apvijų induktyvumas $M_{ij}(h)$.

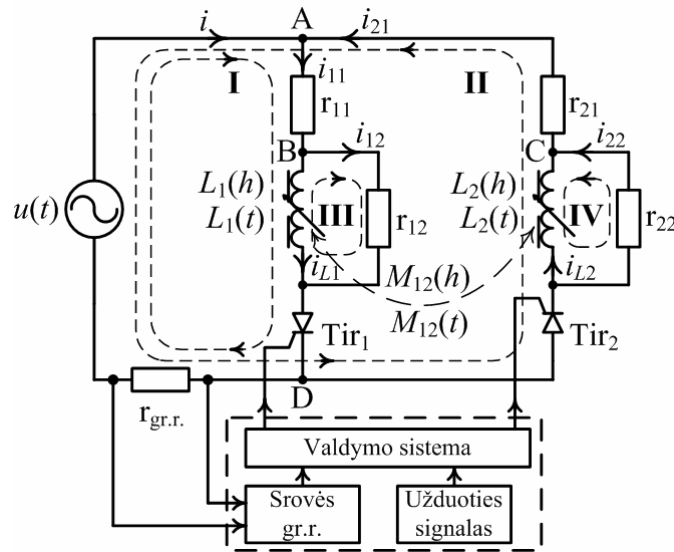


2.16 pav. ŠJMĮ apvijų ekvivalentinės schemos: a) apibendrintoji, b), c) ir d) – supaprastintos

Dvipusio dviejų apvijų įtaiso ekvivalentinė elektrinė schema, įvertinanti visus anksčiau paminėtus grandinės parametrus, yra pateikta 2.17 paveiksle. Pateiktoje schemoje įtaisas yra valdomas panaudojant tiristorius, tačiau galimas ir kitokio tipo keitiklis, pavyzdžiui, tranzistorinis impulsinis įtampos keitiklis (kai įtaisas yra maitinamas nuolatine bipoliarine įtampa) arba panaudojant platuminę impulsų moduliaciją.

Tiristorinio įtampos keitiklio realizacija nereikalauja papildomų įtampos lygintuvų ir filtrų, kurie būtų reikalingi tranzistorinėse schemose. Iš kitos pusės, tranzistorinių schemų valdymo grandinės yra paprastesnės nei tiristorinių. Kai įtaisas

valdomas panaudojant galios keitiklį, kurio dėka nepastovi srovė kiekvienoje apvijoje nekeičia ženklo – toks įtaisas vadinamas pulsuojamąsios srovės [1, 3].



2.17 pav. Valdomo ŠJM ekvivalentinė elektrinė schema su valdymo funkciniais blokais

Remiantis 2.17 paveiksle pateikta ŠJM – tiesiaeigio švytuojamojo judesio pulsuojamąsios srovės elektros variklio (TSPSEV) elektrinė schema, sudaromos lygtys pagal I-ąjį ir II-ąjį Kirchhofo dėsnius:

a) pagal I-ąjį Kirchhofo dėsnį – taškams A, B ir C:

$$\begin{cases} i(t) = i_{11}(t) - i_{21}(t), & A \\ i_{11}(t) = i_{L1}(t) + i_{12}(t), & B \\ i_{21}(t) = i_{L2}(t) + i_{22}(t), & C \end{cases} \quad (2.78)$$

b) pagal II-ąjį Kirchhofo dėsnį – kontūrams I, II, III, IV:

$$\begin{cases} u(t) = r_{11}i_{11}(t) + \frac{d(L_1(h(t)) \cdot i_{L1}(t))}{dt} \pm \frac{d(M_{21}(h(t)) \cdot i_{L2}(t))}{dt} + u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1}), & I \\ u(t) = r_{21}i_{21}(t) + \frac{d(L_2(h(t)) \cdot i_{L2}(t))}{dt} \pm \frac{d(M_{12}(h(t)) \cdot i_{L1}(t))}{dt} + u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2}), & II \\ 0 = r_{12}i_{12}(t) - \left[\frac{d(L_1(h(t)) \cdot i_{L1}(t))}{dt} \pm \frac{d(M_{21}(h(t)) \cdot i_{L2}(t))}{dt} \right], & III \\ 0 = r_{22}i_{22}(t) - \left[\frac{d(L_2(h(t)) \cdot i_{L2}(t))}{dt} \pm \frac{d(M_{12}(h(t)) \cdot i_{L1}(t))}{dt} \right]. & IV \end{cases} \quad (2.79)$$

Lygčių sistemos (2.78) ir (2.79) supaprastinamos, remiantis tokiomis prielaidomis:

a) kadangi abiejų įtaiso apvijų induktyviosios srovės teka priešingomis kryptimis, tai įtampos kritimai, atsirandantys dėl abipusės indukcijos reiškinių,

mažina įtampos kritimus, susidarančius apvijos induktyvumuose, todėl nariai, esantys (2.79) lygčių sistemoje, su abipusiu induktyvumu rašomi su minuso ženklu;

b) (2.78) lygčių sistemos pirmoji lygtis yra savarankiška, nes bendrąją srovę $i(t)$ galima apskaičiuoti atskirai;

c) visų dydžių, esančių (2.78) ir (2.79) lygčių sistemose ir priklausančių nuo laiko t , užrašai supaprastinami praleidžiant „ (t) “. Laiko nuorodą paliekant tik prie maitinančios įtampos $u(t)$ ir tiristorių įtampų $u_{\text{Tir}1}(t, \alpha_{\text{Tir}1})$, $u_{\text{Tir}2}(t, \alpha_{\text{Tir}2})$;

d) įtampų kritimai induktyvumuose ir abipusiame induktyvume išskaidomi pasinaudojant sandaugos išvestinės taisykle;

e) mažas įtampos kritimas grįžtamojo ryšio šunto varžoje $r_{\text{gr.r.}}$ nevertinamas.

Visa tai įvertinus, sudaryta bendroji elektrinės posistemės lygčių sistema:

$$\begin{cases} L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = - \left(\frac{r_{11}r_{12}}{r_{11} + r_{12}} + \frac{dL_1(h)}{dt} \right) i_{L1} + \frac{dM(h)}{dt} i_{L2} + \\ + \frac{r_{12}}{r_{11} + r_{12}} (u(t) - u_{\text{Tir}1}(t, \alpha_{\text{Tir}1})), \\ - M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{dM(h)}{dt} i_{L1} - \left(\frac{r_{21}r_{22}}{r_{21} + r_{22}} + \frac{dL_2(h)}{dt} \right) i_{L2} + \\ + \frac{r_{22}}{r_{21} + r_{22}} (u(t) - u_{\text{Tir}2}(t, \alpha_{\text{Tir}2})). \end{cases} \quad (2.80)$$

Įvedus papildomus pažymėjimus:

$$\begin{cases} L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = -(k_{r1}r_{11} + k_1(h, v))i_{L1} + k(h, v)i_{L2} + \\ + k_{r1}(u(t) - u_{\text{Tir}1}(t, \alpha_{\text{Tir}1})), \\ - M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = k(h, v)i_{L1} - (k_{r2}r_{21} + k_2(h, v))i_{L2} + \\ + k_{r2}(u(t) - u_{\text{Tir}2}(t, \alpha_{\text{Tir}2})), \end{cases} \quad (2.81)$$

čia pažymėjimai, kurie pateikti (2.80) lygčių sistemoje [1, 3, 4, 13, 14, 19]:

$$k_{1,2}(h, v) = \frac{dL_{1,2}(h)}{dt} = \frac{dL_{1,2}(h)}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{dL_{1,2}(h)}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{dL_{1,2}(h)}{dh} \cdot v, \quad (2.82)$$

$$k(h, v) = \frac{dM(h)}{dt} = \frac{dM(h)}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{dM(h)}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{dM(h)}{dh} \cdot v, \quad (2.83)$$

$$k_{r1} = \frac{r_{12}}{r_{11} + r_{12}}; \quad k_{r2} = \frac{r_{22}}{r_{21} + r_{22}}; \quad (2.84)$$

$h = h_2 - h_1$ – reliatyvųjų švytavimų poslinkis; $v = v_2 - v_1$ – reliatyviųjų švytavimų greitis.

(2.81) lygčių sistema matricinėje formoje:

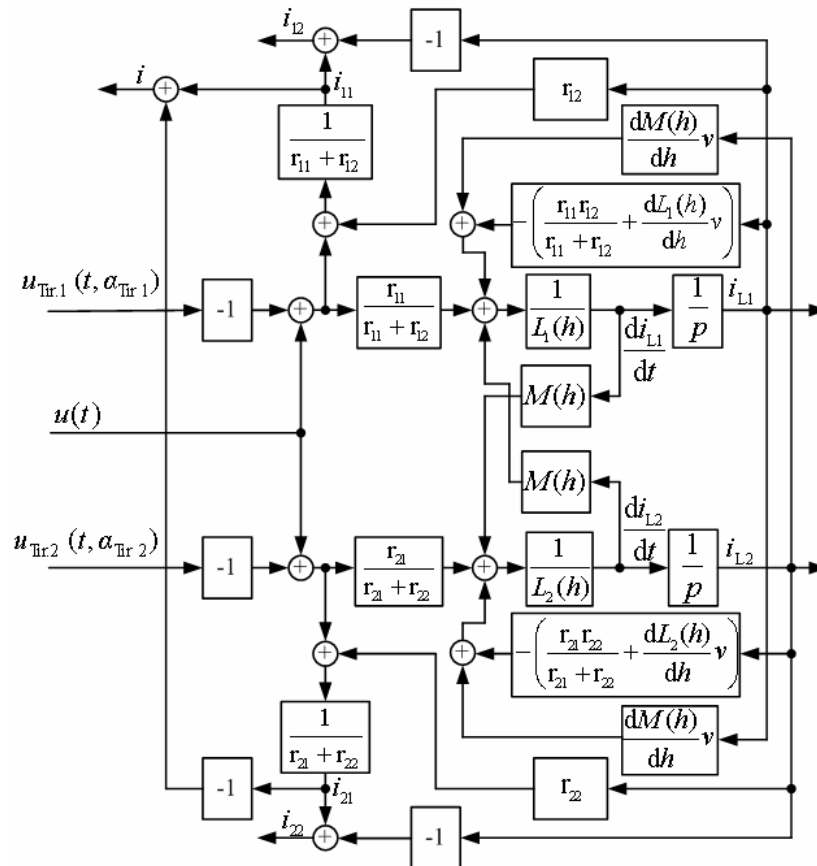
$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}; \quad (2.85)$$

čia matricos:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} L_1(h) & -M(h) \\ -M(h) & L_2(h) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(k_{r1}r_{11} + k_1(h, v)) & k(h, v) \\ k(h, v) & -(k_{r2}r_{21} + k_2(h, v)) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} k_{r1}(u(t) - u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1})) \\ k_{r2}(u(t) - u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2})) \end{bmatrix}.$$

Remiantis (2.80) diferencialinių lygčių sistema, sudaryta valdomo ŠJMĮ elektrinės posistemės struktūrinė schema (2.18 pav.). Šioje struktūroje induktyvumai priklauso nuo švytavimų poslinkio, tačiau analogišką struktūrą galima sudaryti, kai induktyvumai priklauso nuo laiko.



2.18 pav. Elektrinės posistemės struktūrinė schema, kai induktyvumas priklauso nuo reliatyviųjų švytavimų poslinkio

Struktūrinės schemos sudarytos taikant lygtis, kurios gaunamos iš (2.78) ir (2.80) lygčių sistemų:

$$i_{11} = \frac{1}{r_{11} + r_{12}} (r_{12} i_{L1} + u(t) - u_{\text{Tir1}}(t, \alpha_{\text{Tir1}})), \quad (2.86)$$

$$i_{12} = i_{11} - i_{L1}, \quad (2.87)$$

$$i_{21} = \frac{1}{r_{21} + r_{22}} (r_{22} i_{L2} + u(t) - u_{\text{Tir2}}(t, \alpha_{\text{Tir2}})), \quad (2.88)$$

$$i_{22} = i_{21} - i_{L2}, \quad (2.89)$$

$$i = i_{11} - i_{21}. \quad (2.90)$$

Matematinio modeliavimo programos sudarymui ir skaičiavimams buvo taikoma lygčių sistema, kurioje induktyvumai priklauso nuo reliatyviųjų švytavimų poslinkio h . Atliekant analitinius skaičiavimus, taikoma diferencialinių lygčių sistema, kurioje visi kintamieji yra laiko funkcijos, nes tuo atveju galima taikyti Laplaso transformaciją (netiesiniam įtaisui taikomas sistemos ištiesinimas).

Elektrinėje posistemėje egzistuoja trys netiesiškiškumai – apvijų induktyvumų, abipusio induktyvumo ir tiristorių funkcijos.

Apvijų netiesinių induktyvumų analizė. Nagrinėjant (2.80) lygčių sistemą, būtina paaiškinti induktyvumų $L_1(h)$ ir $L_2(h)$ ir abipusio induktyvumo $M(h)$ kitimo dėsnius. Šie įtaiso induktyvumai gali turėti tokius tipinius induktyvumų $L_i(h)$ kitimo dėsnius [1, 3, 10, 11, 13, 16] – sinusinį (2.19 pav. a; kreivės a), tiesinį (2.19 pav. a; tiesės b) arba hiperbolinį (2.19 pav. a; kreivės c).

Induktyvumo dėsnų kitimo išraiškos yra:

a) tiesinio kitimo [1, 3, 12]:

$$L_{1,2}(h(t)) = L_0 \pm K_{\text{ties}} h(t), \quad (2.91)$$

$$K_{\text{ties}} = \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{2H_m}; \quad (2.92)$$

b) hiperbolinio kitimo [1, 3, 9]:

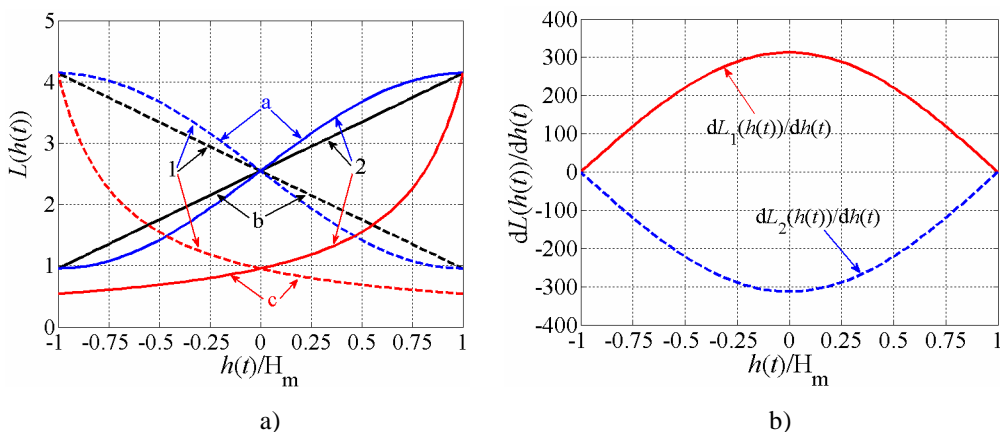
$$L_{1,2}(h(t)) = \frac{L_{\text{min}} (H_m + h_{\Delta})}{(H_m + h_{\Delta}) \mp h(t)}, \quad (2.93)$$

$$h_{\Delta} = \frac{L_{\text{min}} H_m}{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}; \quad (2.94)$$

c) sinusinio kitimo [1, 3]:

$$L_{1,2}(h(t)) = L_0 \pm K_{\text{sin}} \sin\left(\frac{h(t)}{H_m} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.95)$$

$$K_{\sin} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}. \quad (2.96)$$



2.19 pav. Tipiniai įtaiso grandinės induktyvumo kitimo dėsniai, santykinio švytavimų poslinkio atžvilgiu (a): a – sinusinis; b – tiesinis; c – hiperbolinis [1, 3, 10, 11, 13, 16] (1 – pirmos apvijos, 2 – antros apvijos); (b) – induktyvumo, kintančio pagal sinusinį dėsnį, išvestinės priklausomybė nuo santykinio švytavimų poslinkio

Šiame darbe nagrinėjamas ŠJMI gali turėti arba tiesinį, arba sinusinį induktyvumo kitimą [1, 3, 4], tačiau tiesinis induktyvumo kitimas neįvertina magnetinės grandinės netiesinių savybių, todėl nagrinėjamas kitimas pagal sinuso dėsnį.

Induktyvumo kitimas analizuojamas dviem atvejais:

a) kaip priklausomas nuo švytavimų poslinkio $h(t)$, kaip parodyta išraiškose (2.91)-(2.96);

b) kaip priklausomas nuo laiko t .

Įvairių autorių darbuose dažniausiai nagrinėjamas pirmasis atvejis [1, 3, 4, 7, 14, 16, 19] ir (2.80) lygčių sistemoje esančios induktyvumo išvestinės laiko atžvilgiu yra keičiamos pagal (2.82) išraišką.

Induktyvumų išvestinės poslinkio atžvilgiu yra lygios (2.19 pav. b):

$$\frac{dL_{1,2}(h(t))}{dh(t)} = \pm \frac{\pi K_{\sin}}{2H_m} \cos\left(\frac{h(t)}{H_m} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.97)$$

Antruoju atveju, lygčių sistemos (2.80) visi nariai bus tik laiko funkcijos. Įvertinus aukštesniasias harmonikas, švytavimų centro poslinkį, atsirandantį dėl įtaiso nesimetriškos apkrovos ir lyginių harmonikų nebuvimą dėl įrenginio simetriškumo, švytavimų poslinkį bendru atveju galima išreikšti ir supaprastinti:

$$\begin{aligned} h(t) &= H_0(t) + \sum_{n=1,3,5,\dots} H_{m,n}(t) \sin(n\omega t + \varphi_{H,n}(t)) \Rightarrow \\ &\Rightarrow h(t) = H_0(t) + H_{m,1}(t) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}(t)) \Rightarrow h(t) = H_0 + H_{m,1} \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}). \end{aligned} \quad (2.98)$$

Supaprastinimas atliekamas analitinių skaičiavimų pagrindu, kai buvo nustatyta, kad švytavimų poslinkių aukštesniųjų nelyginių harmonikų amplitudės ($n = 3, 5, \dots$) nykstamai mažos. Gautąją išraišką (2.98 antroji išraiška) galima naudoti tiek nusistovėjusių švytavimų atveju, tiek ir pereinamojo vyksmo analizėje. Nusistovėjusių poslinkio švytavimų atveju gauta galutinė (2.98) išraiška, nevertinanti švytavimų poslinkio amplitudės ir fazių pokyčių pereinamųjų vyksmų metu. Įstačius (2.98) tarpinę išraišką (2.95), gaunami induktyvumų kitimo dėsniai, priklausantys nuo laiko, skirti tiek pereinamajam tiek ir nusistovėjusiam vyksmui (pateikti priede nr. 4; išraiškos (4.1)). Tik nusistovėjusiam vyksmui:

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm K_{\sin} \sin\left(\frac{H_0 + H_{m,1} \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1})}{H_m} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.99)$$

Atlikus pakeitimus (2.99) gauta (2.20 pav. a):

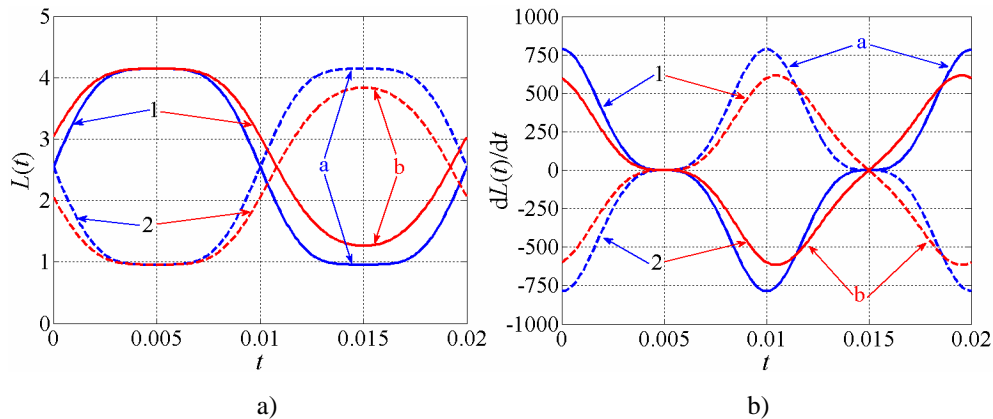
$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm K_{\sin} \sin\left(\left(k(H_0) + k(H_{m,1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1})\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right); \quad (2.100)$$

čia $k(H_0)$, $k(H_{m,1})$ – santykiniai švytavimų centro poslinkio ir 1-osios švytavimų poslinkio harmonikos amplitudės koeficientai, kurie lygūs:

$$k(H_0) = \frac{H_0}{H_m} \text{ ir } k(H_{m,1}) = \frac{H_{m,1}}{H_m}. \quad (2.101)$$

Šie koeficientai turi tenkinti švytavimų poslinkio amplitudės apribojimo sąlygas:

$$|k(H_0) + k(H_{m,1})| \leq 1, \text{ arba } |k(H_{m,1})| \leq 1, \text{ kai } k(H_0) = 0. \quad (2.102)$$



2.20 pav. Induktyvumo ir jo išvestinių, laiko atžvilgiu, grafikai: a) 1a – $L_1(t)=f(t)$ ir 2a – $L_2(t)=f(t)$, kai $k(H_0)=0$, $k(H_{m,1})=1$; 1b – $L_1(t)=f(t)$ ir 2b – $L_2(t)=f(t)$, kai $k(H_0)=0,2$, $k(H_{m,1})=0,8$; b) 1a – $dL_1(t)/dt=f(t)$ ir 2a – $dL_2(t)/dt=f(t)$, kai $k(H_0)=0$, $k(H_{m,1})=1$; 1b – $dL_1(t)/dt=f(t)$ ir 2b – $dL_2(t)/dt=f(t)$, kai $k(H_0)=0,2$, $k(H_{m,1})=0,8$

Įvertinus (2.101) ir (2.80) lygčių sistemoje esančias induktyvumų išvestines laiko atžvilgiu, gaunama (2.20 pav. b):

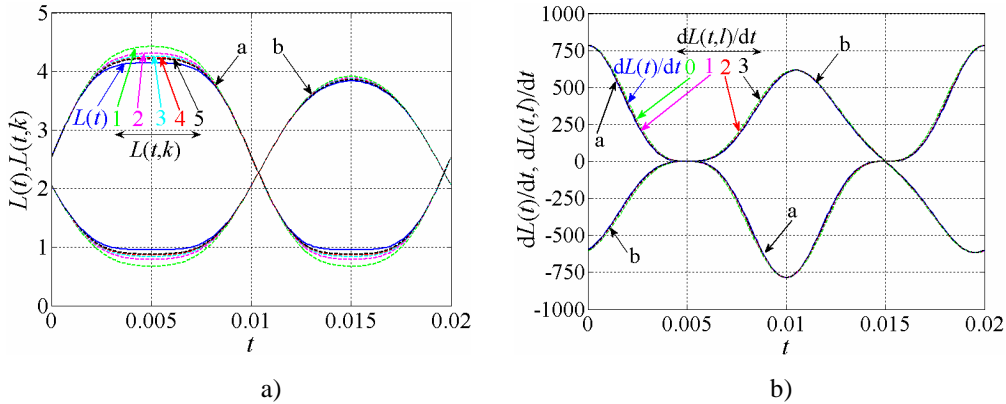
$$\frac{dL_{1,2}(t)}{dt} = \pm \frac{\omega_1 \pi K_{\sin} k(H_{m,1})}{2} \cos(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) \times \cos\left(\left(k(H_0) + k(H_{m,1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1})\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.103)$$

Pateiktos išraiškos (2.100) ir (2.103) yra netiesinės, todėl norint atlikti integravimą ar Laplaso transformaciją, reikia minėtų funkcijų sinusą ir kosinusą pakeisti žinomomis begalinėmis eilutėmis (priedas nr. 4, išraiškos (4.6)) ir atlikus pakeitimus (2.100) ir (2.103), gaunamos ištiesintos analitinės išraiškos:

$$L_{1,2}(t, k) = L_0 \pm K_{\sin} \left(\left(k(H_0) + k(H_{m,1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) \right) \cdot \frac{\pi}{2} \right) \times \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) + k(H_{m,1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) \right)}{2k} \right)^2 \right], \quad (2.104)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t, l)}{dt} = \pm \frac{\omega_1 \pi K_{\sin} k(H_{m,1})}{2} \cos(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) \times \prod_{l=0}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) + k(H_{m,1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) \right)}{2l+1} \right)^2 \right]. \quad (2.105)$$

Išraiškos (2.104) ir (2.105) yra begalinės eilutės, todėl jų panaudojimas yra apribotas didelės apimties skaičiavimų. Šis trūkumas sumažinamas nustatant eilutės baigtinį reikalingų narių kiekį. Paveiksle 2.21 pateikti induktyvumų ir jų išvestinių palyginamieji grafikai, kai eilutės narių skaičius k kinta nuo 1 iki 5, o l – nuo 0 iki 3.



2.21 pav. Induktyvumo ir jo išvestinių netiesinių ir ištiesintų, laiko atžvilgiu, funkcijų, esant įvairiems eilučių narių skaičiams, grafikai (k ir l su spalvine indikacija; $k=1, 2, \dots, 5$; $l=0, 1, \dots, 3$): a) a – $L_1(t)=f(t)$, kai $k(H_0)=0, k(H_{m,1})=1$; b) – $L_2(t)=f(t)$, kai $k(H_0)=0,2, k(H_{m,1})=0,8$; b) a – $dL_1(t)/dt=f(t)$, kai $k(H_0)=0, k(H_{m,1})=1$; b) b – $dL_2(t)/dt=f(t)$, kai $k(H_0)=0,2, k(H_{m,1})=0,8$

Remiantis skaičiavimų rezultatais nustatyta, kad:

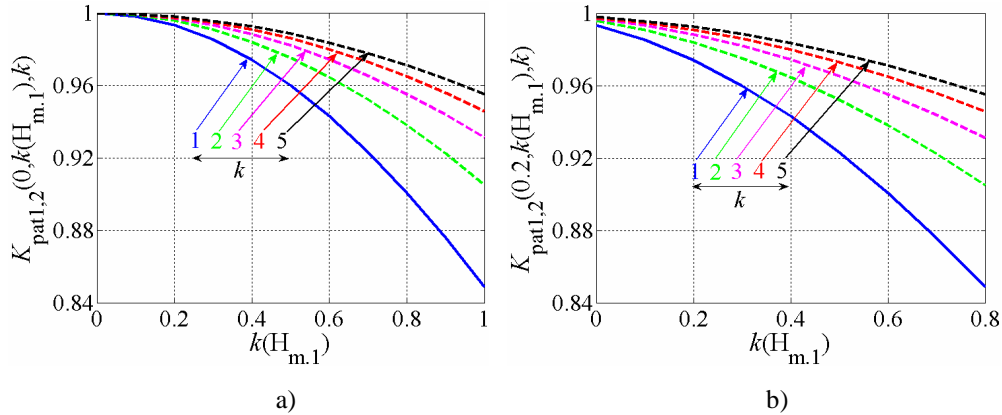
a) induktyvumo kitimo formos didžiausia vertė priklauso nuo pasirinkto begalinės eilutės narių skaičiaus;

b) analizuojant induktyvumą, būtų galima įvesti didžiausios vertės pataisos koeficientą K_{pat} ir sudarius šio koeficiento matematinę išraišką, ją naudoti induktyvumo skaičiavimams (skaičiavimas pateiktas priede nr. 4). Šio koeficiento priklausomybės nuo švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos amplitudės pateiktos 2.22 paveiksle. Pataisos koeficientai išreiškiami kaip trijų kintamųjų funkcijos:

$$K_{pat1,2}(k(H_0), k(H_{m.1}), k) = \frac{\sin\left(\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right)}{\left(\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1}))\right)^2}{2k}\right)\right]\right)}; \quad (2.106)$$

c) analizuojant pataisos koeficientus buvo nustatyta, kad, nesant švytavimų centro poslinkiui, pataisos koeficientai abiejų apvijų induktyvumams yra vienodi;

d) induktyvumo išvestinės išraiškos kitimas yra lygiavertis netiesiniam atvejui, kai kosinuso eilutės skaičius $l=0$.



2.22 pav. Pataisos K_{pat1} ir K_{pat2} koeficientų vertės, kai nėra švytavimų centro poslinkio (a) ir kai yra švytavimų centro poslinkis (b)

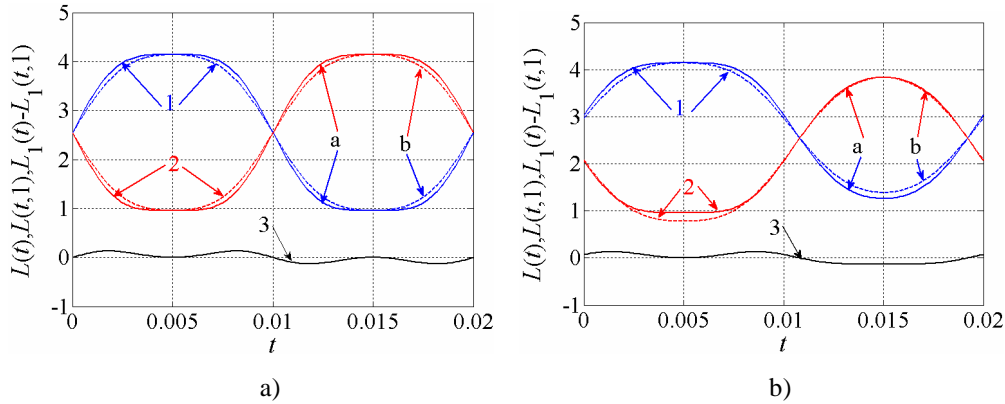
Didžiausias pataisos koeficientas yra esant didžiausiai švytavimų amplitudei, o pataisos koeficiento sandaugos narių skaičius yra mažiausias ($k=1$). Šie koeficientai K_{pat1} ir K_{pat2} yra lygūs, kai nėra švytavimų centro poslinkio. Darbas esant švytavimų centro poslinkiui nepageidautinas, nes šis atvejis reiškia ŠJMĮ gedimą. Tokiu atveju įtaisas yra stabdomas arba, didinant tiristorių atidarymo kampą, mažinama švytavimų poslinkio amplitudė. Atvejui, kai švytavimų poslinkio amplitudės yra artimesnės H_m , pataisos koeficientas gali būti parenkamas kaip vidurkis tarp pusės ir didžiausios švytavimų amplitudės. Eilutės narių skaičius parenkamas $k=1$, nes tai mažina skaičiavimų kiekį. Šį koeficientą būtina perskaičiuoti tais atvejais, kai

atliekant valdymą, keičiasi švytavių poslinkio amplitudė. Atsižvelgus į paminėtas išvadas, išraiškas (2.104) ir (2.105) galima supaprastinti:

$$L_{1,2}(t,1) = L_0 \pm K_{\sin} K_{\text{pat}1,2}(k(H_0), k(H_{m.1}), 1) \times \left((k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \frac{\pi}{2} \right) \times \left[1 - \left(\frac{(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}))}{2} \right)^2 \right], \quad (2.107)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t,0)}{dt} = \pm \frac{\omega_1 \pi K_{\sin} k(H_{m.1})}{2} \cos(\omega_1 t + \varphi_{H.1}) \times \left[1 - (k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}))^2 \right]. \quad (2.108)$$

Išraiškos (2.107) grafikas, lyginant su netiesiniu atveju (2.99), pateiktas paveiksle 2.23.



2.23 pav. Induktyvumai, esant ekvivalentiškai pakeistam $L_1(t,1)$ (1b) ir $L_2(t,1)$ (2b) ir netiesiniam atvejui $L_1(t)$ (1a) ir $L_2(t)$ (2a): a) kai nėra švytavių centro poslinkio, b) kai yra švytavių centro poslinkis

Pažymėtinas aspektas, kad norint nagrinėti ŠJMĮ induktyvumus laiko atžvilgiu – galima lygčių sistemas nagrinėti priimant, kad induktyvumai gali būti išskaidyti į harmonikas kaip ir bet kuri periodinė laiko funkcija. Induktyvumo nuolatinė dedamoji yra žinoma – L_0 , o 1-oji ir aukštesniosios lyginės ir nelyginės harmonikos, bendru atveju egzistuoja. Lyginės harmonikos neegzistuoja, kai švytavių centro poslinkio nėra. Induktyvumų išvestinės, bendru atveju, turi ir lygines, ir nelygines harmonikas, o atskiru atveju, kai nėra švytavių centro poslinkio, turi tik nelygines. Bendru atveju, remiantis šiomis prielaidomis ir išraiškomis (2.100)-(2.103) galima užrašyti:

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm \left[\Delta L_0 + \sum_{n=1,2,3,\dots} L_{m.1,2,n} \sin(\omega_n t + \varphi_{L1,2,n}) \right], \quad (2.109)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t)}{dt} = \pm \sum_{n=1,2,3,\dots} \omega_n L_{m,1,2,n} \sin\left(\omega_n t + \varphi_{L_{1,2,n}} + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.110)$$

Kai nėra švytavimų centro poslinkio:

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm \sum_{n=1,3,5,\dots} L_{m,1,2,n} \sin(\omega_n t + \varphi_{L_{1,2,n}}); \quad (2.111)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t)}{dt} = \pm \sum_{n=1,3,5,\dots} \omega_n L_{m,1,2,n} \sin\left(\omega_n t + \varphi_{L_{1,2,n}} + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.112)$$

Išraiškos (2.109)-(2.112) yra begalinės eilutės, todėl racionali panagrinėti, kiek narių minėtose išraiškose būtina vertinti atliekant skaičiavimus. Tam buvo pasirinktos tiriamojo įtaiso induktyvumų vertės ir sinusinio dėsnio koeficientas ($L_{\min} \cong 0,955$ H, $L_0 \cong 2,548$ H, $L_{\max} \cong 4,14$ H, $K_{\sin} = 1,592$ H, harmonikos skaičiuotos 10^{-6} s žingsniu). Skaičiavimai buvo atliekami pirmosios apvijos induktyvumui, o kitos apvijos induktyvumo skaičiavimai yra analogiški. Skaičiavimuose apsiribota penkiomis harmonikomis. Skaičiavimų rezultatai pateikti priede nr. 4 (4.1 lentelė).

Remiantis skaičiavimo rezultatais apie induktyvumų harmonikų kiekį, amplitudes ir fazes, galima teigti, kad:

- esant simetriniam darbui, dydis ΔL_0 nevertinamas, kaip ir lyginės harmonikos, dėl mažo dydžio lyginant su nelyginėmis harmonikomis; dydis ΔL_0 atsiranda tik esant švytavimų centro poslinkiui;
- 4-oji ir 5-oji harmonikos, lyginant su pirmomis trimis yra sąlyginai mažos (mažiau nei 1%), todėl į induktyvumų ir jų išvestinių skaičiavimą neįtraukiamos;
- induktyvumų 1-osios harmonikos fazė yra lygi švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos pradinei fazei, $\varphi_{L_{1,1}} = \varphi_{H,1}$;
- induktyvumų 2-osios harmonikos fazė (skaičiuojama ir vertinama tik esant asimetriniam ŠJMĮ darbui) yra lygi: $\varphi_{L_{1,2}} = 90^\circ + 2\varphi_{H,1}$;
- induktyvumų 3-osios harmonikos fazė yra lygi trimis švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos fazėms $\varphi_{L_{1,3}} = 3\varphi_{H,1}$;
- švytavimų poslinkio fazės kitimas induktyvumų harmonikų amplitudėms įtakos neturi.

Remiantis pateiktomis išvadomis (2.109) – (2.112), galutinai galima perrašyti, kai ŠJMĮ dirba nesimetriškai (2.113)-(2.114) ir simetriškai (2.115)-(2.116):

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm \left[\Delta L_0 + L_{m,1,2,1} \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) + L_{m,1,2,2} \sin\left(2\omega_1 t + 2\varphi_{H,1} + \frac{\pi}{2}\right) + L_{m,1,2,3} \sin(3\omega_1 t + 3\varphi_{H,1}) \right], \quad (2.113)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t)}{dt} = \pm \left[\omega_1 L_{m,1,2,1} \sin\left(\omega_1 t + \varphi_{H,1} + \frac{\pi}{2}\right) + 2\omega_1 L_{m,1,2,2} \sin(2\omega_1 t + 2\varphi_{H,1} + \pi) + 3\omega_1 L_{m,1,2,3} \sin\left(3\omega_1 t + 3\varphi_{H,1} + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (2.114)$$

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm [\Delta L_0 + L_{m,1,2,1} \sin(\omega_1 t + \varphi_{H,1}) + L_{m,1,2,3} \sin(3\omega_1 t + 3\varphi_{H,1})], \quad (2.115)$$

$$\frac{dL_{1,2}(t)}{dt} = \pm [\omega_1 L_{m,1,2,1} \sin\left(\omega_1 t + \varphi_{H,1} + \frac{\pi}{2}\right) + 3\omega_1 L_{m,1,2,3} \sin\left(3\omega_1 t + 3\varphi_{H,1} + \frac{\pi}{2}\right)]. \quad (2.116)$$

Taigi, (2.113)-(2.116) galima taikyti Laplaso transformaciją ir taip ištiesinti sistemą analizuojant ją superpozicijos principu, kad visi grandinės parametrai ir kintamieji gali būti išskaidyti į harmonikas ir analizuoti kiekvienos harmonikos sistemą atskirai, o galutinį atsakymą gauti sudedant visus grandinės poveikius.

Abipusis induktyvumas. Darbe nagrinėjamas ŠJMĮ turi sumontuotas dvi apvijas, kurios konstrukciškai viena kitos atžvilgiu išdėstytos 90° kampų. Yra žinoma, kad išdėčius dvi rites statmenai viena kitai, jų abipusis induktyvumas teoriškai yra lygus nuliui. Todėl darbe analitiniams skaičiavimams yra priimama, kad abipusis induktyvumas yra lygus nuliui, o eksperimentinėje dalyje pateikti įtaiso abipusio induktyvumo matavimo rezultatai parodė, kad šis teiginys tiriamam įtaisui yra priimtinas. Jeigu įtaiso apvijos būtų išdėstytos ne statmenai viena kitai, tai pasinaudojant matavimo schema, kuri pateikta 4 skyriuje, galima eksperimentiškai nustatyti ŠJMĮ abipusį induktyvumą. Šį induktyvumą taip pat galima nustatyti pasinaudojant magnetinės grandinės konstrukcine schema ir sprendžiant induktyvumo paieškos uždavinį iš apvijų matmenų ir jų tarpusavio išdėstymo.

Tiristorių modelis. Atliekant matematinius skaičiavimus ir modeliavimą, priimtas supaprastintas tiristorių matematinis modelis, kurio sudarymas remiasi tokiais teiginiais:

- tiristorius nelaidus, kai įtampos fazė yra mažesnė už tiristorių atidarymo kampą α_{Tir} ;
- tiristorius laidus be nuostolių (nėra įvertintas įtampos kritimas tiristoriuje, kai juo teka tiesioginė srovė), kai įtampos fazė yra didesnė už tiristorių atidarymo kampą;
- tiristorius atgaline kryptimi yra visiškai nelaidus;
- tiristoriaus palaikymo srovė yra lygi nuliui, o tiristoriaus atidarymo komutacija yra akimirkinė;
- tiristoriaus laidumo kampą galima nustatyti pagal nomogramas arba išraiškas [2]:

$$\lambda(\alpha_{Tir}, \varphi) = a(\alpha_{Tir}) + b(\alpha_{Tir})\varphi + c(\alpha_{Tir})\varphi^2 + d(\alpha_{Tir})\varphi^3, \quad (2.117)$$

$$a(\alpha_{Tir}) = 180 - \alpha_{Tir}, \quad (2.118)$$

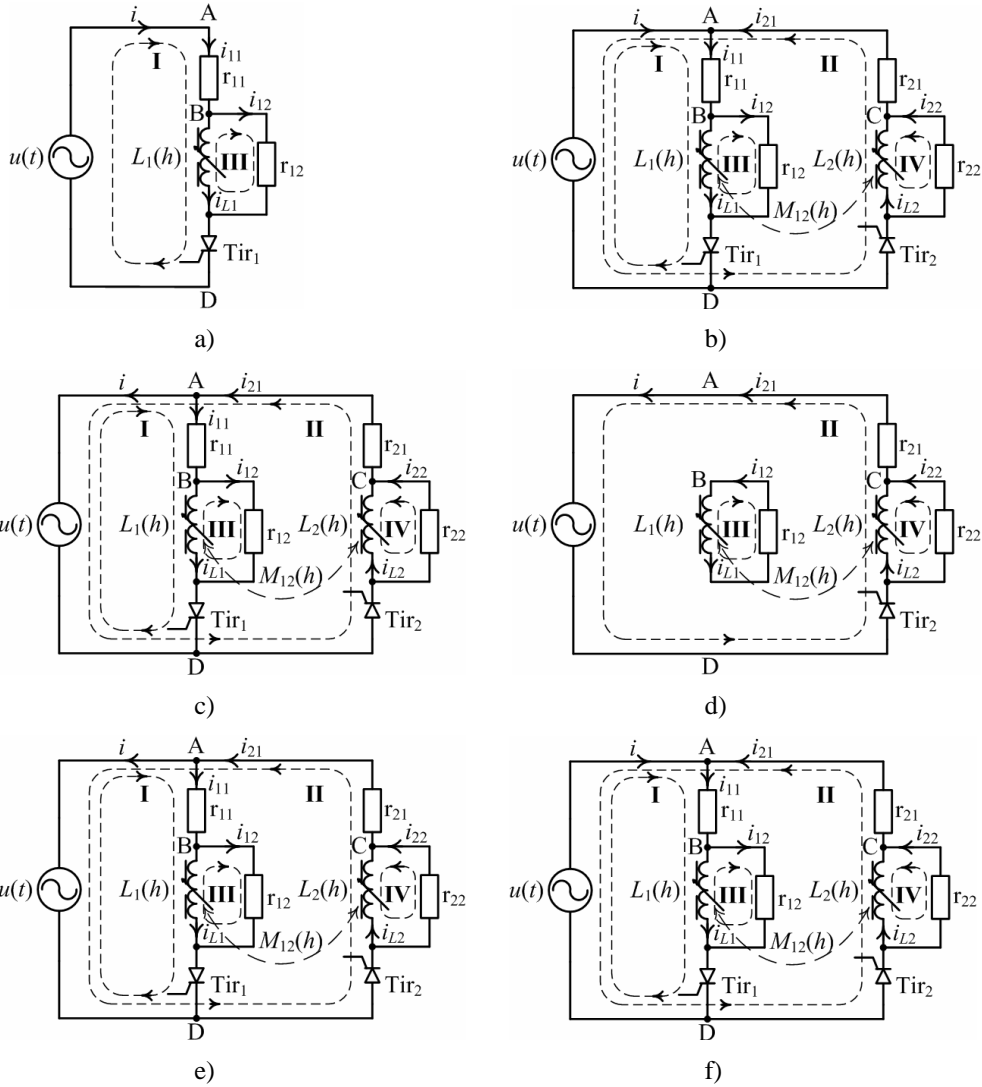
$$b(\alpha_{Tir}) = 1,05 - 0,0481\alpha_{Tir} + 0,000134\alpha_{Tir}^2 - 7,016 \cdot 10^{-7} \alpha_{Tir}^3, \quad (2.119)$$

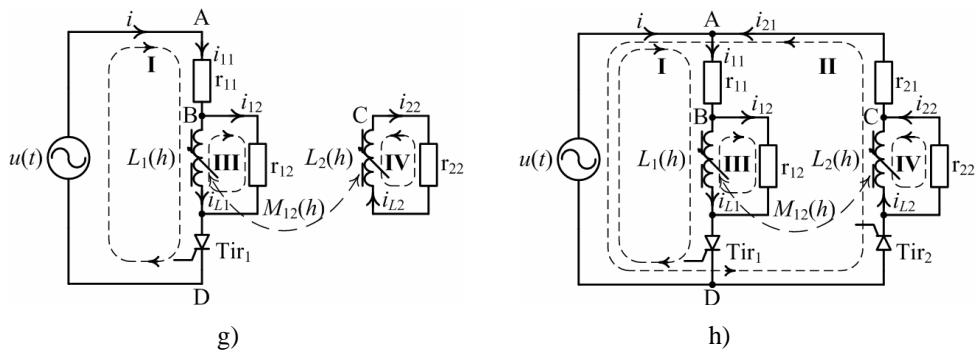
$$c(\alpha_{Tir}) = \frac{0,0127}{1 + 98,5e^{-0,0706\alpha_{Tir}}}, \quad (2.120)$$

$$d(\alpha_{Tir}) = \frac{1}{30500 - 354\alpha_{Tir} + 1,66\alpha_{Tir}^2}. \quad (2.121)$$

- schemoje tiristoriai užsidaro naudojant natūralią tiristorių komutaciją, kai apvijos šakos srovė tampa lygia nuliui;
- modeliuojant, tiristoriai gali būti valdomi sinchroniškai kartu, ir kiekvienas atskirai. Atskiro valdymo atvejis aktualus tuomet, kai atsiranda ŠJMI švytavių centro poslinkis, kurį siekiama sumažinti, skirtingai atidarant tiristorius. Eksperimento metu tiristoriai buvo valdomi sinchroniškai.

ŠJMI sistemos elektrinė posistemė susideda iš dviejų apvijų (2.17 pav.), valdomų tiristorių ir sinusinės įtampos maitinimo šaltinio. Nagrinėjama įtaiso elektrinės posistemės matematinio modelio kaita, kai keičiasi tiristorių darbo režimas. Diferencialinė lygčių sistema (2.80) galioja tada, kai srovės teka per abudu tiristorius Tir₁ ir Tir₂ t.y., kai egzistuoja 2.24 paveiksle pavaizduotos schemos b, c, e, f ir h. Įtaisu dirbant, elektrinės dalies schemos keičiasi tokiu eiliškumu:





2.24 pav. ŠJMĮ elektrinių schemų kaita darbo metu: a) – schema egzistuojanti tik paleidimo metu; b), c), e), f) ir h) – schemas, kai srovė teka per abu tiristorius ir jos skiriasi tuo, kad pereinant nuo vienos schemas prie kitos keičiasi bendrosios srovės i kryptis; d) ir g) – schemas egzistuoja, kai srovė teka per kuri nors vieną tiristorių Tir₁ arba Tir₂

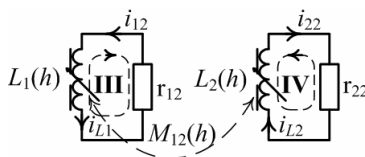
2.24 paveiksle, a pavaizduota schema egzistuoja tik paleidžiant variklį, ir jos diferencialinė lygtis yra panaši į (2.80) diferencialinių lygčių sistemos pirmąją lygtį, tik be apibusio induktyvumo:

$$L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} = - \left(\frac{r_{11}r_{12}}{r_{11} + r_{12}} + \frac{dL_1(h)}{dt} \right) i_{L1} + \frac{r_{12}}{r_{11} + r_{12}} (u(t) - u_{\text{Tir1}}(t, \alpha_{\text{Tir1}})). \quad (2.122)$$

2.24 paveiksle, d ir g pavaizduotos schemas egzistuoja, kai srovė teka per kuri nors vieną tiristorių Tir₁ arba Tir₂. Šių schemų diferencialinės lygtys gaunamos tokiu pat būdu kaip ir (2.80) lygčių sistema. 2.24 paveiksle d schemai pirmos eilės diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = - \left(r_{12} + \frac{dL_1(h)}{dt} \right) i_{L1} + \frac{dM(h)}{dt} i_{L2}, \\ -M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{dM(h)}{dt} i_{L1} - \left(\frac{r_{21}r_{22}}{r_{21} + r_{22}} + \frac{dL_2(h)}{dt} \right) i_{L2} + \\ + \frac{r_{22}}{r_{21} + r_{22}} (u(t) - u_{\text{Tir2}}(t, \alpha_{\text{Tir2}})). \end{cases} \quad (2.123)$$

2.24 paveiksle, g) schemai pirmos eilės diferencialinių lygčių sistema yra analogiška (2.123) – 1-oji lygtis įgauna (2.123) 2-osios lygties formą, o antroji lygtis – (2.123) 1-osios lygties formą. 2.24 paveiksle pavaizduota schemų seka, kai įtaisas dirba netrūkių srovių režime, o esant trūkių srovių režimui, neegzistuoja b), c), e), f) ir h) schemas ir atsiranda tarpinė teorinė schema tarp (2.25 pav.) schemų d ir g.



2.25 pav. Schema, egzistuojanti įtaisui dirbant trūkių srovių režime

2.25 paveiksle pateiktos schemos diferencialinių lygčių sistema sudaroma iš dviejų lygčių, kurios yra analogiškos (2.123) lygčių sistemos 1-osios lygties formai:

$$\begin{cases} L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = -\left(r_{12} + \frac{dL_1(h)}{dt}\right) i_{L1} + \frac{dM(h)}{dt} i_{L2}, \\ -M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{dM(h)}{dt} i_{L1} - \left(r_{22} + \frac{dL_2(h)}{dt}\right) i_{L2}. \end{cases} \quad (2.124)$$

ŠJMĮ tyrimas matematinio modeliavimu yra patogus būdas ištirti įtaiso darbo režimus, pereinamuosius ir kvazistacionarius vyksmus, energetines charakteristikas. Modeliavimo eigoje keičiasi ŠJMĮ elektrinės posistemės struktūros, pateiktos 2.24 ir 2.25 paveiksluose atitinkamai panaikinant elementus, kurių nebelieka diferencialinių lygčių sistemose (2.122)-(2.124). Matematinio modeliavimo pradinės sąlygos yra priimamos nulinės, o sekančio skaičiavimo žingsnio pradinės sąlygos, imamos iš praeito skaičiavimo žingsnio. Modeliavimo rezultatų analizė atliekama įtaiso nusistovėjusiam darbo režimui – panaudojant paskutinių kelių nusistovėjusio režimo periodų rezultatus.

Elektromagnetinė jėga. Elektromagnetinė jėga, veikianti įtaiso judžiąją dalį, analizuotina dviem atvejais – kai induktyvumo kitimas yra priklausomas nuo įtaiso švytavimų poslinkio arba nuo laiko:

$$\begin{aligned} f_{\text{elm}}(t, h) &= \frac{1}{2} i_{L1}^2 \frac{dL_1(h)}{dh} + \frac{1}{2} i_{L2}^2 \frac{dL_2(h)}{dh} + \frac{dM(h)}{dh} i_{L1} i_{L2} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{dL_1(h)}{dh} (i_{L1}^2 - i_{L2}^2) + \frac{dM(h)}{dh} i_{L1} i_{L2}, \end{aligned} \quad (2.125)$$

$$\begin{aligned} f_{\text{elm}}(t, v) &= \frac{1}{2} i_{L1}^2 \frac{dL_1(t)}{dt} \frac{1}{v} + \frac{1}{2} i_{L2}^2 \frac{dL_2(t)}{dt} \frac{1}{v} + \frac{dM(t)}{dt} \frac{1}{v} i_{L1} i_{L2} = \\ &= \frac{1}{v} \left(\frac{1}{2} \frac{dL_1(t)}{dt} (i_{L1}^2 - i_{L2}^2) + \frac{dM(t)}{dt} i_{L1} i_{L2} \right). \end{aligned} \quad (2.126)$$

Kadangi tiriamojo įtaiso abipusis induktyvumas nedidelis (4 skyrius), dėl apvijų tarpusavio statmeno išdėstymo, skaičiavimams naudojama išraiška:

$$f_{\text{elm}}(t, v) = \frac{1}{2} i_{L1}^2 \frac{dL_1(t)}{dt} \frac{1}{v} + \frac{1}{2} i_{L2}^2 \frac{dL_2(t)}{dt} \frac{1}{v} = \frac{1}{2} \frac{dL_1(t)}{dt} \frac{1}{v} (i_{L1}^2 - i_{L2}^2). \quad (2.127)$$

Pasinaudojus (2.106), (2.108) ir (2.110) lygtimis, gauta induktyviųjų srovių skirtumo priklausomybė nuo bendrosios grandinės srovės (įvertinant, kad simetriniame ŠJMĮ $r_{11}=r_{21}=r_1$ ir $r_{12}=r_{22}=r_2$):

$$i_{L1} - i_{L2} = \frac{1}{r_2} [i(r_1 + r_2) + u_{\text{Tir1}}(t, \alpha_{\text{Tir1}}) - u_{\text{Tir2}}(t, \alpha_{\text{Tir2}})]. \quad (2.128)$$

Kadangi, elektromagnetinė jėga yra proporcinga induktyvumų srovių kvadratų skirtumui, o bendroji srovė proporcinga tų srovių skirtumui, tai būtų galima teigti, kad elektromagnetinė jėga yra proporcinga bendrosios srovės kvadratui,

padaugintam iš koeficiento. Kiekvienas bendrosios srovės harmonikos amplitudės kvadratinis narys sukuria atitinkamos elektromagnetinės jėgos harmonikos amplitudę.

Ekspimento metu (4 skyrius) buvo nustatyta, kad esant trūkiųjų srovių režimui, įtaiso švytavimo poslinkio amplitudė yra nykstamai maža, todėl šis režimas nenagrinėtinas. Esant netrūkiųjų srovių režimui, bendroji grandinės srovė turi tik pirmąją ir trečiąją harmonikas, kurios sukuria bendrąją elektromagnetinę jėgą (2.127). Kaip minėta 2.1.1 poskyryje, mechaninė posistemė yra žemo dažnio filtras, todėl egzistuoja tik pirmoji švytavimų poslinkio harmonika. Kai įtaisas dirba nesimetriškai, atsiranda švytavimų centro poslinkis. Tuomet induktyviųjų srovių i_{L1} ir i_{L2} pirmosios harmonikos sukuria pirmąją bendrosios srovės harmoniką, (pagal I Kirchofo dėsnį ir (2.128)):

$$i = \frac{r_2(i_{L1} - i_{L2}) + u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2}) - u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1})}{(r_1 + r_2)}. \quad (2.129)$$

Pasinaudojant analogija su sūkiosiomis elektros mašinomis, kad elektromagnetinis momentas yra proporcingas srovės kvadratui, elektromagnetinę jėgą galima išreikšti taip [4]:

$$f_{elm}(t, v) = K_F(i, v)i^2(t); \quad (2.130)$$

čia $K_F(i, v)$ – jėgos koeficientas apskaičiuojamas iš mašinos duomenų. Tada elektromagnetinės jėgos 1-osios harmonikos amplitudė:

$$F_{elm.m.1} = K_{F1}I_{m.1}^2. \quad (2.131)$$

Taigi, galutinai ryšį tarp dvimasės sistemos švytavimų poslinkio ir srovės pirmųjų harmonikų amplitudžių, galima išreikšti (santykiniais vienetais):

$$h_{m.1}(\omega_1, C_{mech2}, R_{mech2}) = \frac{K_{F1}I_{m.1}^2}{H_m \sqrt{k_1(\omega_1)(C_{mech2}^2 + \omega_1^2 R_{mech2}^2) + k_2(\omega_1)C_{mech2} + k_3(\omega_1)R_{mech2} + k_4(\omega_1)}}. \quad (2.132)$$

Išraiška (2.132) taip pat panaudojama švytavimų centro poslinkio nustatymui, įvertinus nulinį dažnį ir bendrosios srovės nuolatinę dedamąją. Atsiradus papildomai išorinei jėgai F_p , įtaiso centro poslinkis sutampa su šios jėgos kryptimi, tačiau bendrosios srovės nuolatinės dedamosios I_0 kryptis yra priešinga. Šis reiškinys paaiškinamas tuo, kad pasislinkus JD kuria nors kryptimi pastovia centro poslinkio dedamąją, priešingos pusės elektrinės grandinės induktyvumas ir induktyvioji varža sumažėja, todėl priešingoje dvipusio įtaiso elektrinėje grandinėje atsiranda papildoma pastovi srovė. Induktyvumo padidėjimas buvo išnagrinėtas skaidant jį į harmonikas – esant centro poslinkiui, atsiranda ir induktyvumo pokytis ΔL_0 . Taip pat nagrinėjant dvimasę sistemą, nustatyta, kad papildomoji jėga, veikianti įtaiso JD veikia ir „statorių“, paslinkdama abi dalis absoliučiojo centro atžvilgiu (kuris yra susietas su nejudamu pagrindu), o reliatyviųjų švytavimų poslinkis yra mažesnis.

Vienmasės sistemos atžvilgiu, kai pats „statorius“ yra įtvirtintas, visas išorinės jėgos poveikis tenka JD ir esant tai pačiai išorinei jėgai būtų didesnis nei dvimasės. Atsiradus bendrosios srovės nuolatinėi dedamajai, yra sukuriama papildoma pastovi elektromagnetinė jėga $F_{\text{elm},0}$, kuri priešinasi centro išorinės jėgos poveikiui ir mažina švytavimų centro poslinkį. Šiuo atveju, priklausomybė tarp jėgos ir bendrosios srovės nuolatinės dedamosios yra tiesinė (buvo patvirtinta modeliuojant ir eksperimentiškai, nes nustatytas ryšys tarp bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir švytavimų centro poslinkio yra tiesinis, o proporcingumo koeficientas yra atvirkščias $C_{\text{mech}2}$).

Įvertinus (2.54)-(2.58), (2.132) ir tai kas pasakyta aukščiau, gaunamos įtaiso JD švytavimų centro poslinkio priklausomybės nuo išorinės pastovios jėgos ir bendrosios srovės nuolatinės dedamosios:

$$h_0(C_{\text{mech}2}, F_p) = \frac{F_p - F_{\text{elm},0}}{H_m C_{\text{mech}2}} \Rightarrow h_0(C_{\text{mech}2}, I_0) = -\frac{K_{F0} I_0}{H_m C_{\text{mech}2}}. \quad (2.133)$$

Išraiškos (2.132) ir (2.133) pilnai atspindi santykinės reliatyviųjų švytavimų poslinkio amplitudės priklausomybę nuo bendrosios srovės informatyviųjų harmonikų parametru – bendrosios srovės nuolatinės dedamosios I_0 ir bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės $I_{m,1}$. Įtaisu dirbant normaliomis sąlygomis ir be gedimų, įtaiso švytavimų poslinkio amplitudę pilnai apsprendžia (2.132) išraiška. Minėtieji sąryšiai taikytini įtaiso valdymo sistemoje nustatant įtaiso judžiosios dalies amplitudę ir švytavimų centro poslinkį. Aukštesniosios srovės harmonikos sukuria aukštesniąsias jėgos harmonikas, kurios „nufiltruojamos“ dėka mechaninės posistemės žemo dažnio filtro savybės, todėl jų galima nevertinti.

Taigi, atlikus elektromagnetinės ir galios keitiklio posistemių (bendros elektrinės posistemės) analizę ir įvertinimą, buvo:

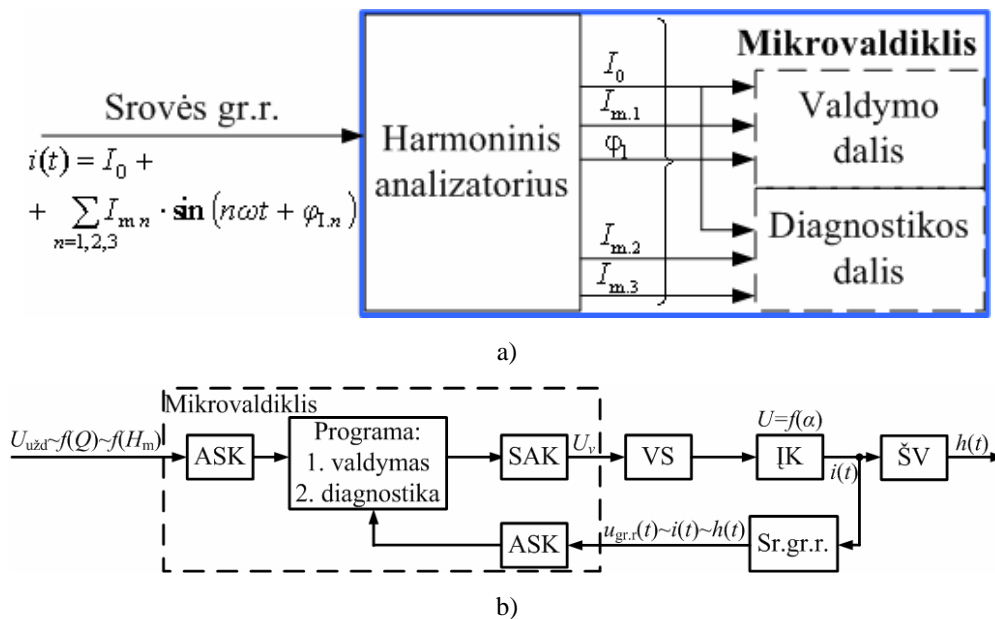
- sudaryta dvipusio simetrinio ŠJMĮ elektromagnetinės ir galios keitiklio posistemių matematinio modelio diferencialinių lygčių sistema, įvertinanti: sinusinį apvijų induktyvumą kitimą, abipusį induktyvumą, modelio kaitą priklausomai nuo tiristorių veikos; apvijų varžą, ekvivalentinę varžą, įvertinančia nuostolius magnetinėje grandinėje. Išanalizuotas induktyvumą ištiesinimas, panaudojant sinusinių ir kosinusinių funkcijų pakeitimą begalinėmis eilutėmis; induktyvumą išskaidymas harmonikomis ir induktyvumo harmonikų fazių sąryšis su švytavimų poslinkio pirmosios harmonikos faze. Išanalizuota elektromagnetinė jėga ir sudarytas sąryšis tarp įtaiso santykinės reliatyviųjų JD švytavimų poslinkio amplitudės ir bendrosios srovės pirmosios harmonikos (teigiamas netiesinis ryšys – kvadratinis). Sudarytas sąryšis tarp švytavimų centro poslinkio ir bendrosios srovės nuolatinės dedamosios (neigiamas tiesinis ryšys).

2.1.3. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso valdymo posistemė ir srovės informacijos panaudojimas įtaiso valdymui

Bendroji srovė i suteikia informaciją apie variklio švytavimų centro poslinkį – jei bendroji srovė neturi nuolatinės dedamosios, tai ŠJMĮ sistema dirba simetriškai ir švytavimų centro poslinkis lygus nuliui. Priešingu atveju ŠJMĮ sistemos švytavimų

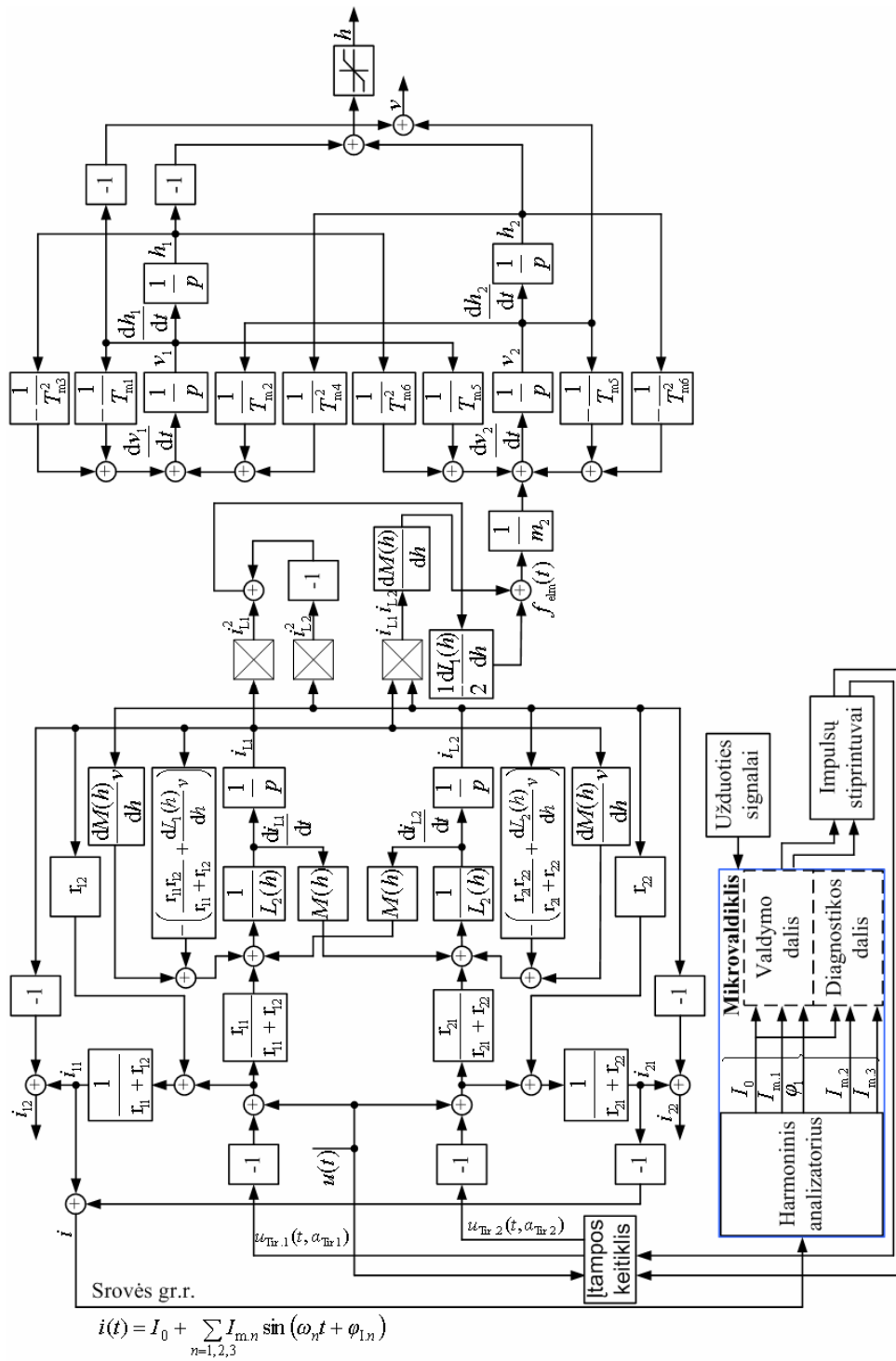
centras yra pasislinkęs į vieną arba kitą pusę nuo geometrinio švytavimų centro. Priklausomai nuo srovės nuolatinės dedamosios ženklo ir dydžio, informacijos valdymo sistema nustato švytavimų centro poslinkio dydį ir kryptį.

Pradiniu priartėjimu buvo priimta, kad informatyviosios harmonikos yra nuolatinė dedamoji, pirmosios penkios nelyginės bendrosios srovės harmonikos ir jų fazės. Tačiau, remiantis analitiniais skaičiavimais šiame skyriuje bei modeliavimo ir eksperimento rezultatais, buvo nustatyta, kad informaciją valdymui suteikia tik 1-oji bendrosios srovės harmonika ir nuolatinė bendrosios srovės dedamoji. Kitos šios srovės harmonikos, nors ir sukuria įtaiso judžiąją dalį veikiančios jėgos aukštesniąsias harmonikas, tačiau tai nesukuria aukštesniųjų švytavimų poslinkių harmonikų (2.8 ir 2.9 pav.). Nustatyta, kad bendrosios srovės nuolatinė dedamoji, antroji (jei atsiranda grandinėje) ir trečioji harmonikos naudotinos ŠJMĮ gedimų nustatymui. Tuomet bendrosios srovės grįžtamojo ryšio signalą galima galutinai sudaryti panaudojant tik pirmąsias tris harmonikas ir nuolatinę dedamąją, kaip pateikta 2.26 paveiksle (a).

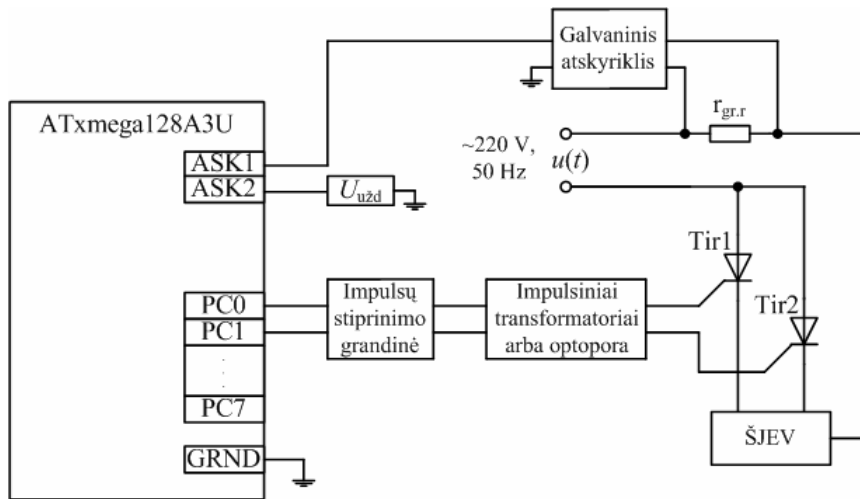


2.26 pav. a) srovės grįžtamojo ryšio signalo apdorojimo sistema ir informatyvieji srovės harmonikų parametrai; b) supaprastinta ŠJMĮ struktūrinė schema (IK – įtampos keitiklis, ŠV – švytuojamojo judesio variklis, VS – keitiklio valdymo blokas, ASK ir SAK – analoginiai skaitmeniniai ir skaitmeniniai analoginiai keitikliai)

Įvertinant pateiktas prielaidas ir nustatytus dėsningumus dėl harmonikų skaičiaus įvertinimo, sudaroma supaprastinta įtaiso funkcinė-struktūrinė schema su valdymo posisteme. Supaprastinta mechatroninio įtaiso funkcinė-struktūrinė schema pateikta su srovės grįžtamoju ryšiu 2.26 paveiksle (b), o 2.27 paveiksle pateikta bendra ekvivalentinė struktūrinė schema su elektrine, mechanine ir valdymo posistemėmis.



2.27 pav. Ekvivalentinė ŠJMĮ struktūrinė schema, įvertinanti visas posistemes



2.28 pav. Supaprastinta galios ir valdymo grandinės schema panaudojant Atxmega128A3U

Valdymo sistema atlieka keturias pagrindines funkcijas – ŠJMĮ švytavimų poslinkio nustatymą, jos valdymą, įtaiso būklės stebėseną ir gedimų nustatymą. Nuolatinę dedamąją galima išskirti tam tikslui panaudojant žemo dažnio filtrą arba atlikus Furjė transformaciją mikrovaldikliu, išskiriant srovės grįžtamojo ryšio vidutinę vertę, kuri ir yra lygi nuolatinėi bendrosios srovės dedamajai. Bendrosios srovės 1-oji ir aukštesniosios harmonikos (2-oji ir 3-oji) nustatomos analizuojant signalą ir atliekant greitąją Furjė transformaciją. Atliekant Furjė transformaciją skaitmeninėje sistemoje yra svarbi jos greیتaveika, todėl signalo diskretizavimo dažnis turi būti ne mažiau kaip du kartus didesnis už sistemos praleidžiamą dažnį. Kadangi trečiosios harmonikos dažnis yra 150 Hz, tai mažiausias diskretizavimo dažnis lygus 300 Hz. Tuomet bendrosios srovės grįžtamojo ryšio didžiausia diskretizavimo laiko pastovioji turi būti ne didesnė kaip 0,0033 s. Atliekant modeliavimą diskretizavimo konstanta buvo priimta lygi 0,0005 s, nes skaičiavimai buvo atliekami iki 10-osios harmonikos (500 Hz, tuomet didžiausia diskretizavimo konstanta – 0,001 s). Pirmąsias tris harmonikas taip pat galima nustatyti panaudojant atitinkamo dažnio juostinius filtrus (50, 100 ir 150 Hz).

Algoritmo atlikimo sparta priklauso nuo mikrovaldiklio greیتaveikos, tačiau vertinant šiuolaikinių mikrovaldiklių greیتaveiką (taktinis dažnis siekia iki 32 MHz (kaip pavyzdys Atmel firmos AVR mikrovaldikliai Atxmega128A3U, 2.28 pav.)), tai skaičiavimo apimties atžvilgiu, valdymo vėlinimas netrunka ilgiau kaip pusę švytavimų pusperiodžio. Dėl GFT panaudojimo analizuojant bendrosios srovės harmonikas yra būtinas atminties kiekis, kuris talpina viso periodo duomenų informaciją, kuri atnaujinama kas pusę pusperiodžio, t.y. kas 0,005 s.

Grįžtamojo ryšio signalo, kurio svarbus ne tik dydis, bet ir forma, panaudojimas, atliekamas šiais techniniais sprendimais:

- grįžtamasis ryšys realizuojamas panaudojant tikslų šuntą arba Holo jutiklį;
- srovės grįžtamojo ryšio signalas jungiamas prie 12 bitų analoginio-skaitmeninio signalo keitiklio įėjimo, kurio atraminė įtampa priklauso nuo

mikroschemos maitinimo įtampos (nagrinėjama atveju – 3,6 V, tada įėjimo lygis yra 1,8 V). Kadangi grįžtamasis signalas yra kintamasis nesususintinis dydis, tai keitiklis signalą keičia su ženklu (raiška – nuo -2047 iki +2047). Didžiausias keitiklio diskretizavimo dažnis – 2 MHz. Srovės grįžtamojo signalo keitimui iki 3-osios harmonikos imtinai, pagal Naikvisto sąlygą, reikalingas mažiausias diskretizavimo dažnis yra 300 Hz – minėtieji keitikliai šią sąlygą tenkina. Diskretizavimo procesas sudaro ne mažiau kaip 5 μ s vėlinimą. Taip pat pažymėtina, kad jėga (kaip ir srovė) lenkia švytvimų poslinkio signalą ne mažiau kaip puse pusperiodžio (esant rezonansiniam darbui), todėl valdant pagal srovės signalą galimas ne mažesnis kaip pusės pusperiodžio laiko intervalas signalo korekcijai;

- siekiant sumažinti gedimų tikimybę srovės grįžtamasis ryšys yra galvaniskai atskiriamas (optoporomis arba impulsiniais transformatoriais) nuo mikrovaldiklio sistemos ir visos valdymo dalies;

- atlikus valdymo programą tiristoriams formuojami impulsai, kurie sustiprinami (galima tranzistoriniu stiprinimo kaskadu). Tiristoriai uždaromi panaudojant natūralią uždarymo komutaciją tinklo įtampa;

- tiristorių valdymo signalų sinchronizavimas su tinklo įtampa atliekamas panaudojant per žeminantį transformatorių į ASK keitiklį paduodamą maitinančios įtampos signalą ir nulio nustatymo grandinę.

Užduoties signalo formavimas dažniausiai taip pat atitinka analoginį signalą, kuriam naudotinas skaitmeninis analoginis keitiklis (2.26 pav. b). Technologinių parametrų nustatymui – slėgiui ir debitui, naudojami analoginiai jutikliai (slėgio matuokliai ir debitmačiai) su analoginiu arba skaitmeniniu signalo išėjimu.

Valdymo algoritmas susideda iš kelių etapų (2.29 pav.):

1. Paruošiamasis:

- į mikrovaldiklio atmintį įrašomi ŠJMĮ mechaninės posistemės duomenys – $m_1, m_2, C_{\text{mech1}}, R_{\text{mech1}}, \text{nominalūs } C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}}$ ir K_F ;

- atliekamas koeficientų $k_1(\omega_1), k_2(\omega_1), k_3(\omega_1), k_4(\omega_1), k_5(\omega_1), k_6(\omega_1), k_7(\omega_1), k_8(\omega_1)$ apskaičiavimas ir įrašymas į atmintį.

2. Valdymas ir stebėseną:

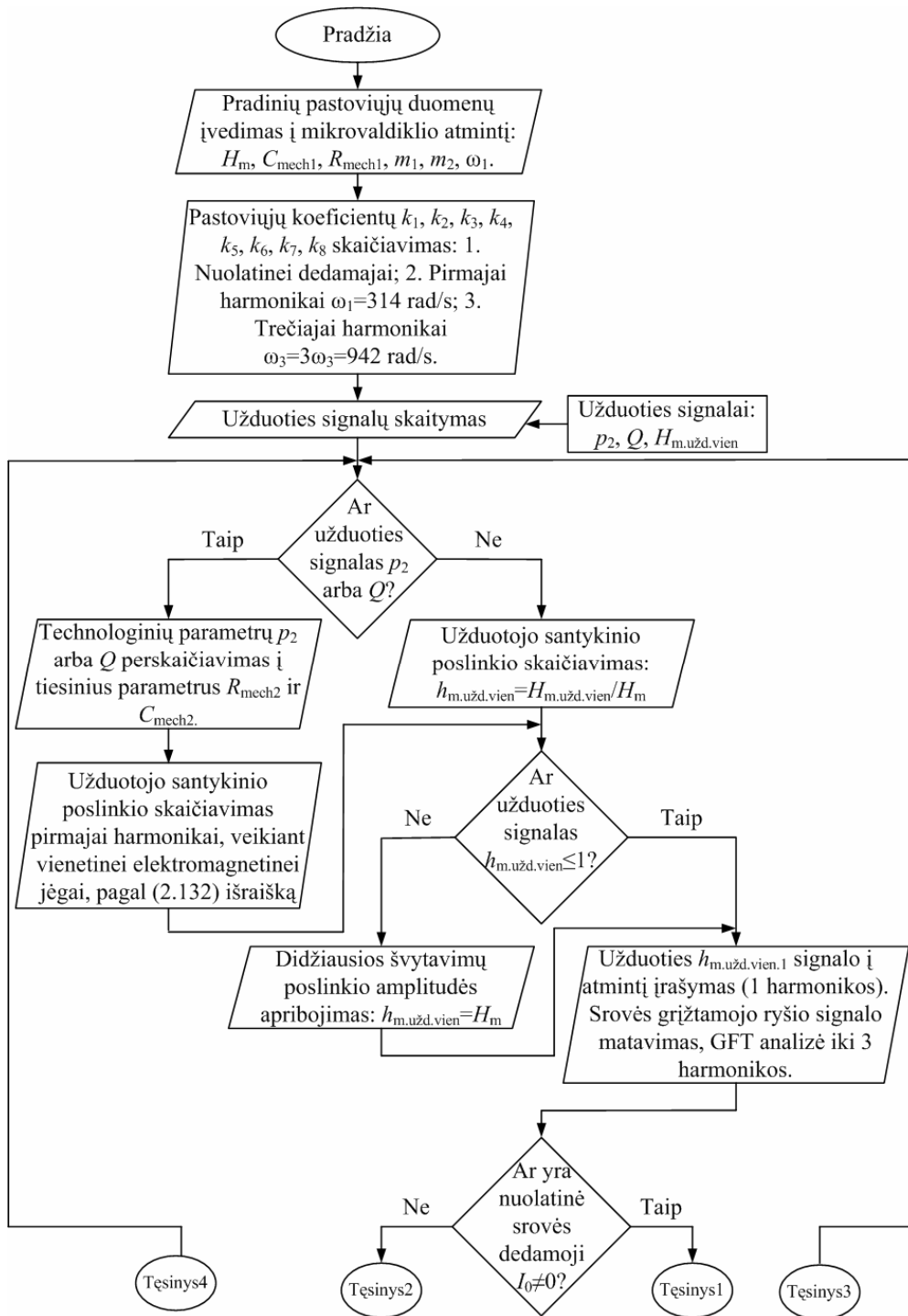
- skaitomi užduoties signalai (H, p, Q);

- apskaičiuojamos mechaninės posistemės parametrų R_{mech2} ir C_{mech2} vertės ir švytvimų poslinkio pirmosios harmonikos amplitudė $H_{m,1}$ (pagal išraiškas 2.1-2.3 ir 4.3), pagal užduoties signalų p ir Q vertes;

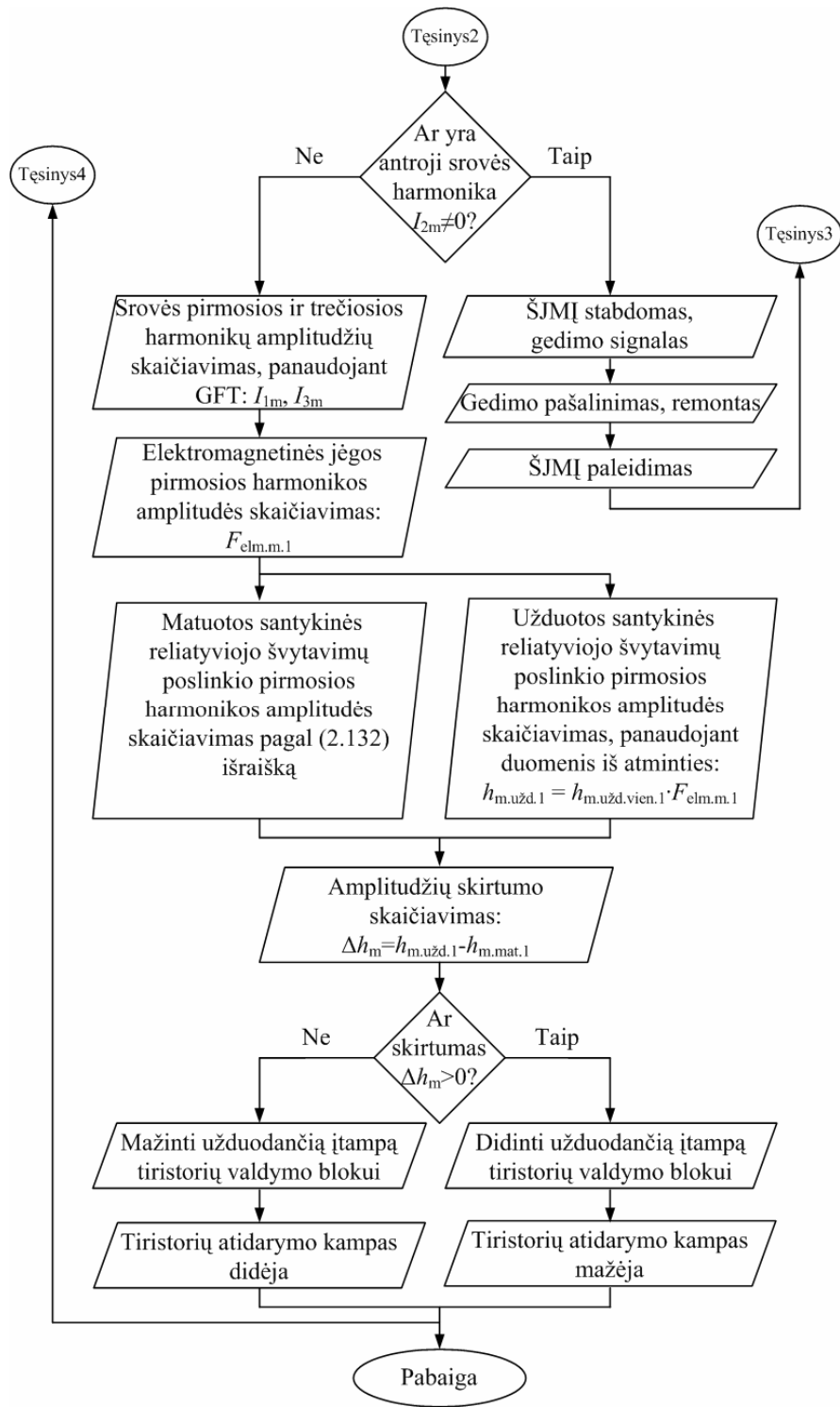
- atliekamas užduoties signalo – švytvimų poslinkio 1-osios harmonikos amplitudės $H_{m,1}$ palyginimas su didžiausia judžiosios dalies švytvimų poslinkio amplitudė H_m . Esant sąlygai $H_{m,1} \geq H_m$, mikrovaldiklio programa nustato valdymo signalo vertę proporcingą H_m ;

- panaudojant išraišką (2.132) apskaičiuojamas bendrosios srovės 1-osios harmonikos amplitudės kvadratas, pagal koeficientų ($k_1(\omega_1), k_2(\omega_1), k_3(\omega_1), k_4(\omega_1), k_5(\omega_1), k_6(\omega_1), k_7(\omega_1), k_8(\omega_1)$) ir užduotų parametrų ($m_1, m_2, C_{\text{mech1}}, R_{\text{mech1}}, C_{\text{mech2}}$ ir R_{mech2}, K_F) vertes;

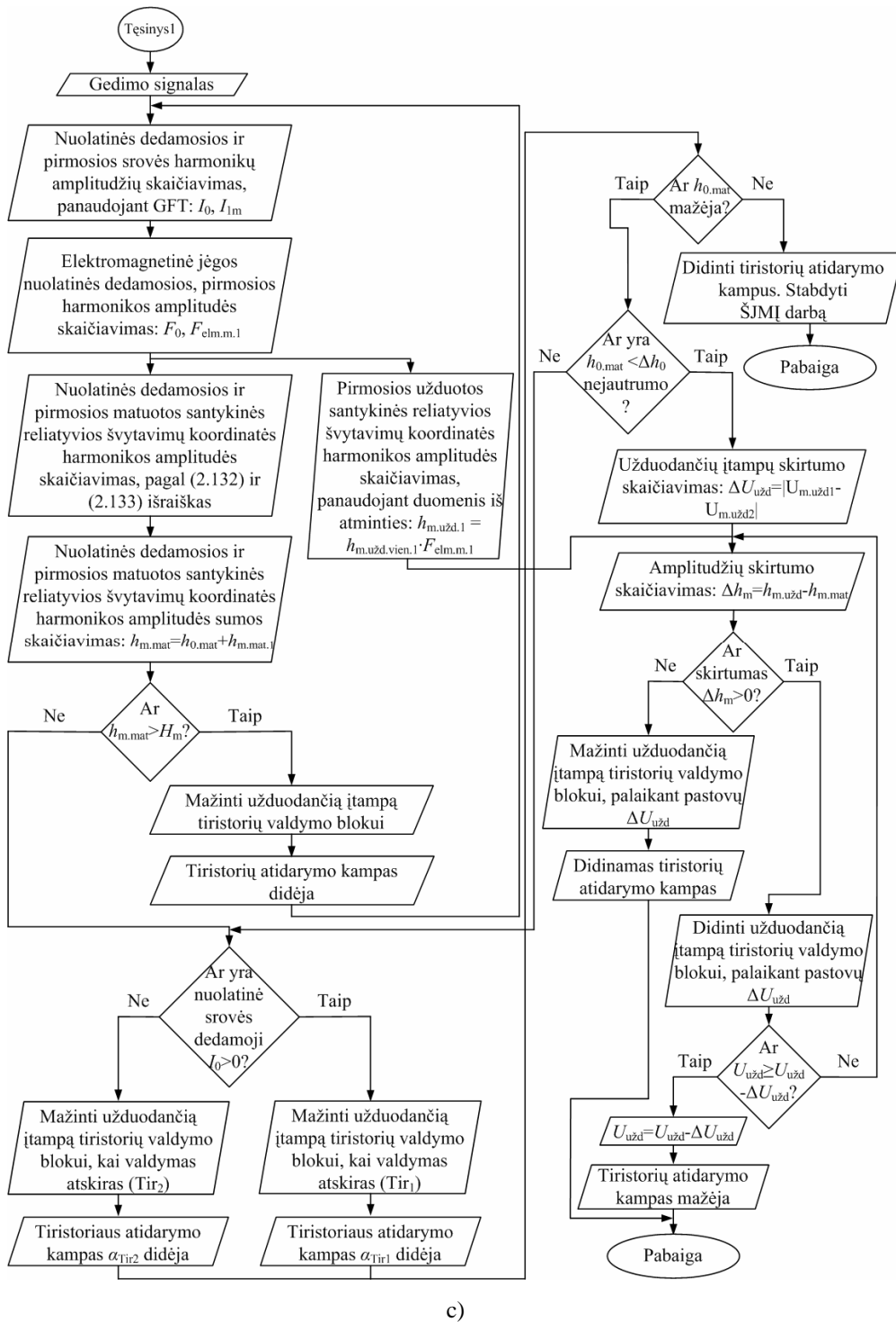
- apskaičiuotoji bendrosios srovės 1-osios harmonikos kvadrato vertė palyginama su grįžtamojo ryšio signalo – bendrosios srovės pirmosios harmonikos kvadrato verte;



a)



b)



c)

2.29 pav. ŠJMĮ valdymo posistemės algoritmas ir gedimų nustatymo dalis

- priklausomai nuo užduotojo ir grįžtamojo signalų skirtumo ženklų, didinamas (neigiamas skirtumas) arba mažinamas (teigiamas skirtumas), tiristorių atidarymo kampas, kol skirtumas tampa lygus nuliui;

- stebėseną atliekama visada po valdymo operacijų, ir periodiškai nusistovėjusio darbo metu. Stebėsenai atlikti naudojami bendrosios srovės nuolatinė dedamoji, antroji ir trečioji harmonikos;

- atsiradus nuolatinėi srovės dedamajai įtaisas nestabdomas, tačiau siekiama, didinant tiristorių atidarymo kampus iki 90°, sumažinti švytavimų centro poslinkį. Panaudojant išmatuotą nuolatinės srovės dedamąją apskaičiuojamas (2.132 ir 2.133) atsiradęs švytavimų centro poslinkis. Pagal bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ženklą nustatoma, kuris iš tiristorių turi būti labiau atidaromas. Tiristoriaus, kurio šakoje yra didesnė nuolatinė srovės dedamoji, kampas turi būti mažesnis, nei kitos šakos tiristoriaus. Tiristoriaus atidarymo kampas mažinamas tol, kol padvigubėja nuolatinė srovės dedamoji, tuomet išlaikant kampų skirtumą mažinami abiejų tiristorių atidarymo kampai. Jei problema išlieka, įtaisas yra stabdomas. Bet kuriuo atveju, stebėsenos sistema, pagal bendrosios srovės nuolatinę dedamąją ir kitas harmonikas pateikia gedimo informaciją;

- atsiradus bendrojoje srovėje antrajai harmonikai, įrenginys iš karto stabdomas (pateikiamas gedimo pranešimas pagal indikacijas, pateiktas 5 priede);

- įtaisas paleidžiamas arba stabdomas atitinkamai sklandžiai mažinant arba didinant tiristorių atidarymo kampus. Pasiekus 80 procentų užduoties signalo, valdymo sistema pradeda įtaiso valdymą (paleidžiant), pagal technologinių procesų nustatytus parametrus. Tai negalioja avariniam stabdymui.

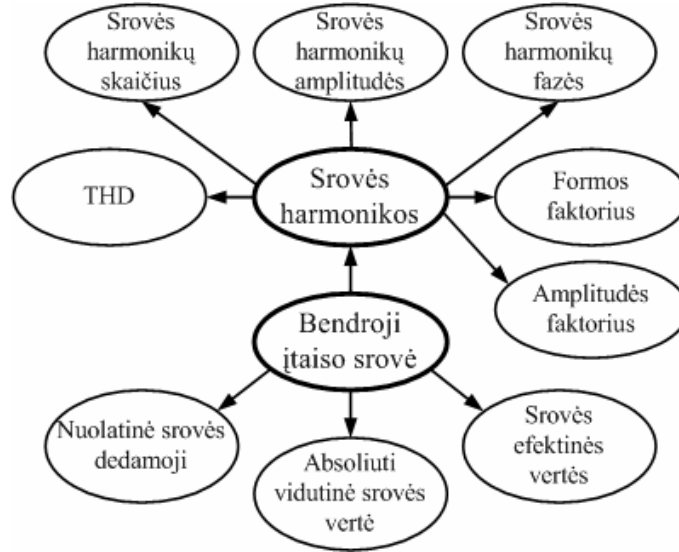
Taigi, poskyryje pateikta ŠJMI bendroji struktūra, įvertinanti visas posistemas, valdymo ir stebėsenos algoritmas, jo įgyvendinimo priemonės ir seka, pagrįsta bendrosios srovės informacijos panaudojimu.

2.2. Bendrosios srovės spektro informacijos panaudojimas švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso diagnostikai

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendrosios srovės informacija panaudojama ne tik šio įtaiso valdymui, bet ir jo gedimų nustatymui. Kaip jau buvo minėta pirmame skyriuje, dauguma diagnostikos metodų yra skirti įprastinėms sukiosioms elektros mašinoms. Švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų arba vykdyklių diagnostika nėra plačiai išnagrinėta. Kadangi, informacijai apie įtaiso švytavimų poslinkio amplitudę gauti valdymo sistema naudoja srovės grįžtamąjį ryšį, tai tą patį signalą galima panaudoti ir gedimų nustatymui. Gedimų nustatymui analizuojama bendrosios srovės informacija. Visi pirmame skyriuje minėti gedimų nustatymo metodai, susiję su srovės panaudojimu informacijai gauti (VSPA metodas), atlieka įtaiso srovės spektrinę analizę, panaudojant vienokią ar kitokią transformaciją. Tačiau be spektro informacijos, galimi ir kiti parametrai, kurie teikia informaciją apie signalo formą ir iškraipymus (2.30 pav.):

- srovės harmonikų skaičius;
- srovės formos faktorius;
- srovės amplitudės faktorius;
- srovės efektinė vertė;

- absoliuti srovės efektinė vertė;
- nuolatinė srovės dedamoji;
- THD (angl. Total harmonics distortion) – harmonikų iškraipymo koeficientas;
- taip pat informacijai gali būti naudojamos ne tik absoliučiosios, bet ir santykinės srovės harmonikų amplitudžių vertės.



2.30 pav. Bendrosios srovės informacinė aibė

Įtaiso valdymo sistemoje atliekama GFT, todėl įtaiso diagnostikoje yra naudojama tik įtaiso harmonikų amplitudžių informacija. Dėl bendrojoje srovėje nykstantai mažų 4-osios ir aukštesnių srovės harmonikų amplitudžių, jų panaudojimas įtaiso diagnostikoje yra kompliktuotas. Kaip jau buvo pateikta sistemos valdymo ir stebėsenos algoritme, diagnostikoje yra naudojamos tik pirmosios trys harmonikos ir nuolatinė srovės dedamoji. Taip pat gedimai yra analizuojami po vieną, t.y. priimta prielaida, kad dviejų, kartu atsirandančių, gedimų nebūna. Atlikus analizę ir modeliavimą diagnostikos objektui – ŠJMĮ, sudarytos gedimų ir jų indikacijų, bendrojoje srovėje, aibės (pateikiamos darbo 5 priede lentelių pavidalu). Įtaiso gedimų aibę E galima suskirstyti į poaibes, pagal įtaiso posistemės:

- mechaninės posistemės gedimų poaibė $E_{1,i}$, sudaryta iš 19 gedimų;
- elektromagnetinės posistemės gedimų poaibė $E_{2,i}$, sudaryta iš 6 gedimų;
- galios keitiklio posistemės gedimų poaibė $E_{3,i}$; sudaryta iš 5 gedimų;
- valdymo posistemės, skirtos tiristoriniam įtampos keitikliui, gedimų poaibė $E_{4,i}$, sudaryta iš 8 gedimų.

Pagal gedimų indikacijas bvo nustatyta, kad:

- gedimai, kurie susiję su temperatūriniais įtaiso darbo režimo pasikeitimais į neigiamą pusę, įtaisui leidžia laikinai dirbti padidinus tiristorių atidarymo kampus, tačiau ilgalaikis darbas neleistinas;

- gedimai, kurie susiję su nuolatinės srovės dedamosios atsiradimu, suteikia galimybę atlikti dvi užduotis – padidinti valdymo kampus ir stabdyti įtaisą arba stabdyti įtaisą avariniu būdu;

- gedimai, kurių metu bendrojoje srovėje atsiranda antroji harmonika, yra žalingi ir įtaisą turi būti stabdomas avariniu būdu;

- esant judžiosios dalies „daužymuisi“ į „statorių“ srovės formoje atsiranda srovės šuoliai, indikuojantys gedimą [116].

Remiantis priedo nr. 5 lentelėmis 5.1-5.4 galima užprogramuoti mikrovaldiklį analizuoti švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso gedimus pagal bendrosios srovės ir technologinių parametrų informaciją, nustatant jų tikrinimo seką. Taip pat nustatyta, kad vien srovės spektro informacijos, panaudojant tik pirmąsias tris harmonikas ir nuolatinę dedamąją, neužtenka, todėl būtinas didesnis indikacijų kiekis, kaip pateikta 2.30 paveiksle.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

Atlikus ŠJMĮ analitinį įvertinimą ir posistemų analizę, buvo nustatyta arba sudaryta:

- ŠJMĮ išskaidytas į mechaninę, elektromagnetinę, galios keitiklio ir valdymo posistemas. Suskaidymas suteikė galimybę struktūrizuoti įtaiso tyrimą.

- Sudarytas įtaiso ištiesintos mechaninės posistemės diferencialinių lygčių matematinis modelis ir struktūra, įvertinantys įtaiso dvimasės bespyruoklės sistemos parametrus – judžiosios dalies ir „statoriaus“ mases, „statoriaus“ pakabos ir kompresoriaus ekvivalentinės spyruoklės standžius, trintis tarp „statoriaus“ ir aplinkos, tarp „statoriaus“ ir judžiosios dalies; ekvivalentinę aktyviąją kompresoriaus varžą, judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės apribojimą. Mechaninės posistemės matematinis modelis leidžia apskaičiuoti įtaiso judžiosios dalies absoliučiuųjų ir reliatyviųjų švytavimų kinematinius kintamuosius – švytavimų poslinkius $h_2(t)$ ir $h(t)$, švytavimų greičius $v_2(t)$ ir $v(t)$, švytavimų pagreičius $a_2(t)$ ir $a(t)$, taip pat „statoriaus“ absoliučiuųjų švytavimų kinematinius kintamuosius – švytavimų poslinkį $h_1(t)$, švytavimų greitį $v_1(t)$, švytavimų pagreitį $a_1(t)$.

- Ištiesintos mechaninės posistemės kintamiesiems – judžiosios dalies ir „statoriaus“ absoliučiuųjų ir judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkiams, greičiams ir pagreičiams, sudarytos perdavimo funkcijos nuo elektromagnetinės jėgos. Visų perdavimo funkcijų charakteringoji lygtis yra ketvirtosios eilės. Nustatyta, kad dvimasės mechaninės posistemės reliatyviųjų švytavimų poslinkio perdavimo funkcija elektromagnetinės jėgos atžvilgiu, yra antrosios eilės, kai $C_{\text{mech2}} \ll C_{\text{mech1}}$ ($C_{\text{mech2}} = 27328 \text{ N/m}$, esant rezonansiniam dažniui) ir $\omega \gg \omega_{\text{rez}}$ ($\omega_{\text{rez}} = 314 \text{ rad/s}$), ir sistema analizuotina kaip vienasė. Kai minėtos sąlygos netenkinamos, sistemą būtina nagrinėti kaip dvimasę. Pasinaudojus perdavimo funkcijomis sudaryta nauja universali dvimasės mechaninės posistemės apkrovos varžos $|Z_{\text{mech}}(j\omega_n)|$ analitinė priklausomybė nuo sistemos parametrų – judžiosios dalies ir „statoriaus“ masių m_2 ir m_1 , pakabos spyruoklės ir ekvivalentinės „oro spyruoklės“ standžių C_{mech1} ir C_{mech2} , apkrovos aktyviųjų varžų R_{mech2} ir R_{mech1} , taip pat nuo dažnio ω_n . Remiantis šia priklausomybe sudarytos įtaiso mechaninės charakteristikos $h_{m,n} = f(\omega_n, C_{\text{mech2}}, R_{\text{mech2}})$ švytavimų centro poslinkiui ir 1-osios

harmonikos amplitudei. Šiomis priklausomybėmis analitiniu būdu galima apskaičiuoti įtaiso švytavimų poslinkio (taip pat greičių bei pagreičių) amplitudę bet kokiam įtaiso ištiesintos apkrovos parametru rinkiniui, dažniui ir elektromagnetinei jėgai. Taip pat sudarytos universalios fazinės apkrovos varžos charakteristikos, leidžiančios analitiniu būdu nustatyti švytavimų poslinkių, greičių ir pagreičių fazes elektromagnetinės jėgos atžvilgiu bet kokiam įtaiso ištiesintos apkrovos parametru rinkiniui ir dažniui.

- Nustatytos įtaiso mechaninės posistemės stabilumo sąlygos panaudojant analitinį Hurvico stabilumo kriterijų. Pagrindinė stabilumo sąlyga – įtaiso mechaninės pakabos standis (C_{mech1}) turi būti lygus arba mažesnis už ekvivalentinės „oro spyruoklės“ standį ($C_{\text{mech2}} \geq C_{\text{mech1}}$). Kuo skirtumas didesnis, tuo švytavimų poslinkio amplitudė mažiau priklauso nuo C_{mech2} .

- ŠJMĮ mechaninė posistemė yra žemo dažnio filtras, todėl aukštesniosios (3-oji, 5-oji ir t.t.) elektromagnetinės jėgos harmonikos nesukuria įtaiso judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkio aukštesniųjų harmonikų. Įtaiso lyginės harmonikos mechaninėje posistemėje neegzistuoja dėl įtaiso simetriškumo. Tuo remiantis, nustatyta, kad įtaiso JD švytavimų poslinkio amplitudę pilnai apibūdina tik pirmoji švytavimų harmonika (kai nėra švytavimų centro poslinkio). Trečioji švytavimų poslinkio harmonikos amplitudė, ties rezonansiniu dažniu, veikiant 30 N elektromagnetinei jėgai, yra 50 kartų mažesnė už pagrindinę švytavimų poslinkio harmoniką. Įtaiso JD švytavimų centro poslinkis atsiranda veikiant papildomai pastoviai išorinei jėgai arba įvykus įtaiso gedimui.

- Palyginus vienas ir dvimasės sistemos parametrus ir mechanines charakteristikas, nustatyta, kad esant mažoms aktyviosios apkrovos parametru vertėms ($R_{\text{mech2}} \leq 10 \text{ Ns/m}$ ir $C_{\text{mech2}} \gg C_{\text{mech1}}$ ($C_{\text{mech2}} = 27328 \text{ N/m}$; $C_{\text{mech1}} = 500 \text{ N/m}$)), amplitudės paklaidos keičiasi nuo -93% iki -10%, didinant R_{mech2} paklaidos nusistovi ir esant $C_{\text{mech2}} > C_{\text{mech1}}$ sudaro 7,3%.

- Sudarytas švytavimų poslinkio amplitudės pilnasis diferencialas nuo apkrovos parametru R_{mech2} ir C_{mech2} , parodantis neigiamą švytavimų poslinkio amplitudės pokytį ir pokyčio spartą.

- Sudarytos mechaninės posistemės rezonansinių dažnių priklausomybės nuo posistemės parametru. Sudarytos dvimasės sistemos „statoriaus“ ir JD rezonansinių dažnių priklausomybės nuo parametru yra atvirkštinės – mažinant parametru vertes, rezonansiniai dažniai didėja. Taip pat nustatyta, kad dvimasės sistemos amplitudinės dažninės charakteristikos turi tris rezonansinius dažnius, kurių vienas yra pagrindinis – judžiosios dalies ω_{rez2} , antras – „statoriaus“ ω_{rez1} , trečiasis ir ketvirtasis $\omega_{\text{Zmech.slp1}}$ ir $\omega_{\text{Zmech.slp2}}$ – rezonansiniai švytavimų slopinimo dažniai, esantys tarp „statoriaus“ ω_{rez1} ir JD švytavimų ω_{rez2} dažnių. Analitiniu būdu apskaičiuoti tokie rezonansiniai dažniai (esant parametrams $m_1 = 3,6 \text{ kg}$, $m_2 = 0,3 \text{ kg}$, $C_{\text{mech1}} = 500 \text{ N/m}$, $C_{\text{mech2}} = 27328 \text{ N/m}$): $\omega_{\text{rez1}} = 11 \text{ rad/s}$ (1,75 Hz), $\omega_{\text{rez2}} = 314 \text{ rad/s}$ (50 Hz), $\omega_{\text{Zmech.slp1}} = 12 \text{ rad/s}$ (1,91 Hz), $\omega_{\text{Zmech.slp2}} = 91 \text{ rad/s}$ (14,5 Hz).

- Sudarytos analitinės išraiškos tikslioms dvimasės sistemos parametru R_{mech2} ir C_{mech2} vertėms nustatyti, kai kiti mechaninės posistemės parametrai – m_1 , m_2 , R_{mech1} , C_{mech1} , ω_n , yra pastovūs. Naudojantis išraiškomis analitiniu būdu nustatomi optimalūs sistemos apkrovos parametrai esant pastoviam maitinimo dažniui, kuris

yra 50 Hz. Remiantis jomis, nustatyta $C_{\text{mech2}} = 27328 \text{ N/m}$, kai įtaiso parametrai atitinka fizinio modelio parametrus ($m_1 = 3,6 \text{ kg}$, $m_2 = 0,3 \text{ kg}$, $C_{\text{mech1}} = 500 \text{ Nm}$). Mechaninės posistemės aktyviosios varžos turi tik nežymią įtaką C_{mech2} skaičiavimui (pakeitus R_{mech2} nuo 10 Ns/m iki 50 Ns/m, $\Delta C_{\text{mech2}} = 0,3 \text{ N/m}$).

- Remiantis tuo, kad įtaiso JD švytavimų poslinkio spektras turi tik pastoviąją dedamąją ir pirmąją harmoniką, nustatyta, kad šiuos dydžius sukuria nuolatinė jėga ir pirmoji elektromagnetinės jėgos harmonika, o šias savo ruožtu sukuria nuolatinė bendrosios srovės dedamoji ir pirmoji srovės harmonika. Tai ir yra informatyvieji bendrosios srovės parametrai, kuriais remiantis galima nustatyti JD švytavimų poslinkio amplitudę ir švytavimų centro poslinkį.

- Sudarytas įtaiso elektrinės posistemės diferencialinių lygčių matematinis modelis, įvertinantis abi įtaiso apvijas, nuostolius apvijų varžose ir magnetolaidyje, netiesinius induktyvumus, abipusį induktyvumą ir tiristorių netiesiškumą. Atliktas induktyvumų netiesinių funkcijų ekvivalentinis pakeitimas dviem būdais: a) netiesinę funkcijos dalį pakeičiant baigtiniu begalinės eilutės narių skaičiumi, įvedant pataisos koeficientą, kuris esant simetriškam darbui yra vienodas abiejų apvijų induktyvumams; induktyvumų ir jų išvestinių nustatymui naudotini tik pirmieji eilučių nariai; b) induktyvumo netiesinę funkciją išskaidant į harmonikas – buvo nustatyta, kad induktyvumų ir išvestinių funkcijas pilnai atspindi pirmosios trys harmonikos ir nuolatinė dedamoji. Esant simetriniam darbui – induktyvumai turi tik nelygines harmonikas, o atsiradus švytavimų centro poslinkiui – papildomą nuolatinę dedamąją ir antrąją harmoniką. Induktyvumų harmonikų fazės griežtai susietos su švytavimų poslinkio fazėmis: 1-osios harmonikos $\varphi_{L1.1} = \varphi_{h.1}$, 2-osios – $\varphi_{L1.2} = 90^\circ + 2\varphi_{h.1}$; 3-osios – $\varphi_{L1.3} = 3\varphi_{h.1}$.

- Sudaryta įtaiso JD švytavimų poslinkio 1-osios harmonikos amplitudės analitinė priklausomybė nuo bendrosios srovės 1-osios harmonikos amplitudės (2.132). Įtaiso 1-oji švytavimų harmonikos amplitudė priklauso nuo bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės kvadrato. Sudaryta įtaiso JD švytavimų centro poslinkio analitinė priklausomybė nuo bendrosios srovės nuolatinės dedamosios (2.133). Įtaiso švytavimų centro poslinkis ir bendrosios srovės nuolatinė dedamoji turi neigiamą tiesinį sąryšį. Šios išraiškos skirtos švytavimų poslinkio amplitudės ir centro poslinkio nustatymui netiesioginiu būdu ir panaudotos valdymo algoritmo sekos sudarymui.

- Sudaryta švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendra struktūrinė schema, švytavimų poslinkio amplitudės nustatymo algoritmas ir valdymo sekos algoritmas. Atribotas grįžtamojo ryšio signalų kiekis – bendrosios srovės grįžtamasis ryšys. Nustatyti signalai – bendrosios srovės nuolatinė dedamoji ir pirmosios trys harmonikų amplitudės, skirti valdymui ir įtaiso diagnostikai.

- Sudarytos mechaninės (19 gedimų), elektromagnetinės (6 gedimai), galios keitiklio (5 gedimai) ir valdymo (8 gedimai) posistemių gedimų aibės ir jų indikacijos, pasinaudojant bendrosios srovės spektro informacija – nuolatinė dedamąja, pirmąja, antrąja ir trečiąja harmonikomis. Bendroji srovė teikia net tik spektro informaciją gedimų nustatymui – tai efektinės, absoliutinės srovės vertės, formos ir amplitudės faktoriai, harmonikų iškraipymo faktorius (THD), kurie gali būti panaudoti gedimų nustatymui.

3. DVIMASIO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO MATEMATINIS MODELIAVIMAS

ŠJMI modeliavimas buvo atliekamas pasinaudojant Matlab programine įranga (programa pateikta 4 priede). Programa sprendžia bendrąją diferencialinių lygčių sistemą, kuri pateikta žemiau ir gali būti taikoma tiek pereinamųjų vyksmų skaičiavimui, tiek ir kvazi-nusistovėjusiam vyksmui tirti.

3.1. Dvimesio švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso apibendrintas matematinis modelis

ŠJMI sistemos pilnoji diferencialinių lygčių sistema. Remiantis šio darbo antro skyriaus pirmąja ir antrąją dalimis galima teigti, kad egzistuoja penkios elektrinės posistemės struktūros, tačiau čia bus aptartos tik keturios, nes viena struktūra egzistuoja tik pirmojo pusperiodžio metu (2.24 pav.). Šios struktūros ir diferencialinių lygčių sistemos yra reikalingos, sudarant ŠJMI matematinio modelio programą ir analizuojant pereinamuosius ir kvazi-stacionarius vyksmus.

Įtaiso matematinį modelį pagal struktūras galima suskirstyti į tris grupes:

1. Kai srovės teka per abu tiristorius, ŠJMI sistemos pilnoji pirmosios eilės diferencialinių lygčių sistema (2.24 pav. b, c, e, f, h ir 2.6 pav. b):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1(t)}{dt} = v_1(t), \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = v_2(t), \\ \frac{dv_1(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{m1}} v_1(t) + \frac{1}{T_{m2}} v_2(t) - \frac{1}{T_{m3}^2} h_1(t) + \frac{1}{T_{m4}^2} h_2(t), \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m5}} v_1(t) - \frac{1}{T_{m5}} v_2(t) + \frac{1}{T_{m6}^2} h_1(t) - \frac{1}{T_{m6}^2} h_2(t) + \frac{f_{elm}(t)}{m_2}, \\ L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = -(k_{r1} r_{11} + k_1(h, v)) i_{L1} + k(h, v) i_{L2} + \\ + k_{r1}(u(t) - u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1})), \\ -M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = k(h, v) i_{L1} - (k_{r2} r_{21} + k_2(h, v)) i_{L2} + \\ + k_{r2}(u(t) - u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2})). \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Remiantis (3.1) diferencialinių lygčių sistema sudaroma matricinė lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}), \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

čia matricos \mathbf{A} ir \mathbf{M} , vektoriai \mathbf{x} , \mathbf{c}^T ir \mathbf{b} yra lygūs:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{m1}^2} & \frac{1}{T_{m2}^2} & -\frac{1}{T_{m3}} & \frac{1}{T_{m3}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{m4}^2} & \frac{1}{T_{m4}^2} & \frac{1}{T_{m5}} & -\frac{1}{T_{m5}} & k(i_{L1}, h) & k(i_{L2}, h) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(k_{r1}r_{11} + k_1(h, v)) & k(h, v) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k(h, v) & -(k_{r2}r_{21} + k_2(h, v)) \end{bmatrix}, (3.3)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_1(h) & -M(h) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M(h) & L_2(h) \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ v_1 \\ v_2 \\ i_{L1} \\ i_{L2} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \pm \frac{F_p}{m_2} \\ k_{r1}(u(t) - u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1})) \\ k_{r2}(u(t) - u_{Tir2}(t, \alpha_{Tir2})) \end{bmatrix}, (3.4)$$

$$\mathbf{c}^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (3.5)$$

2. Kai srovė teka tik per kurią nors vieną iš tiristorių, ŠJMĮ sistemos pilnoji pirmosios eilės diferencialinių lygčių sistema:

a) kai srovė teka per tiristorių Tir1 (2.24 pav. d ir 2.6 pav. b):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1(t)}{dt} = v_1(t), \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = v_2(t), \\ \frac{dv_1(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{m1}} v_1(t) + \frac{1}{T_{m2}} v_2(t) - \frac{1}{T_{m3}^2} h_1(t) + \frac{1}{T_{m4}^2} h_2(t), \\ \frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m5}} v_1(t) - \frac{1}{T_{m5}} v_2(t) + \frac{1}{T_{m6}^2} h_1(t) - \frac{1}{T_{m6}^2} h_2(t) + \frac{f_{elm}(t)}{m_2}, \\ L_1(h) \frac{di_{L1}}{dt} - M(h) \frac{di_{L2}}{dt} = -(k_{r1}r_{11} + k_1(h, v))i_{L1} + k(h, v)i_{L2} + \\ + k_{r1}(u(t) - u_{Tir1}(t, \alpha_{Tir1})), \\ -M(h) \frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h) \frac{di_{L2}}{dt} = k(h, v)i_{L1} - (r_{22} + k_2(h, v))i_{L2}. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

b) kai srovė teka per tiristorių Tir2 (2.24 pav. g ir 2.6 pav. b):

$$\begin{cases}
\frac{dh_1(t)}{dt} = v_1(t), \\
\frac{dh_2(t)}{dt} = v_2(t), \\
\frac{dv_1(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{m1}}v_1(t) + \frac{1}{T_{m2}}v_2(t) - \frac{1}{T_{m3}^2}h_1(t) + \frac{1}{T_{m4}^2}h_2(t), \\
\frac{dv_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_{m5}}v_1(t) - \frac{1}{T_{m5}}v_2(t) + \frac{1}{T_{m6}^2}h_1(t) - \frac{1}{T_{m6}^2}h_2(t) + \frac{f_{elm}(t)}{m_2}, \\
L_1(h)\frac{di_{L1}}{dt} - M(h)\frac{di_{L2}}{dt} = -(r_{12} + k_1(h, v))i_{L1} + k(h, v)i_{L2}, \\
-M(h)\frac{di_{L1}}{dt} + L_2(h)\frac{di_{L2}}{dt} = k(h, v)i_{L1} - (k_{r2}r_{21} + k_2(h, v))i_{L2} + \\
+ k_{r2}(u(t) - u_{Tir2}(t, a_{Tir2})).
\end{cases} \quad (3.7)$$

Pagal (3.6) ir (3.7) diferencialinių lygčių sistemas atitinkamai keičiasi ir matricos **A** (3.3) ir stulpelio **b** (3.4) turinys. Matricos **M** turinys keičiasi, tik esant grandinėje trūkių srovių režimui.

Taigi, sudarytas bendras ŠJMĮ matematinis modelis, kuriame yra įvertinta:

1. dvimasė mechaninė posistemė;
2. apkrova ištiesinta atvejams, kai švytavimų amplitudė neviršija leistinos švytavimų amplitudės H_m . Skaičiuojant įvertintas švytavimų poslinkio amplitudės apribojimas, tačiau neįvertintas judžiosios dalies „daužymasis“ į „statorių“;
3. įvertintas abiejų apvijų induktyvumo kitimas, apvijų varža ir magnetiniai nuostoliai;
4. pateiktas modelis, kuriame gali būti įvertintas abipusis apvijų induktyvumas (šiuo darbe abipusis induktyvumas buvo nevertinamas dėl apvijų tarpusavio statmeno išdėstymo – kaip parodė eksperimentas – prielaida buvo leistina);
5. keičiant schemas struktūras įvertintas tiristorių modelis. Buvo bandyta ieškoti analitinio tiristoriaus modelio, tačiau tinkamo nebuvo aptikta, todėl pasirinktas tradicinis schemų keitimo būdas pagal laiko intervalus (kol tiristoriai neatidaryti; kai tiristoriai atidaryti, srovė teka tiesiogine kryptimi, įtampa tiesioginė; srovė teka tiesiogine kryptimi, įtampa neigima; tiristorius užsidaro, įtampa neigiama; taip pat atvejai, kai egzistuoja trūkių srovių režimas).

6. panaudojant modelį galima apskaičiuoti šiuos dydžius – visas grandinės sroves – i , i_{11} , i_{21} , i_{12} , i_{22} , i_{L1} , i_{L2} ; mechaninės posistemės kintamuosius – švytavimų poslinkius h , h_1 ir h_2 , greičius v , v_1 ir v_2 , pagreičius a , a_1 ir a_2 . Taip pat galima apskaičiuoti elektromagnetinę jėgą, mechaninę ir elektrines galias, naudingumo faktorių, galios faktorių. Pasinaudojant modeliu apskaičiuojamos minėtų dydžių amplitudinės ir efektinės vertės, pradinės fazės iki 10 harmonikos; sudaryti pereinamųjų vyksmų grafikai, apskaičiuoti spektrai, sudaryti nusistovėjusių vyksmų grafikai;

Taigi, pateiktas modelis yra gana universalus, bet tobulintinas – būtų galima papildomai įvertinti: „daužymosi“ efektą, panaudoti tikslesnį tiristorinį modelį, taip pat nustatyti abipusio induktyvumo analitinę išraišką. Šį modelį nedaug pertvarkius ir pakeitus šaltinio tipą, būtų galima modeliuoti įtaiso darbą su tranzistoriniu dažnio keitikliu arba įtampos impulsų pločio keitikliu. Jį taip pat galima supaprastinti vienasmasėms sistemoms ir vienpusiams, vieno apvijos įtaisų tyrimams. Modelis taip pat gali būti pritaikomas žadinamiesiems varikliams su viena arba dviem apvijomis pakeičiant elektromagnetinės jėgos analitinę išraišką, taikomą tam modeliui sudaryti.

3.2. Matematinio modeliavimo rezultatai

Matematinio modeliavimo rezultatus galima suskirstyti į tris pagrindines grupes: pereinamųjų vyksmų skaičiavimą, nusistovėjusių režimų skaičiavimą ir harmonikų analizę. Pagal gautus skaičiavimo rezultatus sudaryti grafiniai sąryšiai tarp švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės harmonikų, elektromagnetinės jėgos ir bendrosios srovės harmonikų, švytavimų centro poslinkio ir nuolatinės srovės dedamosios sąryšio nustatymui. Kadangi darbe labiau aktualus reliatyviųjų švytavimų nagrinėjimas, todėl čia nepateikiami judžiosios dalies ir „statoriaus“ absoliučiuųjų švytavimų rezultatai. Atskiru atveju pateikiama „statoriaus“ ir judžiosios dalies absoliučiuųjų švytavimų modeliavimo rezultatų analizė tam, kad šiuos rezultatus būtų galima palyginti su eksperimentiniais, nes eksperimento metu pagreičio jutikliais buvo matuojama būtent „statoriaus“ švytavimų poslinkis, greitis ir pagreitis. Taip pat buvo matuojama ir judžiosios dalies poslinkio amplitudė, tačiau jau panaudojant stroboskopą, todėl buvo galima nustatyti tik bendrą švytavimų poslinkio amplitudę, o ne jos harmonikas, kaip tai buvo atlikta su „statoriaus“ judesiu.

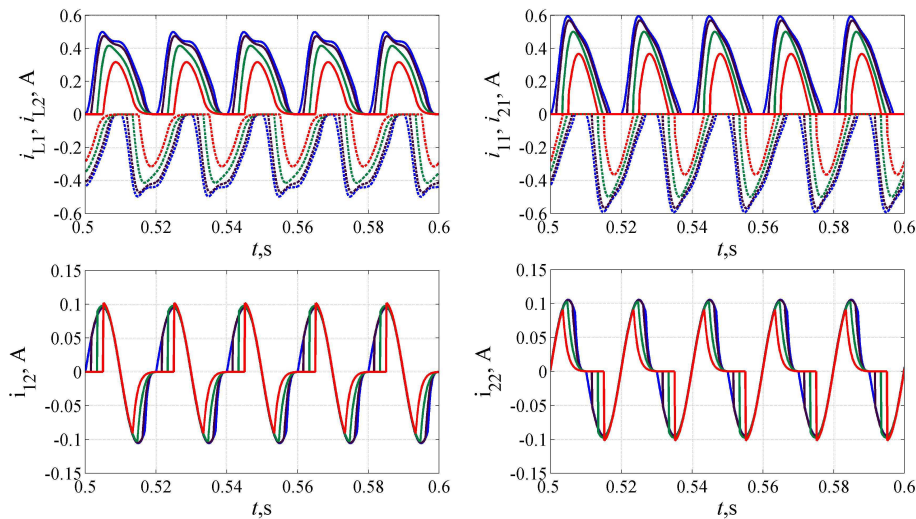
Pirma analizuojami švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso pereinamieji vyksmai ir jų kitimas, keičiantis tiristorių atidarymo kampui (grafikai pateikti 7 priede). Parametrai skaičiavimams paimti iš 4 skyriaus fizinio modelio aprašymo ir eksperimentų, apkrovos reaktyvioji varža nustatoma rezonansui, o aktyviosios $R_{\text{mech1}}=1 \text{ Ns/m}$, $R_{\text{mech2}}=10 \text{ Ns/m}$.

7.1 paveiksle (priede nr. 7) pateikti grafikai suteikia informacijos apie švytavimų poslinkių pobūdžius. Kaip ir bet kurioje dvimasėje sistemoje, absoliutieji švytavimai turi dvi harmonikas – viena judžiosios dalies, kurios dažnis atitinka maitinančios įtampos dažnį, ir kita – atitinkanti „statoriaus“ dažnį, kuris yra mažesnis už įtampos dažnį. Atlikus skaičiavimus, buvo nustatyta, kad šis dažnis labai priklauso nuo pakabos standumo ir „statoriaus“ masės. Mažinant standį C_{mech1} ir didinant masę m_2 – švytavimų dažnis mažėja. Didinant tiristorių atidarymo kampą, mažėja ne tik švytavimų poslinkio amplitudė, bet didėja judžiosios dalies ir „statoriaus“ pradinės švytavimų poslinkių fazės.

Atlikus skaičiavimus, kai pakabos standis yra daug didesnis už ekvivalentinį apkrovos standį $C_{\text{mech1}} \gg C_{\text{mech2}}$, pereinamuosiuose vyksmuose egzistavo tik pagrindinis švytavimų dažnis, o „statoriaus“ švytavimų poslinkio amplitudė buvo nykstamai maža. Tuomet sistema yra nagrinėtina kaip vienasmasė. Tai atitinka teorinius pastebėjimus, pateiktus šio darbo antrajame skyriuje. Greičių ir pagreičių

analizės rezultatai parodė, kad „statoriaus“ greitis, esant mažam pakabos standžiui, turėjo žemo dažnio harmoniką. Jos dydis buvo 10 kartų mažesnis, negu judžiosios dalies švytvimų greičio amplitudės. „Statoriaus“ švytvimų pagreitis turi tik pagrindinę harmoniką ir labai mažą žemo dažnio harmoniką, kuri beveik nepriklauso nuo ŠJMĮ pakabos standžio. Tai paaiškinama tuo, kad pagreičio signalas yra du kartus diferencijuotas švytvimų poslinkio signalas. Žemo dažnio signalą diferencijuojant du kartus jis teoriškai sumažėja iki nulio. Realiai švytvimų pagreičio žemasis dažnis egzistuoja, tik yra nykstamai mažas. Paveiksle 7.2 (7 priedas) pateikti visų reliatyviųjų švytvimų kintamųjų pereinamieji vyksmai (poslinkio, greičio ir pagreičio, kai tiristorių atidarymo kampai skirtingi). Įtaiso JD švytvimų poslinkiui, greičiui, ir pagreičiui tiristorių atidarymo kampo poveikis yra proporcingas, nes tiristorių atidarymo kampas turi įtakos grandinės srovėms ir elektromagnetinei jėgai.

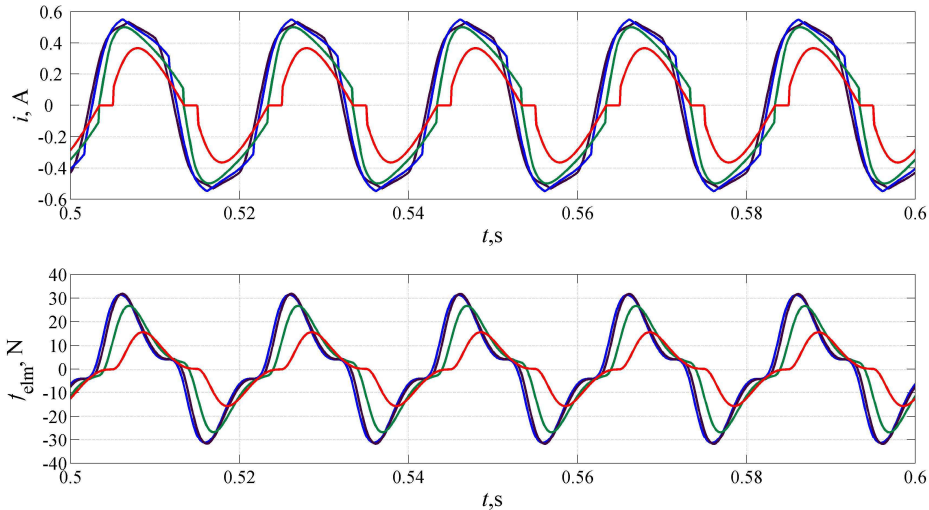
Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso visų srovių (išskyrus bendrąją), kvazi-nusistovėjusio režimo vyksmų grafikai pateikti 3.1 paveiksle. Lyginant gautąsias modeliavimo kreives su eksperimentinėmis, galima teigti, kad modeliavimo metu gautos srovės i_{11} ir i_{21} atitinka eksperimento kreives. Tai paaiškinama tuo, kad eksperimento metu schemoje realiai nėra ekvivalentinių varžų r_{12} ir r_{22} , todėl srovės $i_{L1}=i_{11}$, o $i_{L2}=i_{21}$. Modeliavimo atveju gaunama, kad srovė per induktyvumą teka viso periodo metu, nors tai tik mokslinė abstrakcija, įvertinanti magnetinius nuostolius magnetolaidyje.



3.1 pav. Įtaiso elektrinės dalies srovių kvazi-nusistovėjusio režimo vyksmai $i_{L1}=f(t)$, $i_{L2}=f(t)$, $i_{11}=f(t)$, $i_{21}=f(t)$, $i_{12}=f(t)$, $i_{22}=f(t)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m); $\alpha_{Tir}=0^\circ$ – mėlyna; $\alpha_{Tir}=30^\circ$ – juoda; $\alpha_{Tir}=60^\circ$ – žalia; $\alpha_{Tir}=90^\circ$ – raudona

Elektromagnetinę jėgą sukuria induktyvumais tekančios srovės, o grandinės bendrąją srovę, pagal I Kirchhofo dėsnį, sudaro srovės i_{11} ir i_{21} . Tuo remiantis apskaičiuoti elektromagnetinės jėgos ir bendrosios srovės kvazi-nusistovėję vyksmai, esant skirtingiems tiristorių atidarymo kampams, pateikti 3.2 paveiksle.

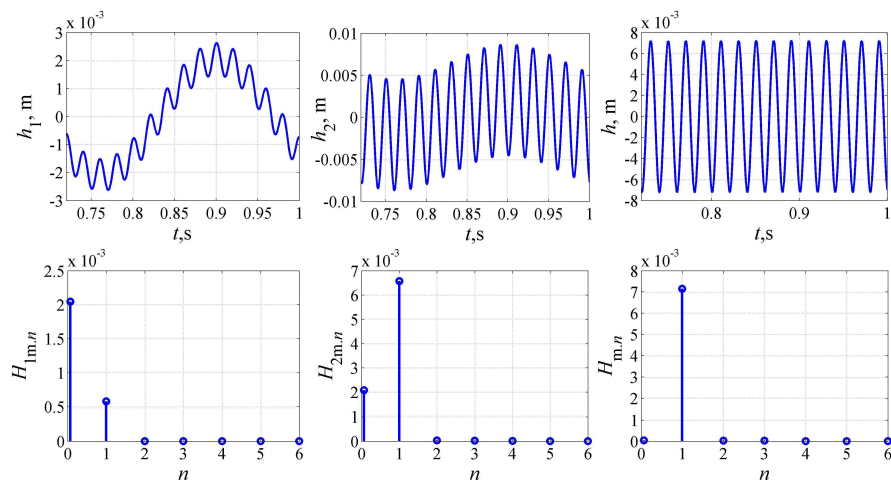
Elektromagnetinė jėga ir srovė yra netiesiniai periodiniai dydžiai, tačiau švytavimų poslinkis yra labai artimas sinusiniam dydžiui signalas (priedas nr. 7; 7.1 ir 7.2 pav.). Taip pat pastebėtina, kad srovės ir elektromagnetinės jėgos fazės beveik sutampa. Atlikus daugiau skaičiavimų buvo nustatyta, kad ties rezonansu tarp elektromagnetinės jėgos ir švytavimų poslinkio pirmųjų harmonikų fazė artima 90° (švytavimų poslinkis atsilieka), o tarp srovės pirmosios harmonikos ir elektromagnetinės pirmosios harmonikos, ties rezonansu fazių skirtumas keitėsi 4° - 5° ribose. Buvo nustatyta, kad keičiant tiristorių atidarymo kampą, švytavimų poslinkio signalas netampa nesinusiniu, net esant ir trūkiųjų srovių režimui.



3.2 pav. ŠJMĮ elektrinės dalies bendrosios srovės bei elektromagnetinės jėgos kvazi-nusistovėjusio režimo vyksmai $i=f(t)$, $f_{elm}=f(t)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m); $\alpha_{Tir}=0^\circ$ – mėlyna; $\alpha_{Tir}=30^\circ$ – juoda; $\alpha_{Tir}=60^\circ$ – žalia; $\alpha_{Tir}=90^\circ$ – raudona

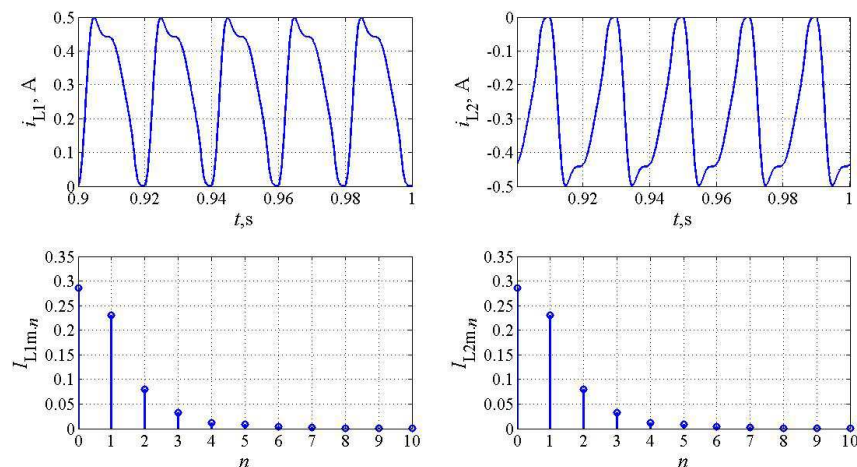
Kita modeliavimo tyrimo dalis susijusi su spektrų analize. Buvo analizuojami švytavimų poslinkio nusistovėjusio režimo, bendrųjų apvijos srovių ir induktyvumų srovių spektrai, esant nuliniam tiristorių atidarymo kampui. Taip pat išnagrinėti ir elektromagnetinės jėgos ir bendrosios srovės spektrai.

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso kintamųjų spektras atitinka teorines prielaidas, kad reliatyviųjų švytavimų poslinkis yra tik sinusinis dydis (tai patvirtino ir kiti skaičiavimai, keičiant tiristorių atidarymo kampą, bei įtaiso apkrovos ir pakabos parametrus), o absoliutieji švytavimai turi žemo dažnio (2,1 Hz) ir pagrindinę švytavimų harmoniką. Modelio teisumui patikrinti buvo atliekamas eksperimentas, kurio metu buvo nustatyta, kad „statorius“ turi vieną harmoniką žemų dažnių srityje ir pagrindinę harmoniką, kurią sukuria elektromagnetinės jėgos pirmoji harmonika. Skaitinės vertės skirtumai gali būti susiję su tuo, kad nėra įvertinti visi parametrai, kurie daro įtaką skaičiavimų tikslumui. Taip pat šie švytavimų poslinkiai yra nejudančios koordinačių sistemos atžvilgiu, o atlikti matavimai buvo ant paties „statoriaus“ ir „statoriaus“ pakabos rėmo, (nors „statoriaus“ pakabos rėmas judėjo mažiau, tačiau vibracija buvo perduodama, todėl pagreičio jutiklis buvo ne ant stacionaraus pagrindo).

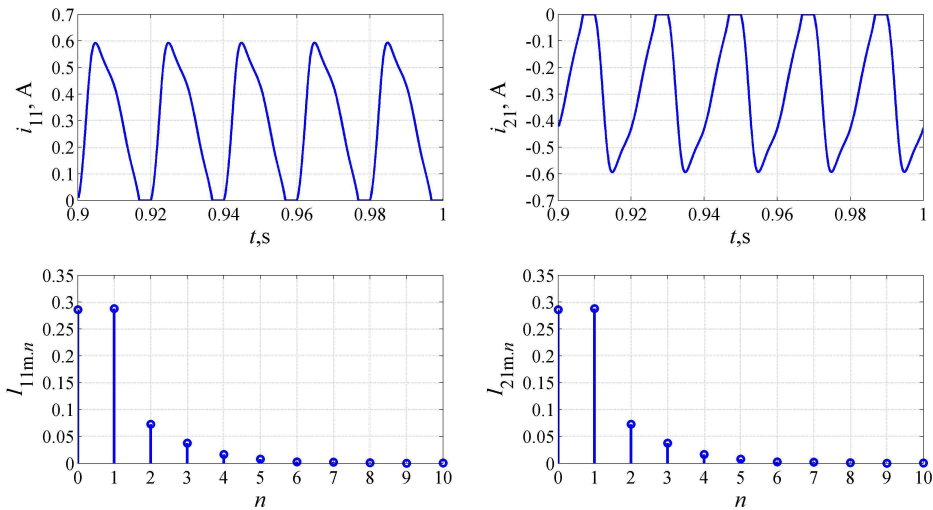


3.3 pav. ŠJMĮ švytavimų poslinkių nusistovėjusio režimo vyksmai $h_1=f(t)$, $h_2=f(t)$, $h=f(t)$ bei jų absoliutieji amplitudžių spektrai $H_{1m,n}=f(n)$, $H_{2m,n}=f(n)$, $H_{m,n}=f(n)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=500$ N/m, $C_{mech2}=27328$ N/m)

3.4 ir 3.5 paveiksluose pateikta induktyvumų srovių ir apvijų bendrųjų srovių spektro informacija. Srovių spektras turi žymesnes harmonikas nuo nulinės dedamosios iki trečiosios harmonikos. Lyginant modeliavimo rezultatus su eksperimentiniais, galima teigti, kad modeliavimas atitinka fizinį eksperimentą kokybine prasme, nes eksperimentu buvo nustatytos ryškesnės pirmosios dvi harmonikos ir nežymi trečioji (bendruose grafikuose pastebėti sunku, bet atliekant bandymus padidinus įtampos mastelį trečioji ir net 4 harmonikos buvo nustatytos). Srovės formos atžvilgiu galima teigti, kad eksperimento ir modeliavimo rezultatai skiriasi dėl galimų fizinio modelio ir pasirinktų matematinio modelio parametrų verčių neatitikimų.

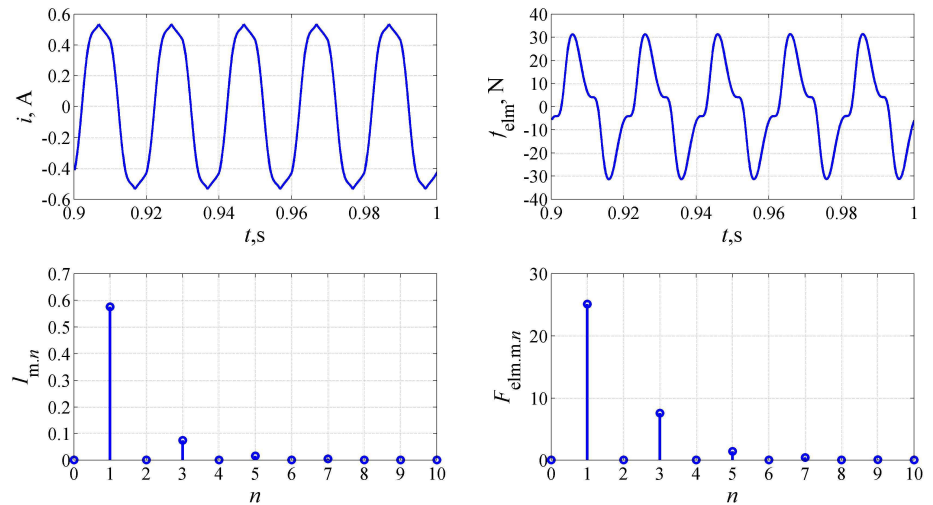


3.4 pav. Įtaiso elektrinės dalies srovių nusistovėjusio režimo vyksmai $i_{L1}=f(t)$, $i_{L2}=f(t)$ bei jų absoliutieji amplitudžių spektrai $I_{L1m,n}=f(n)$, $I_{L2m,n}=f(n)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m)



3.5 pav. ŠJMĮ elektrinės dalies srovių nusistovėjusio režimo vyksmai $i_{11}=f(t)$, $i_{21}=f(t)$ bei jų absoliutieji amplitudžių spektrai $I_{11m,n}=f(n)$, $I_{21m,n}=f(n)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m)

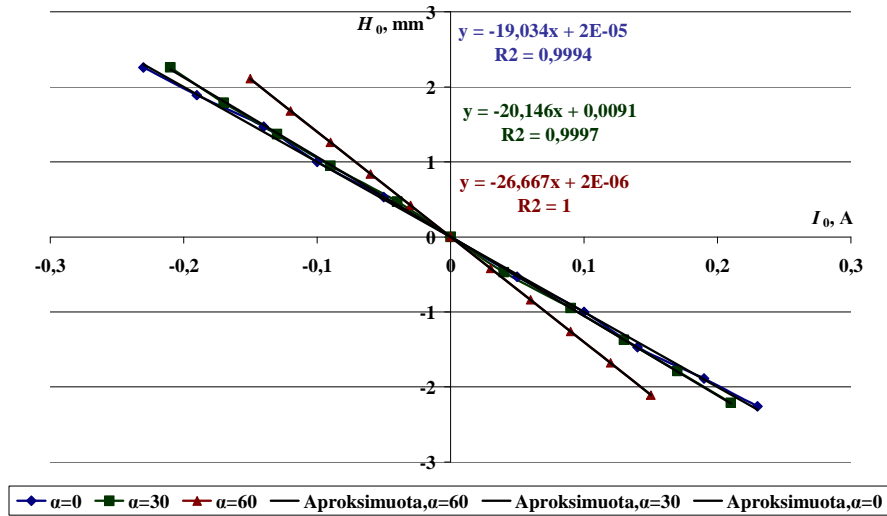
Elektromagnetinės jėgos ir bendrosios srovės spektras patvirtina teiginį, kad tiek bendroji srovė, tiek ir elektromagnetinė jėga yra nesinusiniai periodiniai simetriniai dydžiai, kurie turi tik nelygines harmonikas. Taip pat galima teigti, kad elektromagnetinė jėga priklauso nuo bendrosios srovės kvadrato, nes elektromagnetinės jėgos atitinkamos harmonikos, yra kvadratinio dydžiu didesnės lyginant su pirmąja harmonika, nei srovės aukštesniosios harmonikos. Taip pat priimta prielaida, kad šie dydžiai yra nesinusiniai, yra teisinga, lyginant bendrąją srovės GFT su eksperimentine.



3.6 pav. Įtaiso bendrosios srovės ir elektromagnetinės jėgos nusistovėjusio režimo vyksmai $i=f(t)$, $f_{elm}=f(t)$ bei jų absoliutieji amplitudžių spektrai $I_{m,n}=f(n)$, $F_{elm,m,n}=f(n)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m)

Ekspimento metu taip pat nustatytos pirmoji ir trečioji bendrosios srovės harmonikos. Šių harmonikų egzistavimas patvirtina prielaidą, kad ŠJMI induktyvumas nėra visiškai tiesinis ir magnetinė grandinė, įtaisui švytuojant arti didžiausios švytavimų poslinkio vertės H_m , prisisotina, o kai buvo didinamas tiristorių atidarymo kampas, šios harmonikos santykinai sumažėdavo. Modeliavimo būdu apskaičiuota, kad įtaiso šakos srovė turi penkias pirmąsias harmonikas, kurios, pagrindinės harmonikos atžvilgiu, sudaro: antroji – nuo 25% iki 35%, trečioji – nuo 13,5% iki 15%, ketvirtoji – nuo 6,8% iki 7,5%, penktoji – nuo 3,4% iki 4%.

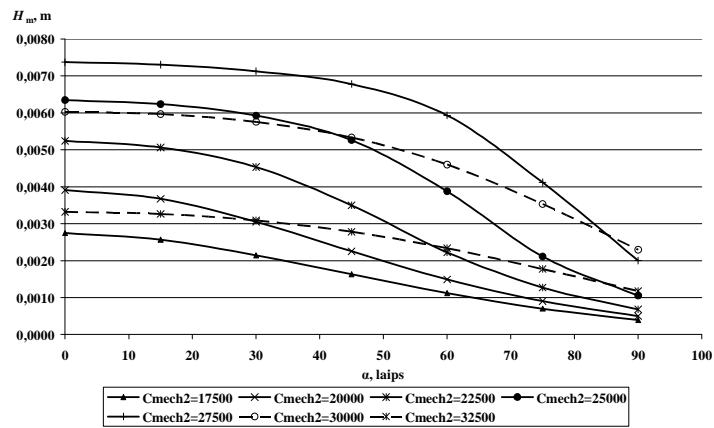
Kita matematinio modeliavimo dalis buvo skirta sudaryti sąryšiams tarp švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės. 3.7 paveiksle pateiktas švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir švytavimų centro poslinkio sąryšis, kai buvo keičiamas tiristorių atidarymo kampas.



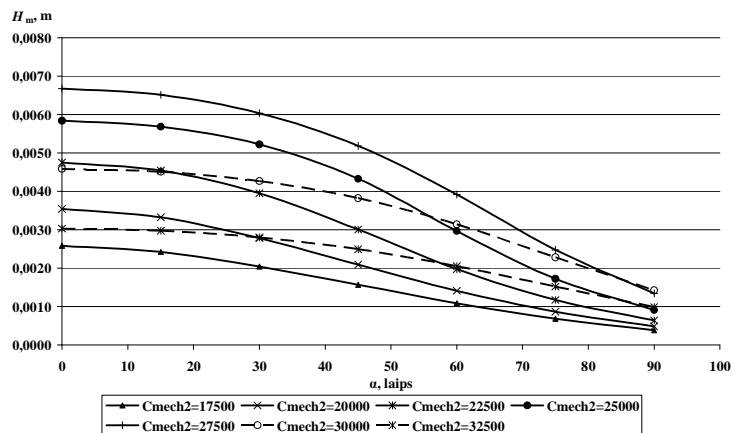
3.7 pav. Švytavimų centro poslinkio priklausomybė nuo bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir tiristorių atidarymo kampo

Buvo nustatyta, kad tiristorių atidarymo kampas turi nedidelę įtaką šiam sąryšiui. Sąryšio $H_0=f(I_0)$ tipas – tiesinis su neigiamu ženklu. Gautasis sąryšis kokybiniai atžvilgiu atitinka eksperimento metu gautąjį sąryšį tarp nuolatinės srovės ir švytavimų centro poslinkio, tačiau modeliuojant gaunamos idealesnės ŠJMI charakteristikos, nes nevertinama pašalinių veiksnių įtaka (blogas aušinimas, nesimetrišnis kompresorius, tepimo pablogėjimas, galimas nevienodas tiristorių kampo nustatymas, simetriškumo nustatymo priemonių paklaidos (vožtuvų reguliavimas)). Grafinė priklausomybė (3.7 pav.) buvo gauta modeliavimo metu į modelį įvedant papildomą pastovią jėgą (vektorius \mathbf{b} (3.4)) ir keičiant tiristorių atidarymo kampus. Nusistovėjusiame režime atlikus harmoninę analizę buvo išskiriamos nuolatinė srovės dedamoji ir švytavimų centro poslinkis.

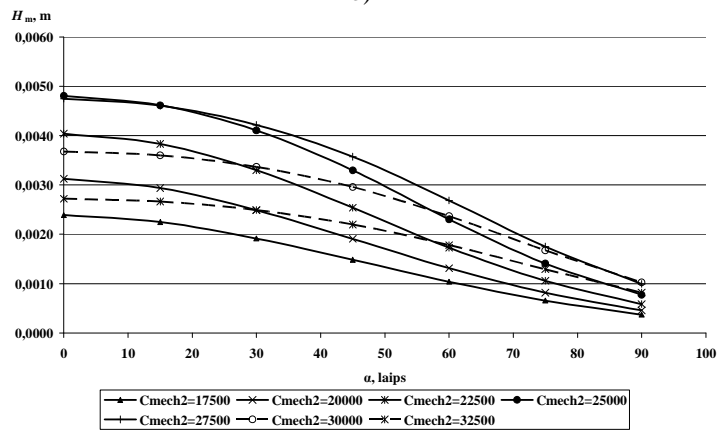
Taip pat buvo sudaromos švytavimų poslinkio amplitudės charakteristikos nuo tiristorių atidarymo kampo ir esant įvairiems apkrovos parametrų C_{mech2} ir R_{mech2} .



a)



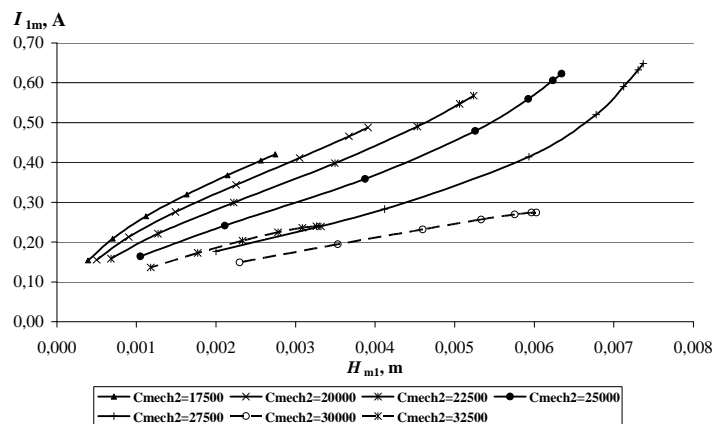
b)



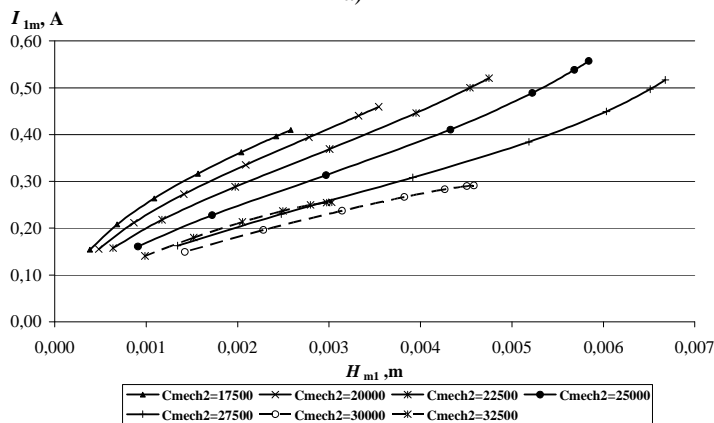
c)

3.8 pav. Švytavių poslinkio amplitudės priklausomybė nuo tiristorių atidarymo kampo ir C_{mech2} , kai a) $R_{mech2} = 6$ Ns/m; b) $R_{mech2} = 10$ Ns/m; c) $R_{mech2} = 14$ Ns/m

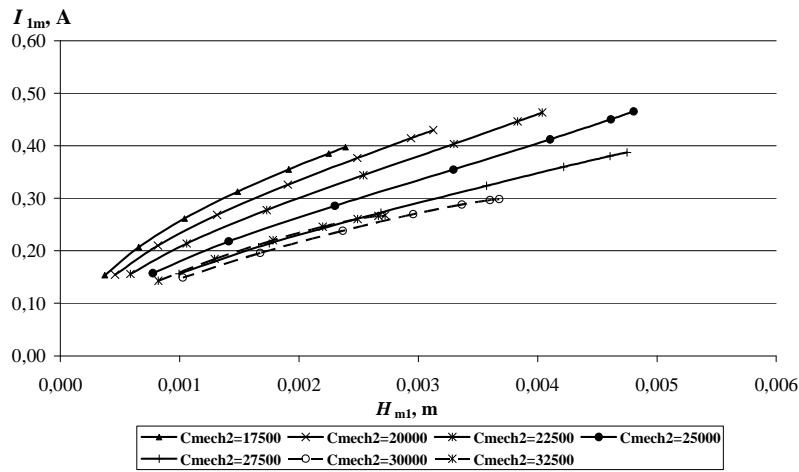
Pateiktos charakteristikos (3.8 pav.) gali būti palygintos su našumo priklausomybe nuo tiristorių atidarymo kampo (4.8 pav.), kadangi našumas yra tiesiogiai proporcingas švytavimų poslinkio amplitudei. Šių grafikų pobūdis yra adekvatus našumo charakteristikoms. Palyginimui reikėtų našumą perskaičiuoti į švytavimų poslinkį, tačiau nėra tiksliai žinomas kompresoriaus tūrinis koeficientas. Iš pateiktų eksperimentinių duomenų ir modeliavimo rezultatų, galima teigti, kad esant mažiems tiristorių atidarymo kampams (iki 30 laipsnių) ir nedidelei apkrovai, švytavimų poslinkio pirmosios harmonikos amplitudė kinta iki 10%, o didinant atidarymo kampą nuo 30° ir daugiau, švytavimų poslinkis ir našumas (eksperimento duomenys) mažėja sparčiau. Taip pat pastebėtina, kad ŠJMĮ švytavimų poslinkis yra didžiausias, kai mechaninės apkrovos parametrai artėja prie mechaninės posistemės rezonansinių parametru, kas atitinka analitinio mechaninės posistemės vertinimo išvadas. Tolstant nuo rezonanso švytavimų poslinkis mažėja, tačiau nevienodai. Kai mechaninės posistemės apkrovos parametras C_{mech2} didesnis už rezonansinę šio parametro vertę, tai švytavimų poslinkis kinta 2 kartus sparčiau, negu esant toms pačioms šio parametro pokyčio vertėms, kai jos mažesnės už rezonansinę vertę.



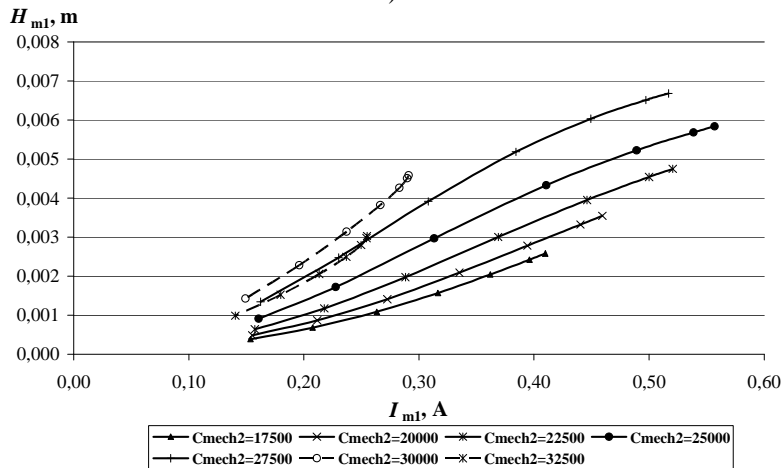
a)



b)



c)



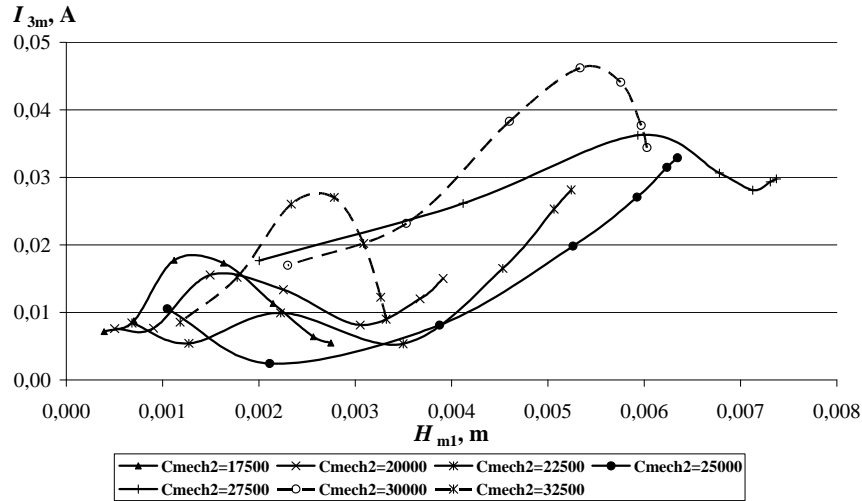
d)

3.9 pav. Bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės priklausomybė nuo švytavimų poslinkio pirmosios harmonikos amplitudės ir C_{mech2} , a) kai $R_{\text{mech2}}=6$ Ns/m; b) kai $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m; c) kai $R_{\text{mech2}}=14$ Ns/m; d) $H_{m1}=f(I_{m1})$, kai $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m

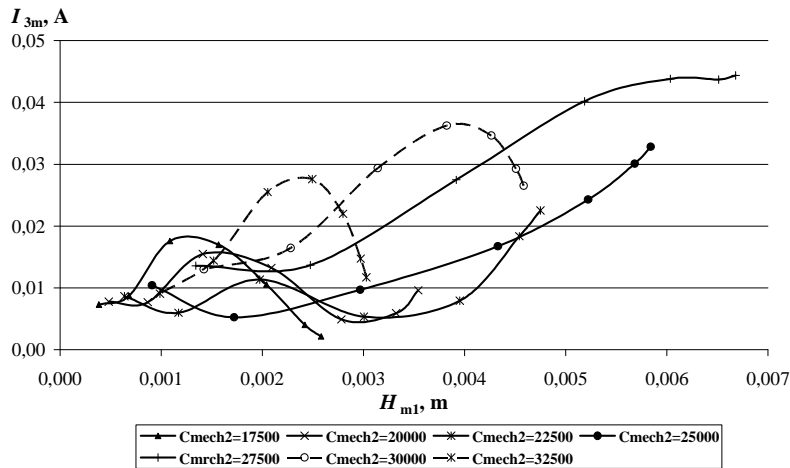
3.9 ir 3.10 paveiksluose sudarytos švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso pirmosios ir trečiosios bendrosios srovės harmonikų amplitudžių priklausomybės nuo įtaiso pirmosios švytavimų poslinkio harmonikos amplitudės. Kaip buvo teigta antrame skyriuje, pateikta trečioji bendrosios srovės harmonika (3.10 pav.) nesuteikia naudingos informacijos apie įtaiso švytavimų poslinkį. Gautosios priklausomybės yra netiesinės.

Pirmosios srovės harmonikos priklausomybės nuo švytavimų poslinkio pirmosios harmonikos atitinka eksperimento metu nustatytas ir pateiktas 4.9 paveiksle a (priklausomybės tarp našumo (poslinkio) ir bendrosios srovės efektingės vertės). Kaip pateikta 4 skyriuje, trečioji šios srovės harmonika yra maža, todėl galima naudoti srovės efektingę vertę. Todėl, su 90 procentų tikslumu, galima

teigti, kad šis grafikas atspindi srovės pirmosios harmonikos amplitudės priklausomybę nuo švytavių poslinkio amplitudės. 3.9 paveiksle d, lyginant du grafikus yra kiekybinis skirtumas tarp srovės modeliuojant ir eksperimento metu.



a)

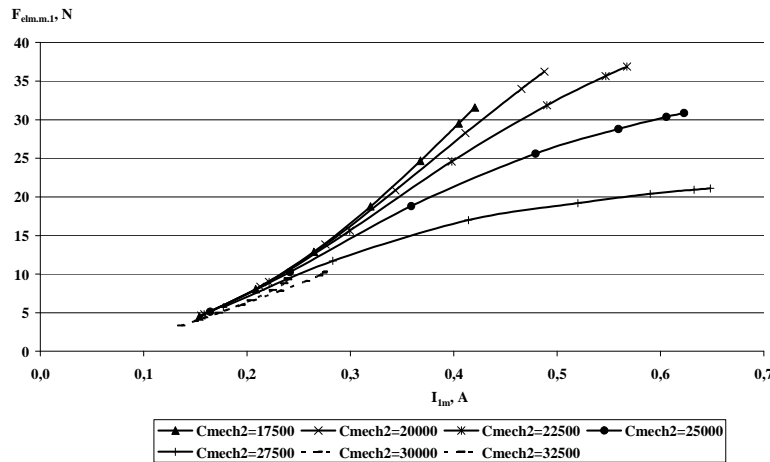


b)

3.10 pav. Bendrosios srovės trečiosios harmonikos amplitudės priklausomybė nuo švytavių poslinkio pirmosios harmonikos amplitudės ir $C_{\text{mech}2}$, a) kai $R_{\text{mech}2}=6$ Ns/m; b) kai $R_{\text{mech}2}=10$ Ns/m

3.11 paveiksle pateikta elektromagnetinės jėgos pirmosios harmonikos amplitudės priklausomybė nuo bendrosios srovės harmonikos amplitudės, kaip buvo pateikta analitinėje dalyje – elektromagnetinė jėga priklauso nuo srovės kvadrato (nustatyta atliekant elektromagnetinės jėgos kreivių regresinę analizę Excel programa). Elektromagnetinė jėga, esant apkrovos parametrams arti rezonansinių, nėra pati didžiausia – tai galima paaiškinti tuo, kad esant rezonansinėms sąlygoms ir

tai pačiai elektromagnetinei jėgai, švytavimų poslinkis yra pats didžiausias ir jam pasiekti reikia mažesnės jėgos negu tuo atveju, kai apkrovos sąlygos nerezonansinės, – tuo atveju didėja ŠJMĮ mechaninė varža, kuri stabdo judėjimą ir norint pasiekti tokią pačią švytavimų amplitudę reikalinga didesnė elektromagnetinė jėga.



3.11 pav. Elektromagnetinės jėgos pirmosios harmonikos priklausomybė nuo bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės ir C_{mech2} , kai $R_{mech2}=6$ Ns/m

Taigi, gauti matematinio modeliavimo rezultatai atitinka švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso eksperimentinius rezultatus, kiekybinio nesutapimo priežastis – netikslūs parametrai, panaudoti modeliuojant ŠJMĮ, taip pat ir sudaryto matematinio modelio netikslumai, dėl jų sudarant padarytų prielaidų.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Atlikus matematinį modeliavimą ir išanalizavus rezultatus galima teigti:

- bendras ŠJMĮ matematinis modelis, kuriame yra įvertinta: dvišalė mechaninė posistemė; apkrova ištiesinta atvejams, kai švytavimų amplitudė neviršija leistinos švytavimų amplitudės H_m . Skaičiuojant įvertintas švytavimų amplitudės apribojimas, tačiau neįvertintas judžiosios dalies „daužymosi“ į „statorių“ efektas; įvertintas abiejų apvijų induktyvumo kitimas, apvijų varža ir magnetiniai nuostoliai; pateiktas modelis, kuriame gali būti įvertinamas abipusis apvijų induktyvumas (šiam darbe abipusis induktyvumas buvo nevertinamas dėl apvijų tarpusavio statmeno išdėstymo – kaip parodė eksperimentas – prielaida buvo leistina); keičiant schemas struktūras, įvertintas tiristorių modelis. Panaudojant modelį galima suskaičiuoti šiuos dydžius – visas grandinės sroves – i , i_{11} , i_{21} , i_{12} , i_{22} , i_{L1} , i_{L2} ; mechaninės sistemos kintamuosius – švytavimų poslinkius h , h_1 ir h_2 , greičius v , v_1 ir v_2 , pagreičius a , a_1 ir a_2 , apskaičiuoti elektromagnetinę jėgą, mechaninę ir elektrinę galias, naudingumo ir galios faktorius. Pasinaudojant modeliu apskaičiuojamos minėtų dydžių amplitudinės ir efektinės vertės, pradinės fazės iki 10 harmonikos; sudaryti pereinamųjų vyksmų grafikai, apskaičiuoti spektrai.

- Sudarytas pilnas diferencialinių lygčių matematinis ŠJMĮ modelis yra adekvatus fiziniam ŠJMĮ modeliui. Atlikus matematinį modeliavimą ir spektrinę

nusistovėjusių vyksmų analizę, nustatyta, kad judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkis turi tik pagrindinę pirmąją harmoniką, lyginių harmonikų nėra, o trečioji harmonika tesudaro mažiau nei 0,5% pagrindinės harmonikos amplitudės. Absolūtieji ŠJMĮ dalių švytavimai turi dar ir žemo dažnio harmoniką (1,75 Hz modeliuojant ir 1,93 Hz eksperimentiškai). Trečioji švytavimų poslinkio harmonika buvo nustatyta eksperimento metu, o modeliuojant ji yra nykstamai maža – tai paaiškinama matematinio modelio apkrovos ištiesinimo paklaidomis. Modeliuojant nustatyta, kad elektromagnetinės jėgos spektras turi pirmas penkias nelygines harmonikas, o bendroji srovė pirmąją ir trečiąją harmonikas, kaip ir eksperimento rezultatuose. Vienos apvijos srovės spektre i_{11} modeliuojant nustatytos pirmos penkios harmonikos ir nuolatinė šios srovės dedamoji, eksperimento rezultatai parodė, kad fizinio modelio apvijos srovė turi nuolatinę dedamąją, tris pirmas ryškias harmonikas ir nežymią ketvirtąją harmoniką. Eksperimentinių rezultatų ir matematinio modeliavimo neatitikimas atsiranda dėl netikslių fizinio ŠJMĮ (mechaninės posistemės) parametrų ir matematiniam modeliui sudaryti priimtų prielaidų. Modeliavimo būdu apskaičiuota, kad įtaiso šakos srovė turi penkias pirmąsias harmonikas, kurios pagrindinės harmonikos atžvilgiu sudaro: antroji – nuo 25 % iki 35%, trečioji – nuo 13,5% iki 15%, ketvirtoji – nuo 6,8% iki 7,5%, penktoji – nuo 3,4% iki 4%.

- Modeliavimu nustatyta, kad švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendrosios srovės nuolatinė dedamoji ir įtaiso švytavimų centro poslinkis turi tiesinę neigiamą priklausomybę. Ši teiginį taip pat patvirtino ir eksperimentinis tyrimas.

- Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso švytavimų poslinkio nustatymui užtenka bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės informacijos. Trečioji švytavimų poslinkio harmonika sukuria trečiąją elektromagnetinės jėgos harmoniką, kuri sukuria nykstamai mažą švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso trečiąją harmoniką. Modeliavimo rezultatais nustatyta, kad trečioji bendrosios srovės harmonikos amplitudė turi netiesinį sąryšį su pirmąja švytavimų poslinkio harmonika, todėl informacijai gauti apie švytavimų poslinkį nenaudotina. Šiuo atveju analitinės prielaidos buvo patvirtintos modeliavimu.

- Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso atskirų šakų bendrosios srovės turi nuolatinės dedamąsias ir pirmas tris informatyvias harmonikas. Lyginės harmonikos bendrojoje srovėje nepasireiškia, išskyrus atvejus, jeigu įvyksta gedimas kurioje nors vienoje iš šakų (gedimai pateikti 2 skyriuje ir 5 priede).

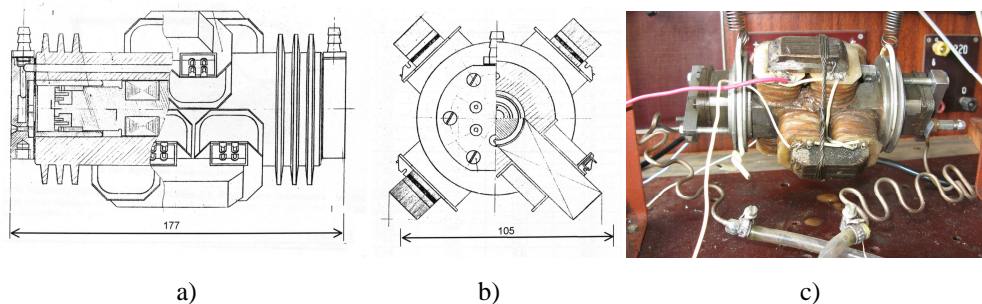
- Modeliavimo būdu nustatyta, kad švytuojamojo judesio įtaiso bendroji elektromagnetinė jėga yra proporcinga bendrosios srovės kvadratui, tai patvirtina analitinės prielaidas.

4. VALDOMO ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO MECHATRONINIO ĮTAISO EKSPERIMENTAS

Fizinis eksperimentas buvo atliekamas su Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedroje pagamintu ŠJMĮ – švytuojamojo tiesiaiegio judesio pulsuojamosios srovės elektros dvimasiu dvipusiu bespyruokliu variklio-kompresoriaus agregatu (4.1 pav.).

4.1. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso fizinis modelis, eksperimento struktūra

Fizinio modelio aprašymas. Fizinio modelio pagrindiniai duomenys [3, 4]: suspaudimo slėgis $p_2=4\div 5$ atm; įsiurbimo slėgis $p_1=1$ atm; suspaudimo laipsnis $\tau=4\div 5$; kompresoriaus suspaudžiamos dujos – oras, oro politropės laipsnis $n=1,4$; kompresoriaus bendras nominalus našumas $Q_n\approx 75$ l/min= $1,25\cdot 10^{-3}$ m³/s; kompresoriaus stūmoklio ir darbo kameros diametras $D_s=3,5\cdot 10^{-2}$ m; variklio judžiosios dalies su stūmokliais ilgis – $l=0,125$ m; didžiausia leistina švytavimų poslinkio amplitudė – $H_m=8\cdot 10^{-3}$ m; „statoriaus“ masė $m_1=3,6$ kg; judžiosios dalies masė $m_2=0,3$ kg; variklio elektromagnetinės ritės apvijos aktyvioji varža $r_1=r_{11}=r_{21}=45$ Ω; varža apibūdinanti magnetinius nuostolius $r_2=r_{12}=r_{22}=3000$ Ω; variklio elektromagnetų ričių induktyvumai priklauso nuo variklio judžiosios dalies padėties h ir kinta nuo $L_{\min}\approx 0,955$ H, vidurinėje padėtyje $L_0\approx 2,548$ Ω iki didžiausios $L_{\max}\approx 4,14$ H – šie induktyvumai kinta pagal sinuso dėsnį (taip yra įvertinamas elektromagnetų prisotinimas) [1, 3, 4]; variklio nominali efektinė įtampa $U_n=220$ V; variklio nominali bendroji srovė $I_n\approx 1,3$ A; variklio aktyvioji galia $P\approx 140$ W; maitinančios įtampos dažnis $f_T=50$ Hz. Modelis buvo priverstinai aušinamas oru ir tepamas skystu tepalu, kad sumažėtų trintis tarp „statoriaus“ ir judžiosios dalies.



4.1 pav. Tiriomojo įtaiso fizinis modelis: a) ir b) eskiziniai brėžiniai [3]; c) bendras vaizdas

Fizinio eksperimento metu buvo atliekami tokie bandymai bei tyrimai:

- įtaiso pakabos standžio C_{mech1} nustatymas;
- savitarpio induktyvumo M nustatymas esant sustabdytai ŠJMĮ judžiajai daliai;
- įtaiso „statoriaus“ mechaninių švytavimų poslinkio, greičio ir pagreičio oscilogramų sudarymas ir GFT analizė;

d) įtaiso bendrosios srovės $i(t)$ oscilogramų sudarymas ir GFT analizė, keičiant tiristorių atidarymo kampą α_{Tir} ;

e) vienos apvijos $i_{L1}(t)$ srovės oscilogramų sudarymas ir GFT analizė, keičiant tiristorių atidarymo kampą α_{Tir} ;

f) bendrosios srovės efektinės vertės I ir nuolatinės dedamosios I_0 (kai įtaisas dirba asimetriškai) matavimas, esant nesimetrinei ŠJMĮ apkrovai. Taip pat buvo atlikti našumo Q ir slėgio p_2 matavimai;

g) judžiosios dalies centro poslinkio matavimai H_0 , tuo pačiu matuojant ir ŠJMĮ bendrosios srovės nuolatinę dedamąją I_0 ;

h) judžiosios dalies švytavimų amplitudės matavimas.

Tyrimas susideda iš tiesioginių eksperimentinių matavimų ir gautų duomenų analizės.

4.2. Tyrimo metodai, priemonės ir atlikimo eiga

Eksperimentų atlikimo metu, ŠJMĮ darbas buvo tiriamas esant normaliam simetriniam darbo režimui, kai nebuvo švytavimų asimetrijos ir režimui, kai asimetrija buvo sudaryta dirbtinai. Atliekant tyrimus, asimetrija buvo sudaroma dviem būdais:

- keičiant dvipusio ŠJMĮ-kompresoriaus padėtį t.y., įtaiso padėtį keičiant iš horizontalios padėties \leftrightarrow į vertikalią, verčiant į priešingas puses – $\uparrow\downarrow$. Tuo būdu stūmoklį veikdavo pastovi sunkio jėga;

- skirtingai keičiant kompresoriaus kameroje oro suspaudimo slėgius panaudojant sklendes.

Eksperimentinio tyrimo metu naudota matavimo įranga pateikta priede nr. 8.

Eksperimento atlikimo tvarka. Kadangi darbo tema yra tiristoriais valdomas ŠJMĮ-kompresorius, kurio modelis pagamintas KU Elektrotechnikos katedroje (4.1 pav.), tai buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai, kuriais buvo siekiama:

1. nustatyti įtaiso rodiklių priklausomybes nuo tiristorių atidarymo kampo α_{Tir} – bendrąją grandinės srovę I , srovės nuolatinę dedamąją I_0 ;

2. nustatyti įtaiso – kompresoriaus našumo Q priklausomybę nuo suspaudimo slėgio p_2 ir tiristorių atidarymo kampo α_{Tir} ;

3. nustatyti visų, 1 ir 2 punktuose paminėtų, parametrų priklausomybes nuo srovės nuolatinės dedamosios I_0 ;

4. išanalizuoti bendrosios $i(t)$ ir atskirų variklio apvijų srovių $i_1(t)$ ir $i_2(t)$ oscilogramas;

5. nustatyti bendrosios srovės harmonikas;

6. nustatyti sąryšį tarp judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės ir bendrosios srovės pirmosios harmonikos;

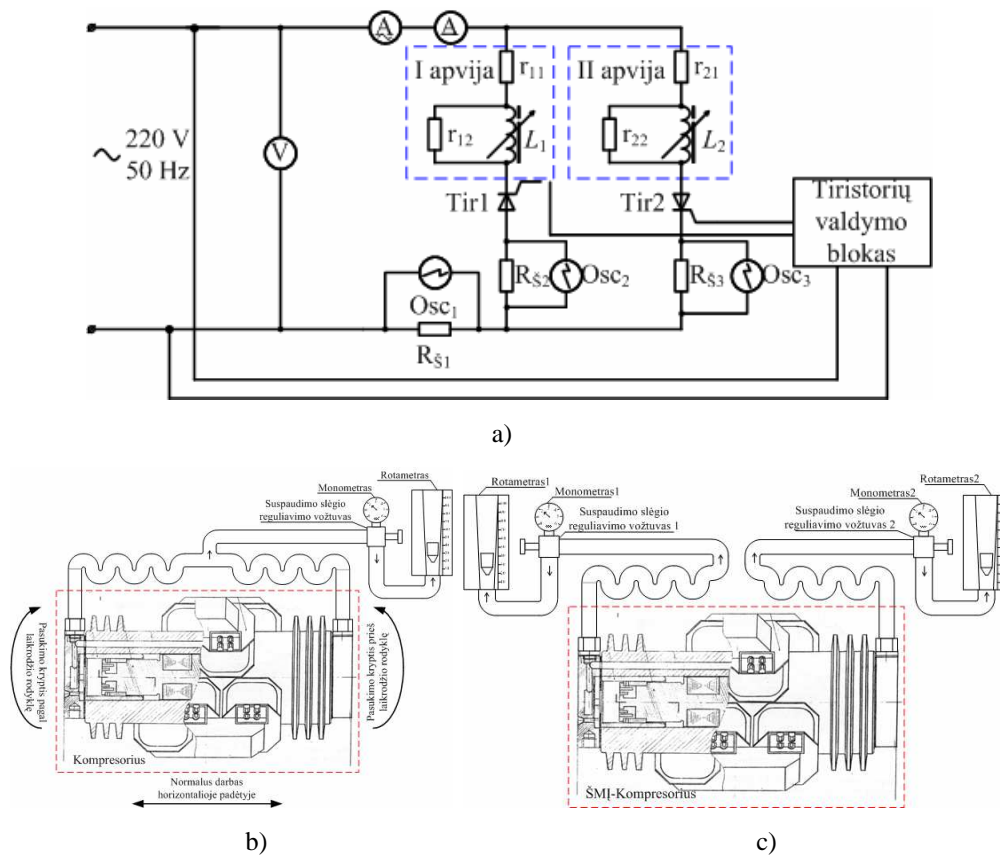
7. patikrinti, ar abipusis induktyvumas M yra sąlyginai mažas lyginant su apvijų induktyvumu L ir, ar galima jo nevertinti matematiniuose skaičiavimuose;

8. nustatyti ŠJMĮ pakabos parametras C_{mech1} .

Eksperimentiniai bandymai buvo atliekami tokia tvarka:

1. Maitinant įtaisą per tiristorius ir palaikant pastovų tiristorių atidarymo kampą, buvo keičiamas suspaudimo slėgis p_2 (reguliuojamu vožtuvu) ir matuojama įtampa U , bendrosios grandinės srovė I , nuolatinė srovės dedamoji I_0 , našumas Q ir

suspaudimo slėgis p_2 . Šių bandymu metu ŠJMI buvo keliose padėtyse – horizontalioje ir vertikaloje verčiant agregatą į skirtingas puses, kad būtų pridėdama nuolatinė jėgos dedamoji (sunkio jėga F_g). Bendrosios srovės ir atskirų variklio apvijų srovių oscilogramos buvo gautos įvedus šuntus į bendrąją ir atskirų variklio apvijų grandines. Eksperimentas buvo atliekamas pagal schemas, pateiktas 4.2 paveiksle.

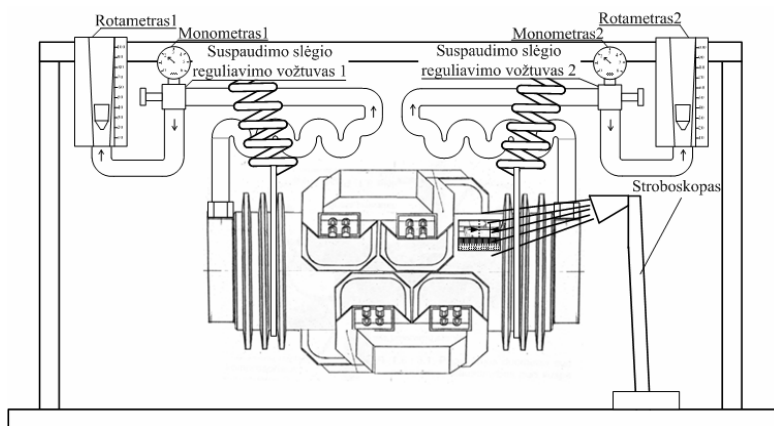


4.2 pav. ŠJMI tyrimo schemas: a) oscilogramoms ir elektriniams parametrams matuoti (P , I , I_0 , U) ir b) ir c) technologiniams parametrams matuoti (p_2 , Q)

2. Abipusio induktyvumo M nustatymui buvo atlikti matavimai panaudojus schemą, kai viena apvija maitinama iš tinklo, o kita apvija prijungta prie voltmetro (eksperimento schema pateikta priede nr. 8; 8.1 pav.).

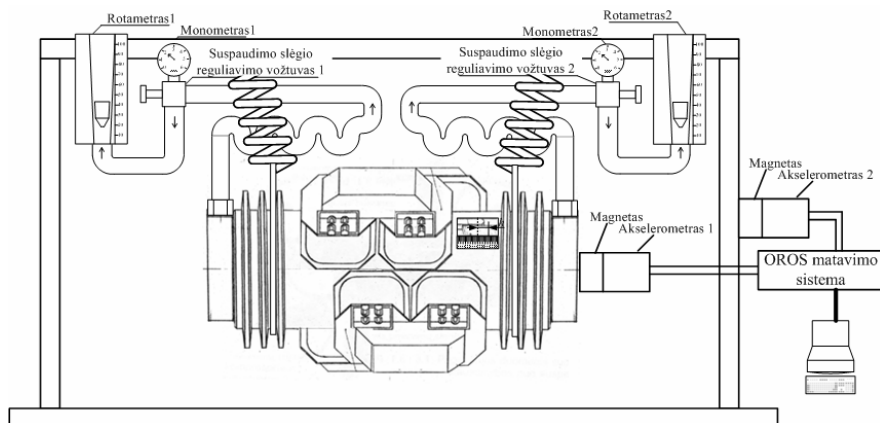
3. Įtaiso pakabos standžio C_{mech1} nustatymas buvo atliekamas prikabinus dinamometrą ašine kryptimi prie ŠJMI „statoriaus“ dalies, kai įrenginys nedirbo. Matuojant poveikio jėgą ir poslinkį, buvo apskaičiuotas C_{mech1} (eksperimento schema pateikta priede nr. 8; 8.2 pav.).

4. Judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės buvo išmatuotos panaudojus stroboskopą, kai pagal žymeklį buvo stebima švytavimų poslinkio padėtis, specialiai variklio-kompresoriaus korpuse padarytoje kiaurymėje (4.3 pav.)



4.3 pav. ŠJMĮ tyrimo schema švytavimų poslinkio amplitudės ir švytavimų centro poslinkio nustatymui

5. Matuojant OROS sistema buvo nustatyti „statoriaus“ švytavimų greičiai, pagreičiai ir poslinkiai, atlikta GFT signalų analizė. Eksperimentas buvo atliekamas pritvirtinus (4.4 pav.) jutiklius prie „statoriaus“ korpuso (akselerometras 1) ir ant rėmo (akselerometras 2), ant kurio pakabintas įtaisas.



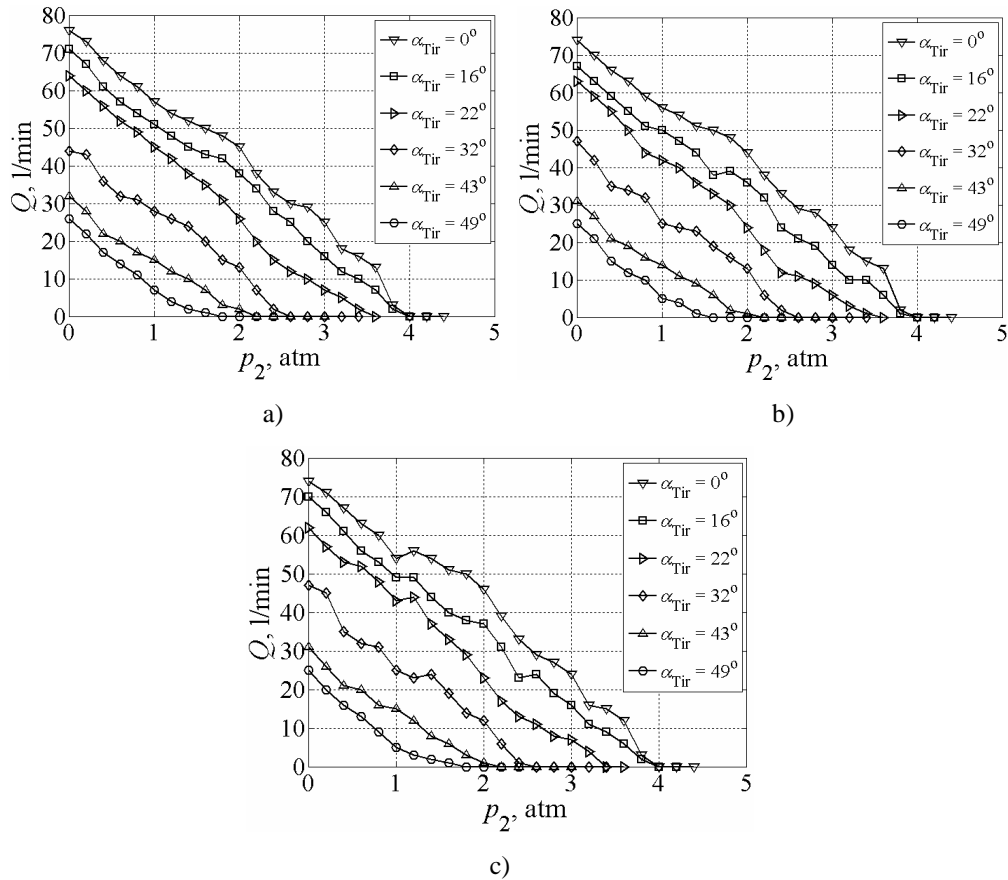
4.4 pav. ŠJMĮ tyrimo schema, skirta „statoriaus“ švytavimų poslinkio, greičio ir pagreičio oscilogramoms gauti ir atlikti signalų GFT

Aprašyta eksperimento eiga ir naudota matavimo įranga leido atlikti numatytus bandymus, kurių rezultatai pateikti kitame poskyryje.

4.3. Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė

Poskyriuje aptariami gauti eksperimento rezultatai, jų sąryšis su darbo tikslu ir uždaviniais. Pirmoji eksperimento dalis skirta tiristoriniu keitikliu valdomo švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso (švytuojamojo judesio pulsuojamąsios srovės variklio kompresoriaus pavaroje) charakteristikų sudarymui (pagal schemas 4.2 pav.):

1. Eksperimento rezultatų analizės dalis susideda iš nagrinėjamos kompresoriaus našumo charakteristikos, keičiant tiristoriaus atidarymo kampą α_{Tir} (tuo pačiu ir maitinančios įtampos dydį) ir suspaudimo slėgį p_2 .



4.5 pav. Charakteristikos $Q=f(\alpha_{Tir}, p_2)$, įtaisui dirbant horizontalioje padėtyje (a); dirbant vertikalioje padėtyje, jį verčiant pirmąja apvija aukštyn „pagal laikrodžio rodyklę“ (pirmoji apvija – tai 4.2 pav. b pavaizduota kairioji apvija); (c) įtaisui esant vertikalioje padėtyje, jį verčiant antrąja apvija aukštyn „prieš laikrodžio rodyklę“

4.5 paveiksle pateiktos našumo priklausomybės $Q=f(\alpha_{Tir}, p_2)$ nuo tiristoriaus atidarymo kampo α_{Tir} ir suspaudimo slėgio p_2 . Atliekant šiuos bandymus įtaisas dirbo trijose padėtyse: horizontalioje (4.5 pav. a) ir dviejose vertikaliose padėtyse (esant pirmoje vertikalioje padėtyje, jį verčiant pirmąja apvija aukštyn „pagal laikrodžio rodyklę“ (4.5 pav. b); esant antroje vertikalioje padėtyje, jį verčiant antrąja apvija aukštyn „prieš laikrodžio rodyklę“ (4.5 pav. c)). Iš gautų rezultatų galima teigti, kad, keičiant tiristorių atidarymo kampą, kompresoriaus našumas gali būti valdomas plačiose ribose. Įtaiso padėties keitimas turėjo nežymią įtaką kompresoriaus našumui, nes kompresoriui esant vertikalioje padėtyje, jo judžiąją dalį veikianti papildoma pastovi sunkio jėga yra lygi:

$$F_s = m_2 g = 0,3 \cdot 9,81 = 2,9 \text{ N}. \quad (4.1)$$

Tai nedidelė papildoma jėga, ją lyginant su kompresoriaus suspaudimo jėga, kuri gali turėti didesnę įtaką tik esant mažiems suspaudimo slėgiams:

$$F_p = (p_2 - p_1) \cdot \frac{\pi D_s^2}{4} = (1,2 - 1,0) \cdot 1,01325 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 13,38 \text{ N}. \quad (4.2)$$

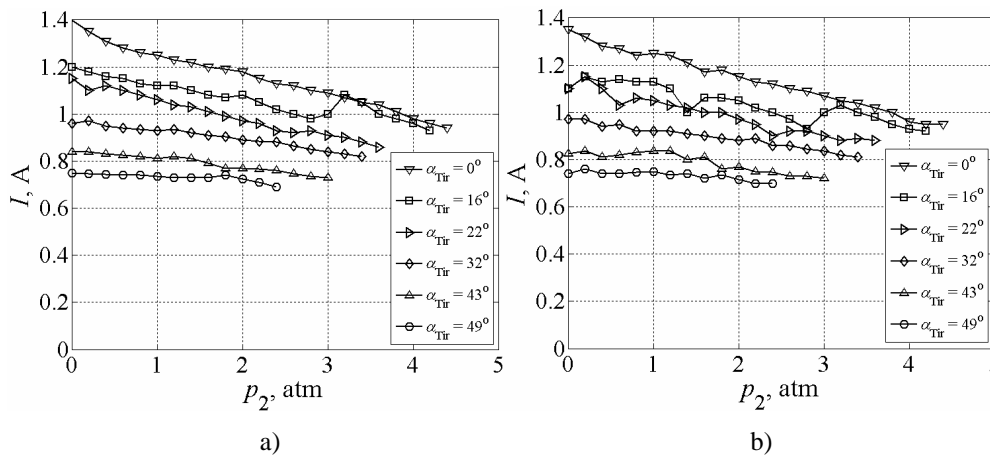
Papildoma jėga skaičiuotoju atveju sudaro 21,6% nuo bendrosios slėgio jėgos. Jei suspaudžiamo oro slėgis yra 3 atm, tai pagal (4.2) $F_p = 198,06 \text{ N}$, o papildoma jėga sudarytų tik 1,5% visos slėgio sukuriamos pasipriešinimo jėgos. Taigi, galima teigti, kad, esant vertikaliam darbui, sunkio jėgos įtaka yra didesnė tik esant mažiems suspaudimo slėgiams. Kadangi kompresoriai skirti orą suspausti iki didesnių slėgių, nei 1 atm, tai mažos masės judžiąją dalį veikiančios sunkio jėgos įtaka našumui yra maža. Atvejais, kai kompresoriaus JD masė yra didesnė, reikėtų atsižvelgti, kokią įtaką turėtų sunkio jėga, jei kompresorius būtų montuojamas vertikaloje padėtyje. Tačiau, ŠJMĮ kompresorius siūloma montuoti horizontalioje padėtyje, nes vertikali padėtis nežymiai sąlygoja ŠJMĮ asimetrinį darbą.

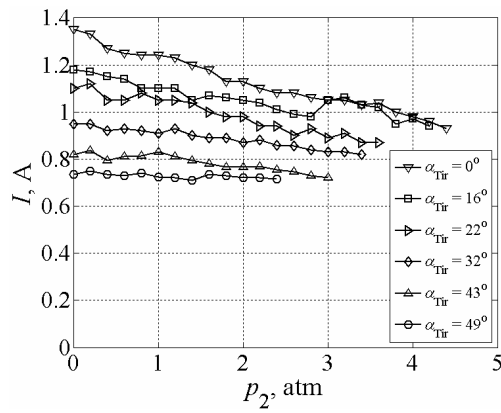
Šio tyrimo metu buvo reguliuojamas našumas, kuris yra ŠJMĮ judžiosios dalies švytavimų poslinkio funkcija (4.3), todėl galima sakyti, kad netiesiogiai buvo tiriamas švytavimų amplitudės valdymas:

$$Q(h_m) = 4\lambda \frac{\pi D_s^2}{4} f h_m = k_{\text{komp}} h_m. \quad (4.3)$$

čia λ – kompresoriaus koeficientas, kuris nusako išilimo, droseliavimo, nesandarumo, drėgmės ir nepilnos eigos įtaką kompresoriaus našumui Q . Šis koeficientas būna nuo 0,8 iki 0,95 ir siekiama, kad jis būtų kuo arčiau vieneto; h_m – stūmoklio švytavimų amplitudė.

4.6 paveiksle pateiktos ŠJMĮ bendrosios grandinės kintamosios srovės I efektinės priklausomybės nuo tiristorių atidarymo kampo α_{Tir} ir suspaudimo slėgio $p_2 - I = f(\alpha_{\text{Tir}}, p_2)$.



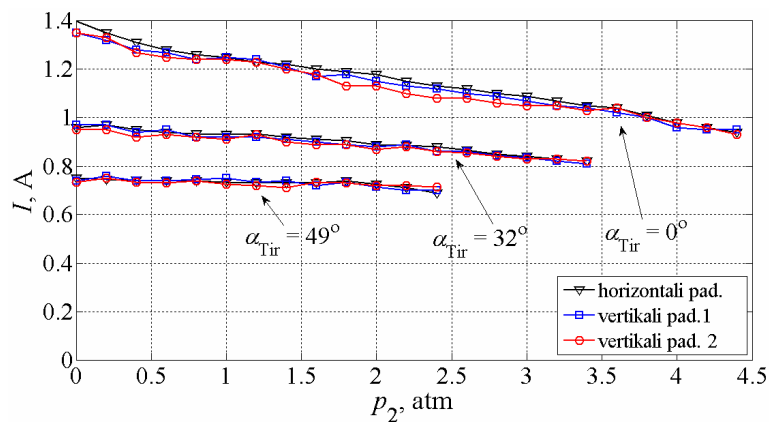


c)

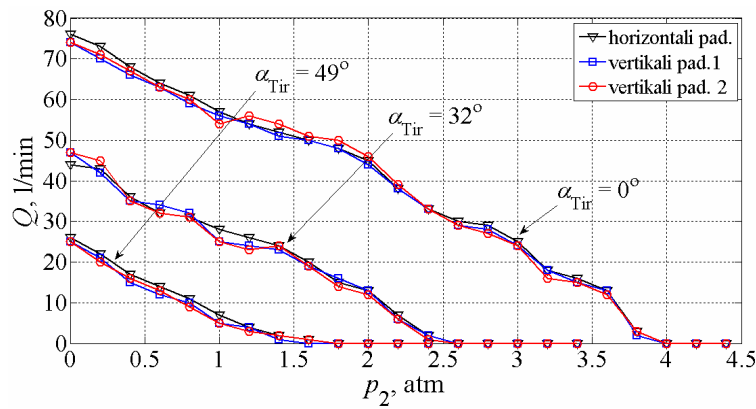
4.6 pav. Charakteristikos $I_s=f(\alpha_{Tir}, p_2)$, įtaisui dirbant horizontalioje padėtyje (a); dirbant vertikalioje padėtyje, jį verčiant pirmąja apvija aukštyn „pagal laikrodžio rodyklę“ (kaip ir 4.5 pav.); (c) įtaisui esant vertikalioje padėtyje, jį verčiant antrąja apvija aukštyn „prieš laikrodžio rodyklę“

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad įtaiso bendrosios grandinės srovė I_s , esant didesniai tiristorių atidarymo kampui α_{Tir} , kinta mažiau (4.6 pav. apatinės kreivės, 4,5%), nei esant nuliniam tiristorių atidarymo kampui (32,8%). Tai susiję su kompresoriaus darbo ypatumais, nes esant dideliems tiristorių atidarymo kampams, kompresoriaus našumas ir suspaudžiamas slėgis yra nedideli (4.5 pav.). Nuo šitų dviejų parametų priklauso kompresoriaus indikatorinės diagramos plotas (2.1 poskyris), kuris šiuo atveju yra mažesnis nei esant mažesniems atidarymo kampams. Kintant slėgiui, kai atidarymo kampai dideli, indikatorinės diagramos plotas kinta nedaug, todėl ir apkrova, tuo pačiu ir srovė, įtaiso elektrinei posistemei keičiasi nežymiai.

2. Kita eksperimento rezultatų analizės dalis susideda iš to, kad nagrinėjamos ŠJMĮ charakteristikos keičiant įtaiso padėtį, suspaudimo slėgį p_2 ir palaikant pastovų tiristoriaus atidarymo kampą α_{Tir} (tuo pačiu ir maitinančios įtampos dydį).



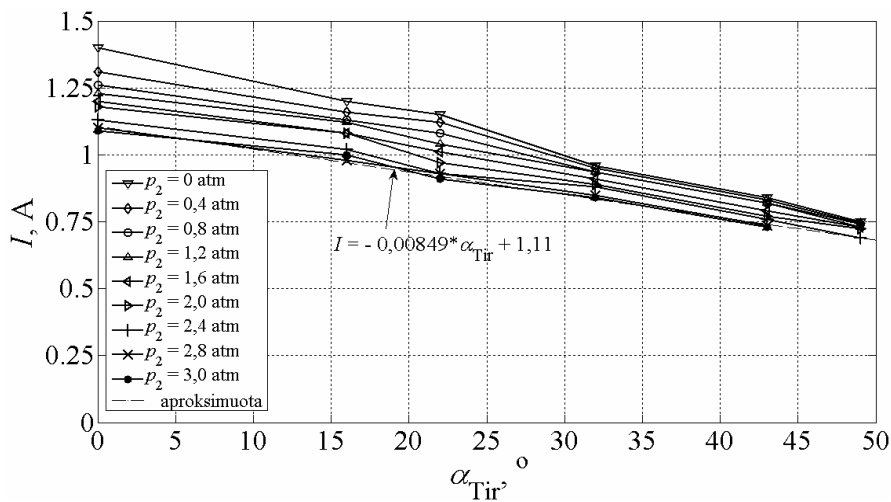
a)



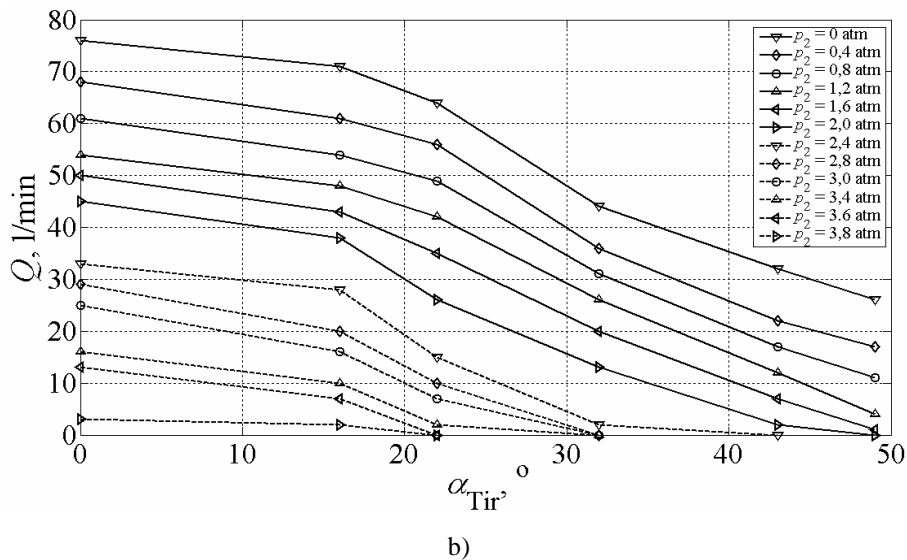
b)

4.7 pav. Charakteristikos a) $I=f(\text{padėtis}, p_2)$ ir b) $Q=f(\text{padėtis}, p_2)$, kai tiristorių atidarymo kampai: $\alpha_{Tir} = 0^\circ$; $\alpha_{Tir} = 32^\circ$; $\alpha_{Tir} = 49^\circ$; vertikali padėtis 1 – „pagal laikrodžio rodyklę“, vertikali padėtis 2 – „prieš laikrodžio rodyklę“

4.7 paveiksle pateiktos įtaiso bedrosios efektinės srovės ir našumo priklausomybės nuo ŠJMĮ padėties ir suspaudimo slėgio p_2 . Iš gautų matavimų ir skaičiavimo rezultatų, galima teigti, kad nuo ŠJMĮ padėties nežymiai priklauso anksčiau paminėti dydžiai – bendroji grandinės srovė ir kompresoriaus našumas. Kai įtaisas dirba horizontalioje padėtyje, kompresoriaus našumas ir variklio bendroji grandinės srovė didžiausi, o esant bet kokiai vertikaliai padėčiai kompresoriaus našumas ir variklio srovė sumažėja lyginant su horizontalia padėtimi – našumas sumažėja ne daugiau kaip nuo 2,3% iki 6,25%, esant tiristorių atidarymo kampui $\alpha_{Tir} = 49^\circ$ – net iki 14,25% (esant mažoms debeto vėrtėms santykinis našumo pasikeitimas yra didesnis – absoliutus sumažėjimas neviršijo – 3 l/min), o srovė – ne daugiau kaip 3,6% (absoliutine verte – ne daugiau kaip 0,05A).

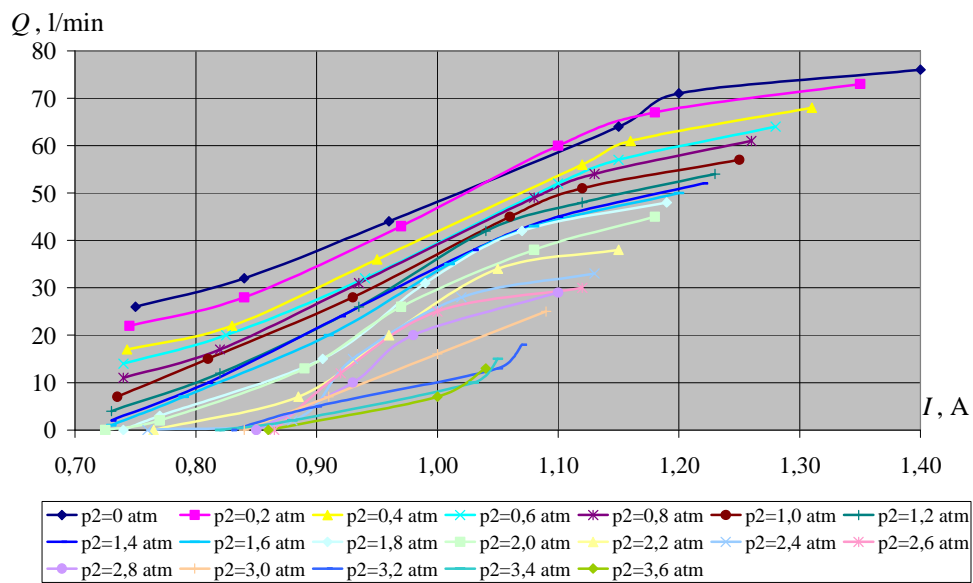


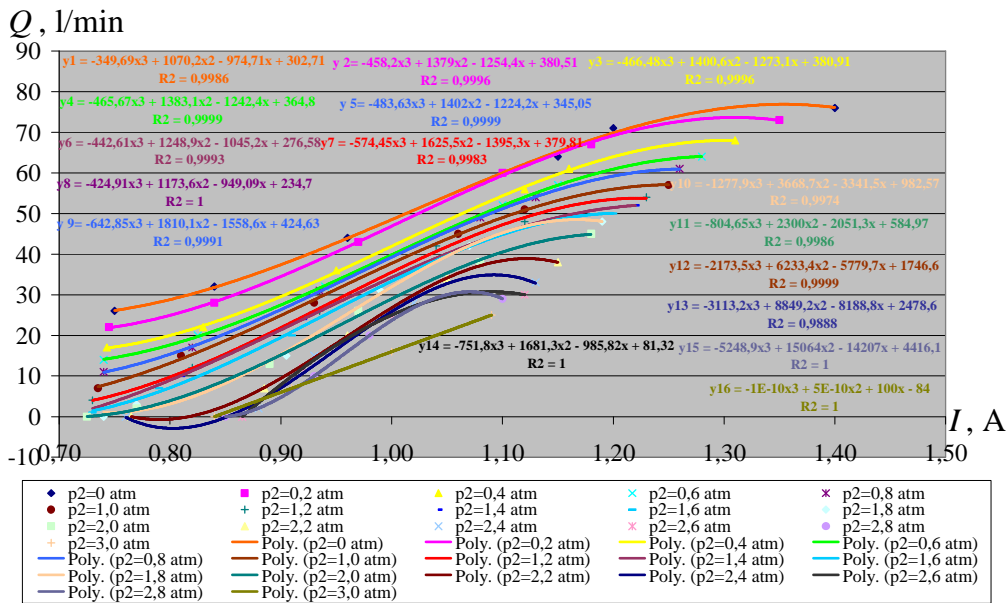
a)



4.8 pav. Charakteristikos $I=f(\alpha_{Tir}, p_2)$ (a) ir $Q=f(\alpha_{Tir}, p_2)$ (b)

4.8 paveiksle pavaizduotos priklausomybės $Q=f(\alpha_{Tir}, p_2)$ ir $I=f(\alpha_{Tir}, p_2)$ esant pastoviams slėgiams p_2 . Remiantis charakteristikomis (4.8 pav.), nustatyta, kad bendrosios grandinės srovė tiesiškai priklauso nuo atidarymo kampo ir keičiantis apkrovai keičiasi (slėgiui pakitus nuo 0 iki 3 atm, prie atidarymo kampo $\alpha_{Tir}=0^\circ$, srovė sumažėjo 22,1%; kandagi prie didelio suspaudimo slėgio našumas sumažėja 67%, tai darbo atliekama mažiau, todėl srovė ir sumažėja), o našumo priklausomybė nuo tiristorių atidarymo kampų yra netiesinė.





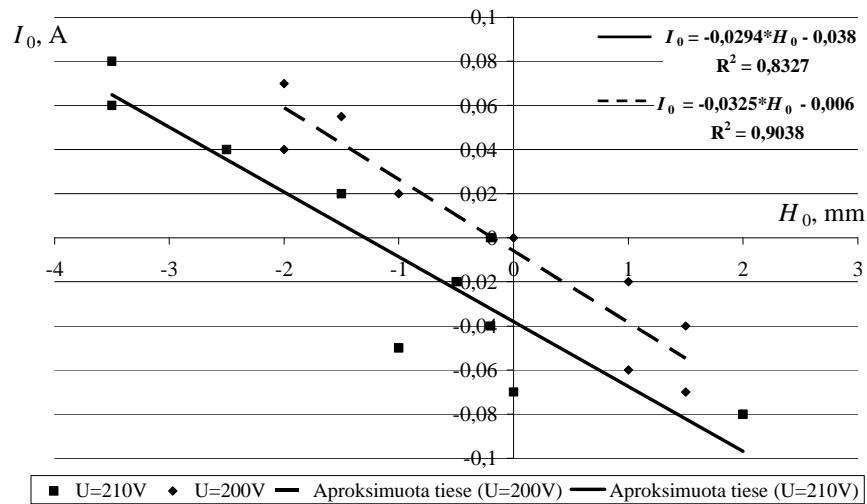
b)

4.9 pav. Našumo Q priklausomybė nuo bendrosios grandinės srovės, kai $p_2 = \text{const}$, $Q = f(I, p_2)$; a) – eksperimentiniai rezultatai; b) – eksperimentiniai rezultatai aproksimuoti trečiosios eilės polinomu

4.9 paveiksle, a) pateiktos charakteristikos $Q = f(I, p_2)$ esant pastoviams slėgiams p_2 . Šios charakteristikos netiesinės, tačiau šias kreives galima gerai aproksimuoti trečiojo laipsnio polinomu. Pastebėtina, kad kreivių $y_2 - y_8$ polinomų koeficientai yra artimi vienas kitam, kas leistų sudaryti paprastesnį bejutiklį švytavimų amplitudės arba našumo valdymo algoritmą remiantis bendrąja grandinės srove sudarant polinominę priklausomybę tarp bendrosios srovės ir švytavimų poslinkio.

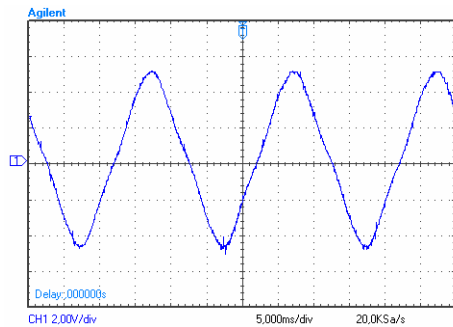
Bendrosios variklio srovės nuolatinės dedamosios priklausomybė nuo švytavimų centro poslinkio, pavaizduota 4.10 paveiksle, parodo kad, keičiant agregato padėtį iš horizontalios į vertikalią, nuolatinė srovės dedamoji didėja. Iš bendrosios variklio srovės nuolatinės dedamosios matavimo rezultatų nustatyta, kad variklis, o tuo pačiu ir kompresorius, dėl konstrukcinio įtaiso asimetriškumo ir horizontalioje padėtyje turi nuolatinę bendrosios srovės dedamąją.

Taigi, nuolatinė bendrosios srovės dedamoji ir švytavimų centro poslinkis, turi neigiamą tiesinę priklausomybę. Neigiamas srovės pokytis atsiranda dėl judžiosios dalies švytavimų centro poslinkio į kurią nors pusę, ir tos pusės apvijos grandinės induktyvumas ir induktyvioji varža per periodą būna didesni (kaip parodyta 2.2 poskyryje). Dėl šių priežasčių kitoje apvijoje padidėja srovė. Kadangi abiejų apvijų srovės yra pulsuojamosios ir nekeičia ženklų, tai bendrojoje grandinėje joms atsiimant, jų spektro nuolatinių dedamųjų dydžiai tampa nevienodi ir atsiranda nuolatinė dedamoji bendrojoje srovėje su ženklu, kuris yra priešingas švytavimų centro pokyčiui.

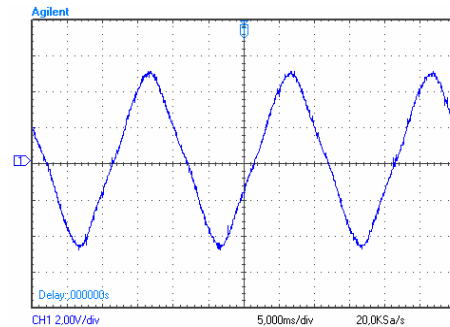


4.10 pav. Priklausomybės $I_0=f(H_0)$

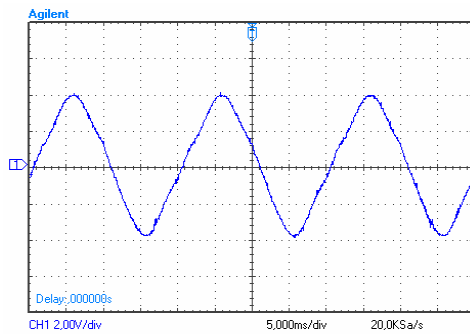
3. Darbe buvo analizuojamos bendrosios srovės harmonikos ir modeliavimo metodu nustatyta, kad bendrosios ŠJMI grandinės srovės yra aktualios tik pirmoji, ir trečioji harmonikos (antroji – tik gedimų atveju), o atskirų apvijų srovės turi nuolatines srovės dedamąsias ir pirmąsias penkias harmonikas, kurių vertės nėra nykstamai mažos.



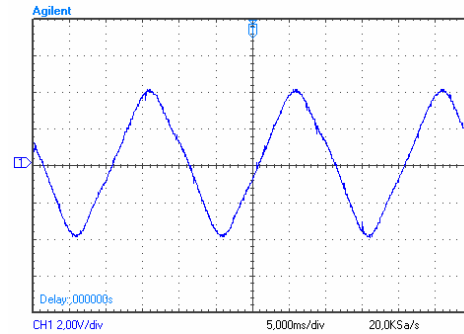
a)



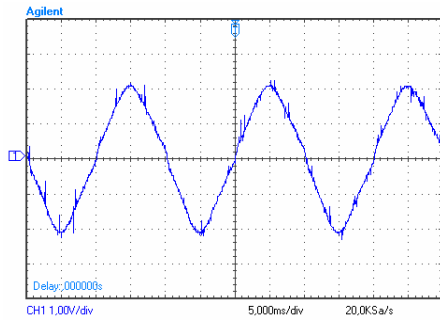
b)



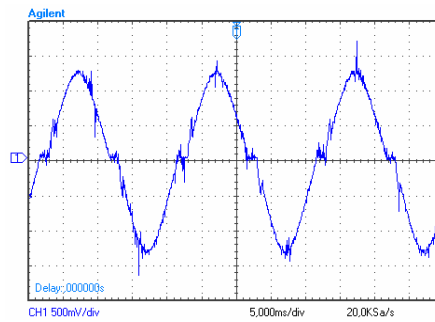
c)



d)



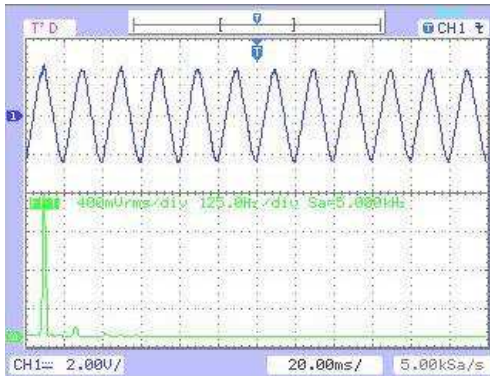
e)



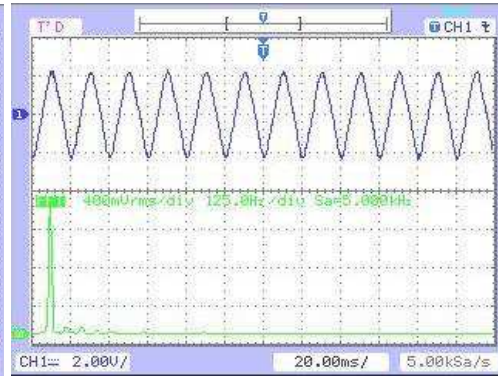
f)

4.11 pav. Bendrosios srovės oscilogramos, kai ŠJMĮ įsiurbimo ir išpūtimo slėgiai yra nevienodi, o našumas lygus nuliui. Oscilogramos $i=f(t)$ gautos, kai tiristorių atidarymo kampai: a) $\alpha_{Tir}=25^\circ$, b) $\alpha_{Tir}=40^\circ$, c) $\alpha_{Tir}=60^\circ$, d) $\alpha_{Tir}=70^\circ$, e) $\alpha_{Tir}=90^\circ$, f) $\alpha_{Tir}=110^\circ$ (trūkių srovių režimas)

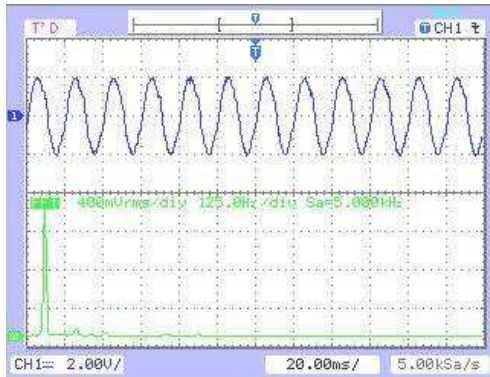
4.11 paveiksle pateikiamos bendrosios variklio srovės oscilogramos esant įvairiems tiristorių atidarymo kampams, o našumas lygus nuliui (kompresorius orą suspausdavo kameroje jo neišpūsdamas). Matavimai buvo atliekami su 4.2 paveiksle (a) pavaizduota schema.



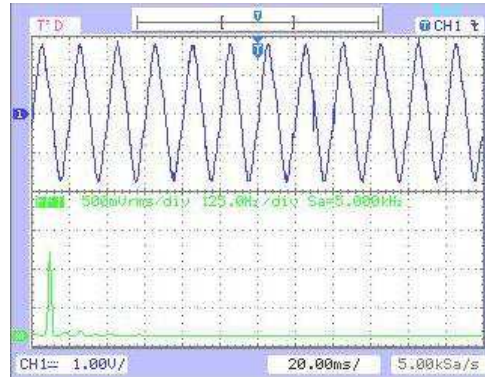
a)



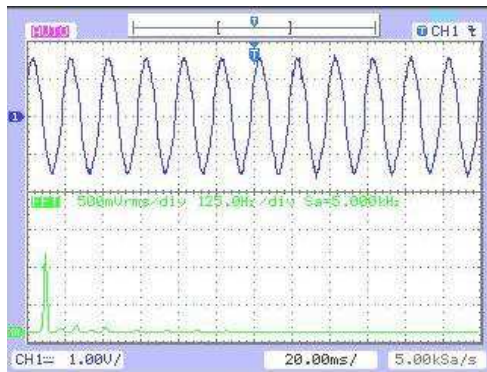
b)



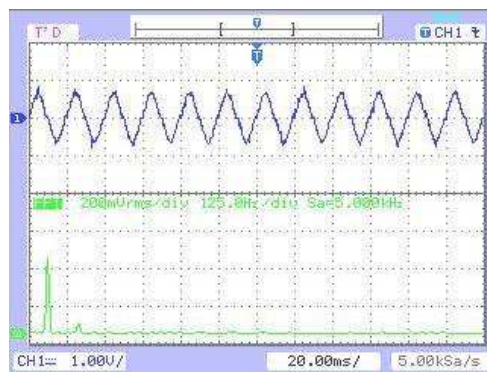
c)



d)



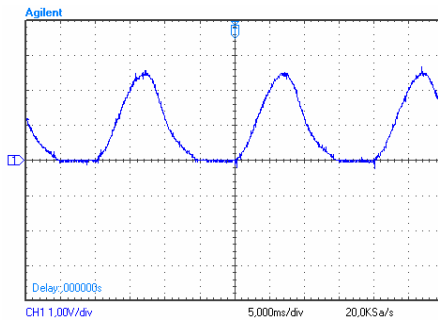
e)



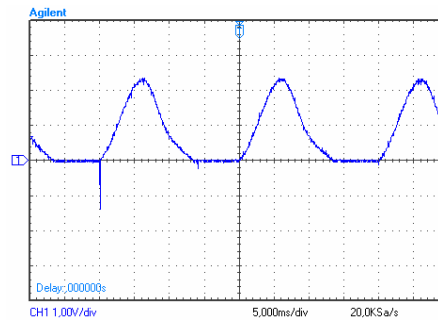
f)

4.12 pav. Bendrosios srovės oscilogramos ir GFT, kai įtaiso išsiurbimo ir išpūtimo slėgiai yra nevienodi, o našumas lygus nuliui. Oscilogramos $i=f(t)$ gautos, kai tiristorių atidarymo kampai: a) $\alpha_{Tir}=25^\circ$, b) $\alpha_{Tir}=40^\circ$, c) $\alpha_{Tir}=60^\circ$, d) $\alpha_{Tir}=70^\circ$, e) $\alpha_{Tir}=90^\circ$, f) $\alpha_{Tir}=110^\circ$ (trūkių režimas)

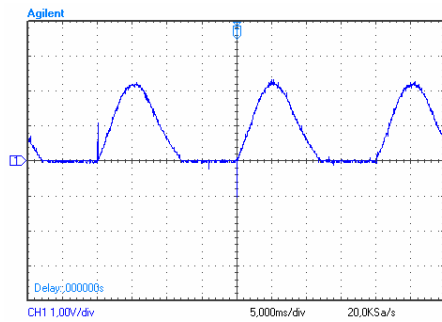
Gautosios srovės kokybiniu požiūriu atitinka modeliuotąsias bendrosios grandinės sroves. Šį kokybinį atitikimą taip pat patvirtina bendrosios srovės GFT, kuri pateikiama 4.12 paveiksle. Jomis remiantis galima teigti, kad modeliavimo rezultatai yra adekvatūs fizinio modelio gautiems rezultatams, nes tiek modeliavimo metu, tiek ir eksperimento metu buvo nustatytos tik pirmoji ir trečioji bendrosios srovės harmonikos, kurių dydis nėra nykštamai mažas. Pažymėtina, kad didinant tiristorių atidarymo kampus, mažėja ir švytavimų amplitudė. Dėl šios priežasties apvijų induktyvumai nepasiekia didžiausios vertės, ties kuria pasireiškia induktyvumų netiesiškumas, dėl kurio didėja trečioji bendrosios srovės harmonika. Atlikus bendrosios srovės ir atskiros šakos GFT tyrimą, nustatyta, kad bendrojoje srovėje egzistuoja tik pirmoji harmonika ir nežymi trečioji harmonika (nuo 12,2% iki 7,5% ir didėja, didėjant tiristorių atidarymo kampui). Šie rezultatai patvirtina modeliavimo rezultatus, kai trečioji harmonika sudarė 13,5% bendrosios srovės pirmosios harmonikos dydžio.



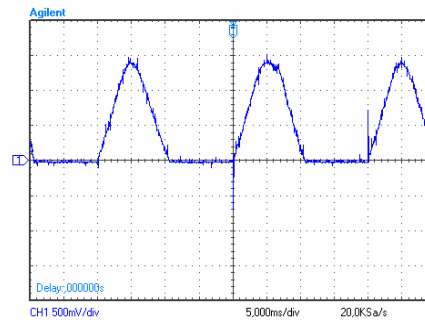
a)



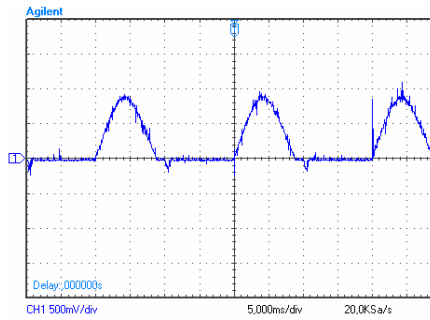
b)



c)



d)



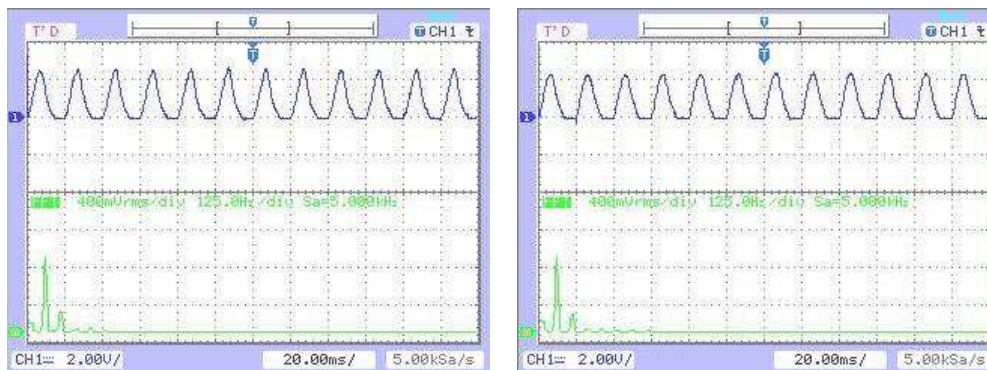
e)

4.13 pav. Vienos apvijos srovės oscilogramos, kai ŠJMĮ įsiurbimo ir išpūtimo slėgiai yra nevienodi, o našumas taip pat lygus nuliui. Oscilogramos $i_{11}=f(t)$ gautos, kai tiristorių atidarymo kampai: a) $\alpha_{Tir}=30^\circ$, b) $\alpha_{Tir}=50^\circ$, c) $\alpha_{Tir}=70^\circ$, d) $\alpha_{Tir}=90^\circ$, e) $\alpha_{Tir}=110^\circ$ (trūkių srovių režimas)

Bendrojoje srovėje egzistuoja tik nelyginės harmonikos, o harmonikos, kurios turi sąlyginai didesnes amplitudes yra pirmoji ir trečioji harmonikos. Kai nagrinėjama vienos šakos srovė – egzistuoja nuolatinė dedamoji, ir ryškesnės yra pirmosios trys harmonikos.

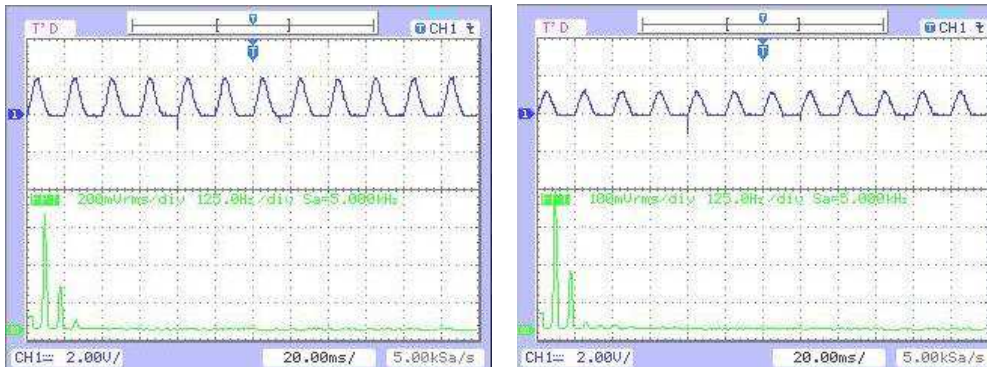
Iš oscilogramų, pateiktų 4.11 ir 4.13 paveiksluose, matyti, kaip keičiasi srovė ir jos amplitudė, priklausomai nuo tiristorių atidarymo kampo. Srovių dydžiai tarp modeliutų ir eksperimentinių rezultatų skiriasi dėl netikslų elektrinės ir mechaninės posistemės parametrų. Ne visi variklio parametrai, kurie nurodyti šio darbo tyrimo metode ir prielaidose, yra gerai žinomi, o pasirinkta ekvivalentinė schema, įvertinanti nuostolius magnetolaidyje, yra labiau teorinė. Taip pat nustatyta, kad nors atskirų šakų harmonikose egzistuoja lyginės harmonikos ir nuolatinės dedamosios, tačiau, joms atsiimant šios harmonikos kompensuojasi ir bendrosios srovės GFT neegzistuoja.

Eksperimento rezultatai parodo, kad ŠJMĮ pavaros tiristorinis valdymas galėtų būti panaudotas, kur reikalingas valdomas kompresorius (tiksliau jo našumas) už mažą kainą ir nesudėtingose sistemose. Norint įgyvendinti bejutiklį valdymą, reikėtų į sistemą montuoti mikroprocesorių su atmintimi, kuris analizuotų kintamosios srovės dydį ir pagal tai reguliuotų tiristorių atidarymo kampą ir kompresoriaus našumą.



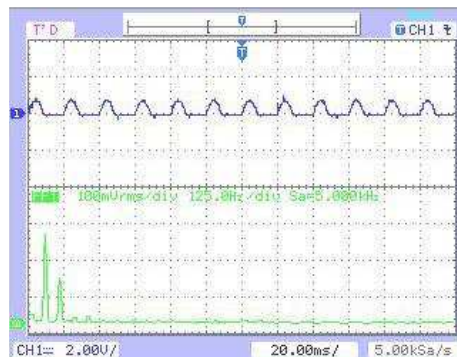
a)

b)



c)

d)



e)

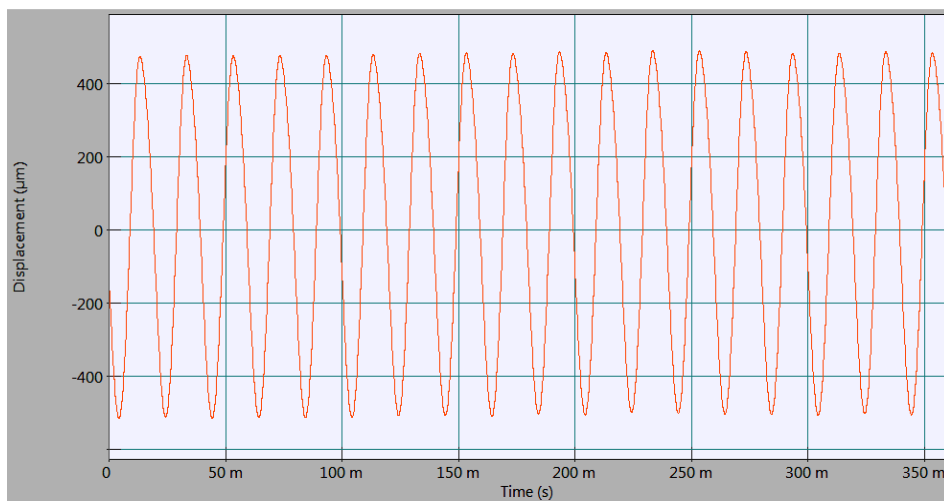
4.14 pav. Vienos apvijos srovės oscilogramos ir GFT, kai ŠJMĮ įsiurbimo ir išpūtimo slėgiai yra nevienodi, o našumas lygus nuliui. Oscilogramos $i_{11}=f(t)$ gautos, kai tiristorių atidarymo kampai: a) $\alpha_{Tir}=30^\circ$, b) $\alpha_{Tir}=50^\circ$, c) $\alpha_{Tir}=70^\circ$, d) $\alpha_{Tir}=90^\circ$, e) $\alpha_{Tir}=110^\circ$ (trūkių srovių režimas)

Atskiros šakos srovės GFT tyrimu nustatytos pirmosios trys harmonikos ir nuolatinė dedamoji. Įtaiso šakos srovės antroji ir trečioji harmonikos taip pat didėja, didėjant tiristorių atidarymo kampui (antroji harmonika sudaro nuo 28,75% iki 50%

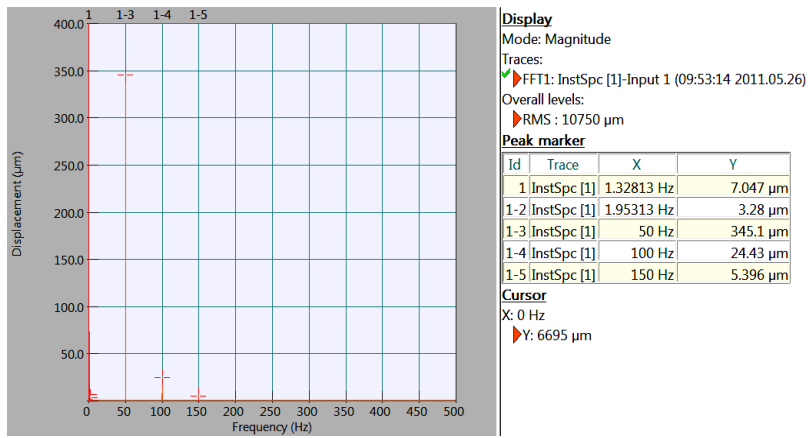
pirmosios harmonikos dydžio, trečioji – nuo 4,2% iki 8%, kai kuriais atvejais nustatyta ketvirtoji – nuo 2,5% iki 5%).

4. Matavimai atlikti vibracijų matavimo įranga OROS. Eksperimento metu buvo matuojami „statoriaus“ švytavimų pagreitis akselerometrais ir integruojant vieną ir du kartus – apskaičiuotas švytavimų greitis, ir poslinkis. Šio tyrimo tikslas buvo nustatyti ne švytavimų amplitudes, o atlikti ŠJMĮ poslinkių, greičių ir pagreičių spektrinę analizę naudojant GFT metodą. Matavimai buvo atliekami primontavus pagreičio jutiklius dviejose vietose – prie ŠJMĮ „statoriaus“ ir prie rėmo, prie kurio spyruoklėmis prikabinatas ŠJMĮ. Pagreičių GFT parodė, kad „statoriaus“ pagreitis nėra harmoninis signalas, ir turi lygines harmonikas, dėl nesimetrinio pagreičio pobūdžio. Eksperimentu nustatyta, kad pagreitis nuolatinės dedamosios neturi. Realus fizinio modelio „statoriaus“ pagreičio GFT egzistuoja pirmosios penkios harmonikos, kartotinos tinklo dažniui. „Statoriaus“ pagreičio GFT ir oscilogramos pateikti 8 priedo 8.3 paveiksle (a ir b).

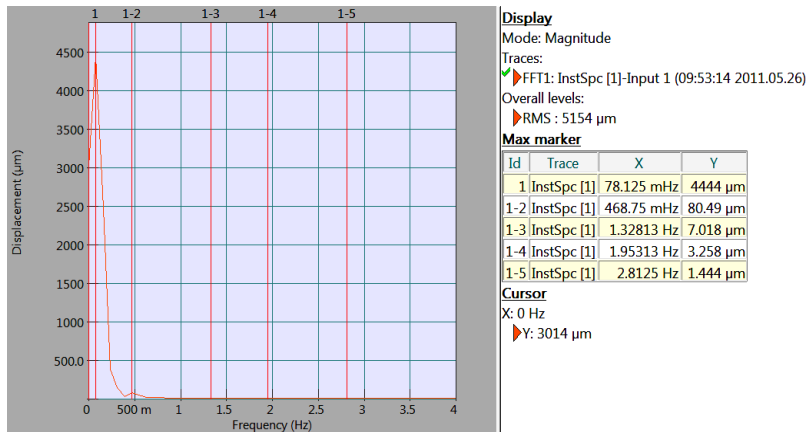
ŠJMĮ „statoriaus“ švytavimų greičio GFT ir oscilogramos pateiktos 8 priedo 8.3 paveiksle (c ir d). „Statoriaus“ greičio pobūdis yra artimesnis sinusiniam, nei pagreičio, tačiau egzistuoja tos pačios penkios harmonikos, kurios, pradedant trečiąja (trečioji harmonika sudaro 4,7% pirmosios harmonikos, penktoji – 0,4%), lyginant su pagreičio harmonikomis (trečioji pagreičio sudaro 13,7% pirmosios harmonikos, penktoji – 2,1%), žymiai sumažėja. Lyginių harmonikų egzistavimą galima paaiškinti tokiu būdu – kadangi kompresorius yra simetrinis, tai per vieną periodą oras yra du kartus įtraukiamas, suspaudžiamas ir išpučiamas į sistemą arba rezervuarą. Tokio darbo metu kompresoriaus vožtuvai dirba dvigubu dažniu, lyginant su tinklo dažniu. Tai ir paaiškina antrosios, ketvirtosios ir aukštesnių lyginių harmonikų atsiradimą. Tarpines harmonikas, kurių dažnis nėra kartotinas tinklo dažniui, gali sukelti tų pačių vožtuvų virpėjimas atsidarymo ir uždarymo metu. Kadangi vožtuvų darbas mechaninės posistemės tyrime nebuvo analizuotas, tai, tiek modeliavimo, tiek ir analitinio skaičiavimo metu, šios harmonikos neatsirado modeliavimo rezultatų GFT analizėje.



a)



b)



c)

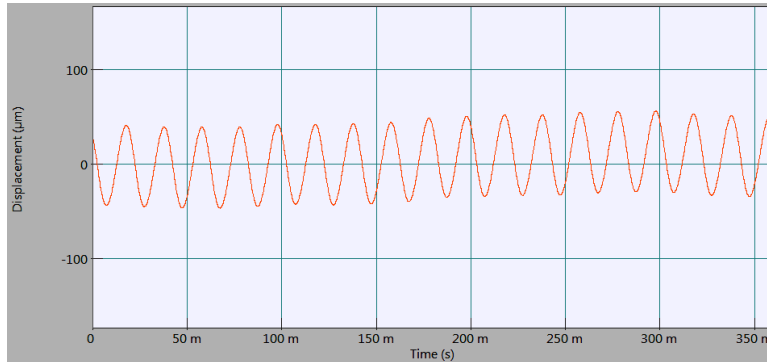
4.15 pav. ŠJMĮ „statoriaus“ švytavimų poslinkio oscilograma (a) ir GFT (b ir c) (matavimai atlikti su pagreičio jutikliu prijungtu prie ŠJMĮ „statoriaus“)

Atliekant ŠJMĮ „statoriaus“ švytavimų poslinkio matavimus ir jų GFT (4.15 pav.), buvo nustatyta, kad egzistuoja tik pirmosios trys pagrindinės harmonikos. Trečioji švytavimų poslinkio harmonika sudaro 1,6% pirmosios harmonikos, o antrosios harmonikos egzistavimas taip pat paaiškinamas ŠJMĮ kompresoriaus vožtuvų darbu.

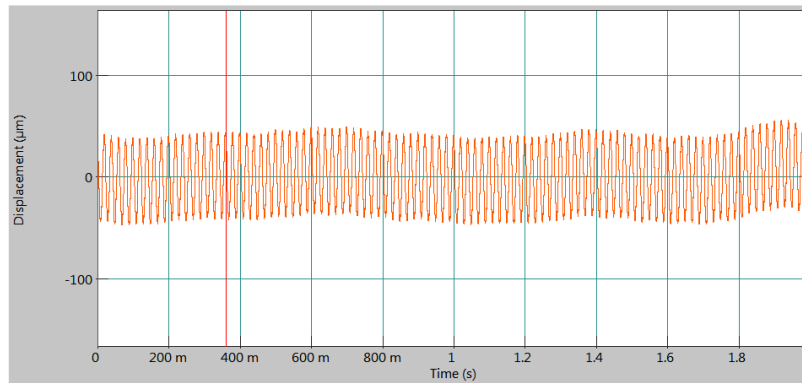
Ekspimento metu nustatyta, kad egzistuoja ir žemo dažnio „statoriaus“ švytavimai, esantys iki 3 Hz. Žemo dažnio „statoriaus“ harmonika ties 1,95 Hz sudaro 0,9% pagrindinės harmonikos dydžio – tai atitinka modeliavimo rezultatus, kad „statorius“ turi dalinę harmoniką (eksperimento metu nustatyta dar viena žemo dažnio subharmonika (1,33 Hz), kuri galėjo būti pačio rėmo, ant kurio pritvirtintas tiriamasis įtaisas, o kitos žemesnės nekartinės harmonikos – stalo konstrukcijos). Nustatyta, kad „statoriaus“ švytavimų poslinkis turi ir nuolatinę dedamąją, nes esant nuliniam dažniui GFT signalas nėra lygus nuliui.

Taip pat tapatūs matavimai ir GFT analizė buvo atlikta matuojant nuo ŠJMĮ tvirtinimo rėmo. Rezultatai pateikti 4.16 ir 8 priedo 8.4 paveiksluose.

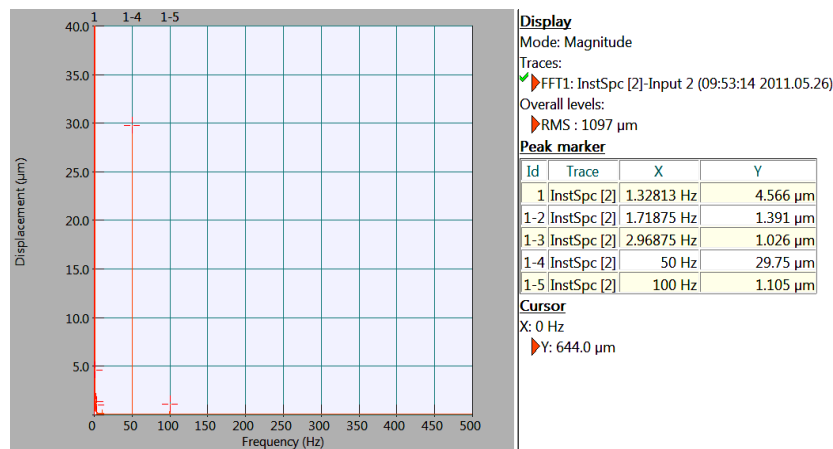
Spektriniu požiūriu gautieji rezultatai matuojant ant rėmo ir ant paties „statoriaus“ yra panašūs. Matuojant ant rėmo papildomos harmonikos galėjo atsirasti dėl pakabos spyruoklių, kurios ŠJMĮ tvirtina prie paties rėmo.



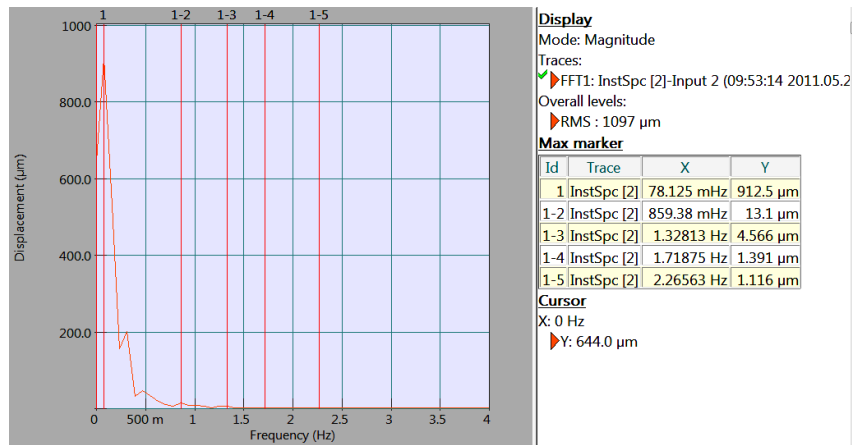
a)



b)



c)



d)

4.16 pav. ŠJMĮ „statoriaus“ poslinkio a) ir b) oscilogramos ir c) ir d) GFT (matavimai atlikti su pagreičio jutikliu prijungtu prie ŠJMĮ „statoriaus“ tvirtinimo rėmo)

Galutinai tiek skaičiuojant analitiniu būdu, tiek modeliuojant, tiek ir remiantis eksperimento rezultatais nustatyta, kad švytavimų poslinkį apibūdina pagrindinė harmonika, o trečioji yra nykstamai maža. Šią išvadą galima taikyti ir „statoriui“, ir judžiajai daliai. Nors judžiosios dalies švytavimų tiesioginės GFT atlikti nebuvo galima, dėl sudėtingo įrangos montavimo, tačiau, remiantis „statoriaus“ švytavimų harmonikų analize, galima teigti, kad judžiosios dalies švytavimų poslinkio trečioji harmonika yra nykstamai maža ir, jeigu būtų atvirkščiai, tai „statoriaus“ harmonikų analizės metu būtų nustatyta didesnė švytavimų poslinkio trečioji harmonika.

5. Kita eksperimentinio tyrimo dalis susijusi su abipusio induktyvumo nustatymu. Matavimai buvo atlikti panaudojant 8 priede pateiktą matavimų schemą (8.1 pav.). Abipusio induktyvumo nustatymas jau buvo aprašytas (įtaiso judžioji dalis buvo ties pirmąją apviją kraštinėje padėtyje abiem matavimo atvejais), o matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Abipusio induktyvumo nustatymo rezultatai

Eil. Nr.	Pirmajai apvijai				Antrajai apvijai			
	U	E_M	I	M	U	E_M	I	M
-	V	V	A	H	V	V	A	H
1	20	0,174	0,038	0,015	20	0,127	0,033	0,012
2	30	0,231	0,059	0,012	30	0,183	0,051	0,011
3	40	0,309	0,075	0,013	40	0,263	0,066	0,013
4	50	0,404	0,095	0,014	50	0,318	0,078	0,013
5	60	0,511	0,113	0,014	60	0,378	0,086	0,014
6	70	0,688	0,130	0,017	70	0,442	0,095	0,015
7	80	0,924	0,149	0,020	80	0,488	0,108	0,014
8	90	1,063	0,165	0,021	90	0,536	0,116	0,015
9	100	1,400	0,183	0,024	100	0,611	0,128	0,015

Šie matavimai ir skaičiavimai skirti įrodyti, kad abipusis induktyvumas yra mažas, lyginant su pagrindiniu induktyvumu (kuris kinta nuo 0,9 H iki 4,1 H esant didžiausiems švytavimų poslinkiams) ir jo galima nepaisyti tiek skaičiavimuose, tiek

ir modeliuojant. Eksperimento metu nustatytas abipusis apvijų induktyvumas yra sąlyginai mažas, lyginant su apvijų induktyvumu, ir daugiausiai tesudaro tik nuo 1,4% iki 2,5% mažiausios induktyvumo vertės $L_{\min}=0,955 H$. Tuo remiantis skaičiavimuose jis nevertintas. Esant įrenginio konstrukcijai, kai apvijos išdėstytos ne statmenai viena kitai, abipusis induktyvumas turi būti apskaičiuojamas iš konstrukcinių duomenų, arba jo kitimas nustatomas eksperimentiškai.

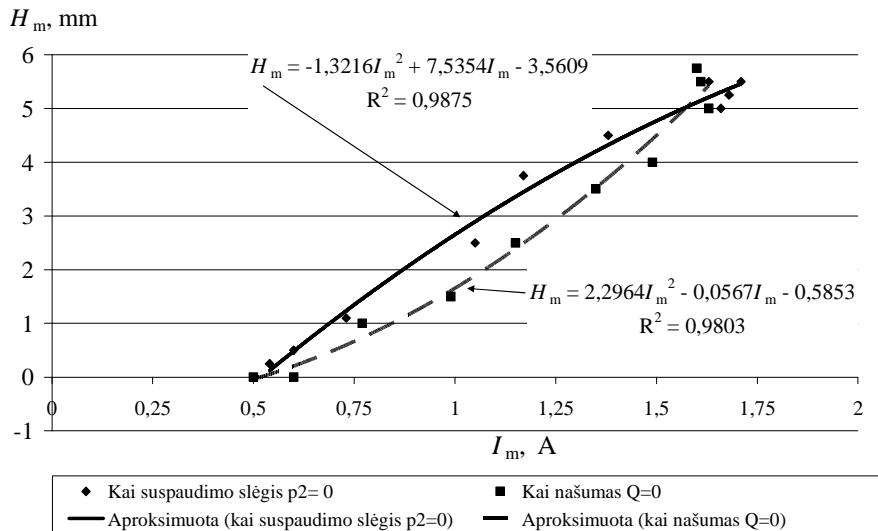
Eksperimentiniu būdu buvo atliktas ŠJMĮ „statoriaus“ pakabos standžio C_{mech1} nustatymas ašine švytavimų judėjimo kryptimi. Matavimai buvo atlikti panaudojant 8 priede pateiktą matavimų schemą (8.2 pav.). Šį eksperimentą buvo tikslinga atlikti norint nustatyti šio parametro tikrąją vertę lyginant su modeliavimu, kur šio dydžio diapazonas buvo keičiamas plačiose ribose.

4.2 lentelė. C_{mech1} standžio nustatymo rezultatai

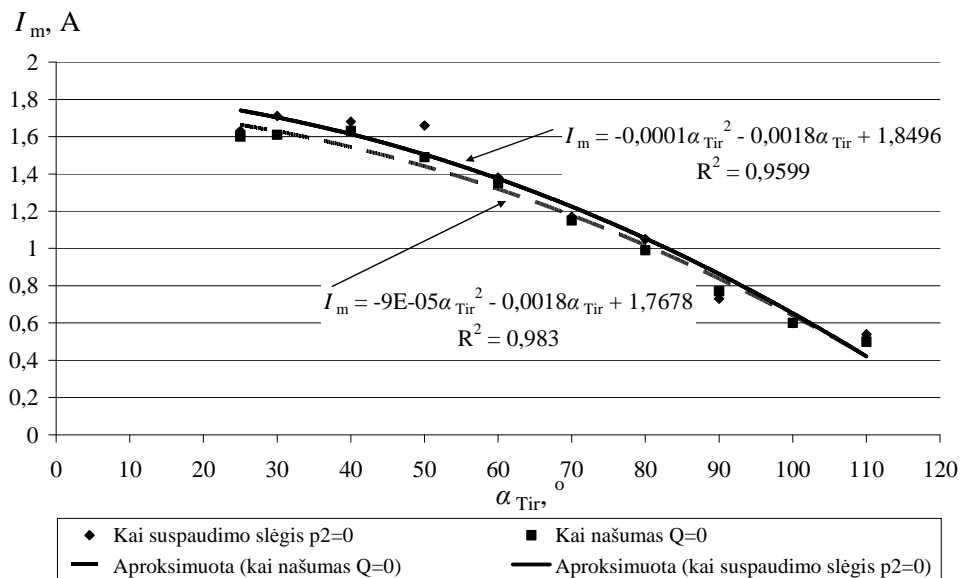
Eil. Nr.	F_{sp} N	Δx_{sp} 10^{-3} m	C_{mech1} N/m	$C_{\text{mech1,vid}}$ N/m
-	1,0	2,5	400	468,9
1	2,0	4,5	444,4	
2	3,0	7,0	428,6	
3	4,0	8,5	470,6	
4	5,0	10,0	500	
5	6,0	12,0	500	
6	7,0	13,0	538,5	

Modeliavimui pasirinkta skaičiavimo vertė buvo 500 N/m. Eksperimentu nustatyta, įtaiso pakaba yra labai liauna, nes jos standis yra daug kartų mažesnis, už kompresoriaus ekvivalentinį standį ($C_{\text{mech2}} = 27328$ N/m), suderintą mechaniniam rezonansui prie 50 Hz dažnio.

Taip pat eksperimentiniu būdu buvo matuojama reliatyviųjų švytavimų poslinkio amplitudė ir bendroji „statoriaus“ srovė, kai keičiamas tiristorių atidarymo kampas, gautos priklausomybės pateiktos 4.17-4.18 paveikslė.

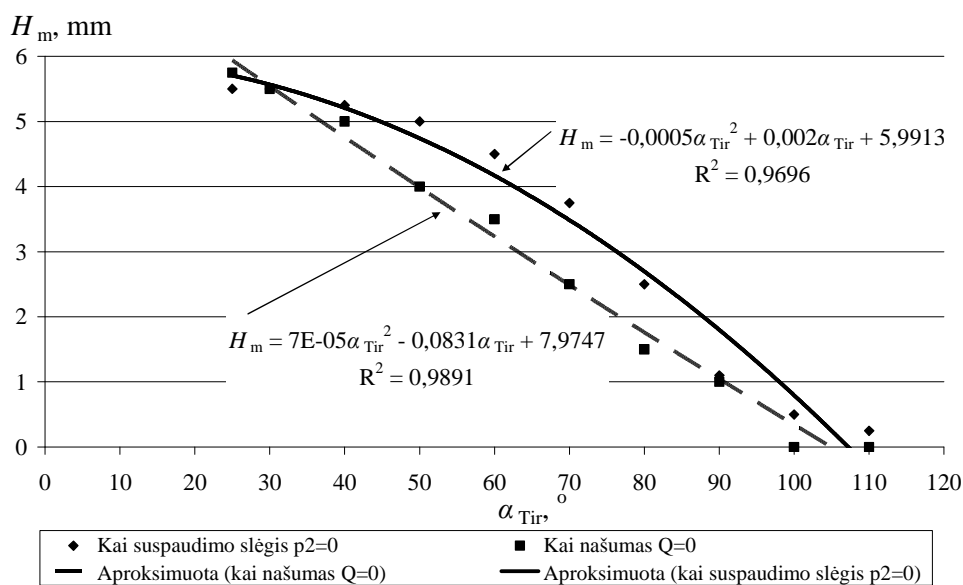


a)



b)

4.17 pav. ŠJMĮ srovės amplitudės priklausomybė nuo judžiosios dalies švytavių poslinkio amplitudės $H_m = f(I_m)$ (a) ir tiristorių atidarymo kampo $I_m = f(\alpha_{Tir})$ (b)



4.18 pav. ŠJMĮ judžiosios dalies švytavių poslinkio amplitudės priklausomybė nuo tiristorių atidarymo kampo $H_m = f(\alpha_{Tir})$

Esant kraštinėms kompresoriaus apkrovos sąlygoms, galima teigti, kad švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso bendrosios srovės amplitudės ir švytavių poslinkio amplitudės sąryšį galima laikyti netiesiniu antro laipsnio

sąryšiu (koreliacijos koeficientas ne mažesnis kaip 0,98), srovės priklausomybę nuo kampo galima aproksimuoti antros eilės polinomu (koreliacijos koeficientas ne mažesnis kaip 0,95). Taip pat antros eilės polinomu galima aproksimuoti ir švytavimų poslinkio priklausomybę nuo atidarymo kampo (koreliacijos koeficientas ne mažesnis kaip 0,96).

4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Sudarytas natūrinio fizinio eksperimento planas, eksperimento atlikimo metodika, parinkta matavimo įranga švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso – valdomo dvipusės veikos dvimasio bespyruoklio tiesiaėigio simetrinio nežadinamojo pulsuojamosios srovės elektros variklio, dirbančio kompresoriaus pavaroje. Sudarytos matavimo schemos bendrosios ir atskirų įtaiso šakų srovės harmonikų, kompresoriaus našumo ir JD švytavimų poslinkio nustatymui, švytavimų centro poslinkio, savitarpio induktyvumo ir „statoriaus“ pakabos standžio C_{mech1} nustatymui.

2. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad švytuojamojo mechatroninio įtaiso JD švytavimų centro poslinkis turi įtakos kompresoriaus našumui – didėjant švytavimų centro poslinkiui, našumas mažėja. Našumo sumažėjimas esant mažam suspaudimo laipsniui (iki vienos atmosferos virš atmosferinio slėgio) yra didesnis, nes ŠJMĮ veikianti pastovi sunkio jėga sukuria nuolatinę srovės dedamąją, kuri mažina bendrą įtaiso darbo našumą. Sunkio jėgos įtaka labiau pasireiškia esant mažiems suspaudimo slėgiams (prie 0,2 atm), ji sudaro 21,6% bendros jėgos, o esant 3 atm – tik 1,5%.

3. Eksperimento metu sudarytos ŠJMĮ našumo, kuris yra proporcingas švytavimų poslinkio amplitudei, priklausomybės nuo slėgio ir tiristorių atidarymo kampo, taip pat bendrosios srovės efektyvių ir amplitudinių verčių priklausomybės nuo atidarymo kampo ir suspaudžiamo slėgio. Našumo charakteristikų priklausomybė nuo srovės yra kvadratinė, kaip ir judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės priklausomybė nuo bendrosios srovės. Bendrosios srovės sąryšis su atidarymo kampais turi tiesinę priklausomybę, esant mažiems tiristorių atidarymo kampams. Didėjant tiristorių atidarymo kampui sąryšis tampa neteisiniu – kvadratinu. Taip pat išnagrinėta ŠJMĮ padėties įtaka našumui ir kintamajai srovei ir nustatyta, kad poveikis yra nežymus tarp ŠJMĮ darbo horizontalioje ir vertikalioje padėtyse, tačiau bet kuriuo atveju vertikalioje padėtyje įrenginys dirba asimetriškai. Norint pasiekti, kad ŠJMĮ dirbtų simetriškai, turi būti atliekamas asimetrinis tiristorių valdymas. Tai patvirtina analitinės dalies prielaidas ir modeliavimo rezultatus.

4. Eksperimentiškai nustatyta, kad bendrosios srovės nuolatinė dedamoji ir ŠJMĮ centro poslinkis turi tiesinę neigiamą priklausomybę. Tai patvirtina šios srovės nuolatinės dedamosios informatyvumą (taip pat nustatytą analitiškai ir modeliavimo būdu) nustatant švytavimų centro poslinkį.

5. Atlikus bendrosios srovės ir atskiros šakos GFT tyrimą nustatyta, kad bendrojoje srovėje egzistuoja tik pirmoji harmonika ir nežymi trečioji harmonika (nuo 12,2% iki 7,5% ir didėja didėjant tiristorių atidarymo kampui). Eksperimento

metu nustatytų srovių harmonikų dažniai (yra kartotini 50 Hz) sutampa su apskaičiuotais analitiškai arba modeliuotais. Šie rezultatai patvirtina modeliavimo rezultatus, kai trečioji harmonika sudarė 13,5% bendrosios srovės pirmosios harmonikos dydžio. Eksperimento metu nustatyta nežymi penktoji bendrosios srovės harmonika, kurios amplitudės dydžio, dėl trikdžių matavimo grandinėje, nepavyko nustatyti. Modeliavimo metu apskaičiuota penktoji harmonika sudarė 1,7% pirmosios harmonikos dydžio. Atskiros šakos srovės GFT tyrimu nustatytos pirmosios trys harmonikos ir nuolatinė dedamoji. Įtaiso šakos srovės antroji ir trečioji harmonikos taip pat didėja, didėjant tiristorių atidarymo kampui (antroji harmonika sudaro nuo 28,75% iki 50% pirmosios harmonikos dydžio, trečioji – nuo 4,2% iki 8%, kai kuriais atvejais nustatyta ketvirtoji – nuo 2,5% iki 5%). Modeliavimo būdu apskaičiuota, kad įtaiso šakos srovė turi nuolatinę dedamąją penkias pirmąsias harmonikas, kurios pagrindinės harmonikos atžvilgiu sudaro: antroji – nuo 25 % iki 35%, trečioji – nuo 13,5% iki 15%, ketvirtoji – nuo 6,8% iki 7,5%, penktoji – nuo 3,4% iki 4%. Taigi, remiantis tuo galima teigti, kad gautasis matematinis modelis atitinka fizinį, tačiau matematiniam modelyje ryškesnės aukštesnės harmonikos, bet tai paaiškinama priimta prielaida apie induktyvumo kitimo dėsnį.

6. Eksperimento metu sudarytos švytavimų poslinkio oscilogramos ir jų GFT. Nustatyta, kad „statoriaus“ švytavimų poslinkis turi pirmas tris harmonikas – pagrindinę 50 Hz; 100 Hz – kuri atitinka vožtuvų darbo dažnį, 150 Hz – nežymią 1,6% pirmosios harmonikos dydžio. „Statoriaus“ švytavimų poslinkis taip pat turi 1,95 Hz harmoniką – tai atitinka matematinio modeliavimo ir analitinio skaičiavimo rezultatus (žemo dažnio harmonika – analitiniuose skaičiavimuose 1,81 Hz, modeliavime – 2,1 Hz). Darbo metu nustatytos atsiradusios lyginės harmonikos yra kompresoriaus vožtuvų darbo rezultatas dvigubu nei tinklo dažniu. Šios lyginės harmonikos bendrosios srovės spektre neatsiranda, nes neturi įtakos ŠJMĮ elektrinei grandinei.

7. Eksperimento metu nustatytas abipusis apvijų induktyvumas yra sąlyginai mažas lyginant su apvijų induktyvumais ir daugiausiai tesudaro tik nuo 1,4% iki 2,5% nuo mažiausios induktyvumo vertės $L_{\min}=0,955$ H, todėl skaičiavimuose jis nevertintas. Mažam abipusiam induktyvumui įtakos turi statmenas apvijų tarpusavio išdėstymas.

8. Nustatytas pakabos standis $C_{\text{mech1.vid}} = 468,9$ N/m, atitinkantis „liaunos“ pakabos sąlygas, todėl esant tokiai pakabai būtina nagrinėti dvimase sistemą, norint nustatyti tikslesnį švytavimų poslinkį.

5. IŠVADOS

1. Atlikus švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų tyrimų analizę, buvo nustatyta, kad šie įtaisai skirstomi į tiesiaeigius ir sūkiuosius, žadinamuosius ir nežadinamuosius, ypač plati jų pritaikymo sritis yra kompresorinėje technikoje. Daugumoje mokslinių darbų aptariami žadinamieji nuolatiniais magnetais sinchroniniai tiesiaeigiai švytuojamojo judesio mechatroniniai įtaisai, tačiau aptikta nedaug mokslinių darbų, kuriuose būtų nagrinėjami sinchroniniai nežadinamieji dvimasiai dvipusiai (dviejų apvijų) bespyruokliai tiesiaeigiai švytuojamojo judesio mechatroniniai įtaisai, valdomi tiristoriniais keitikliais. Išanalizuoti švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų švytavimų poslinkio nustatymo būdai – tiesioginis ir netiesioginis. Netiesioginio nustatymo metodai yra aktyviai analizuojami paskutinių metų mokslininkų darbuose, turi privalumų, tačiau juose pateikiami metodai nebuvo taikyti sinchroniniams nežadinamiesiems dvimasiams dvipusiams (dviejų apvijų) bespyruokliams tiesiaeigiams švytuojamojo judesio mechatroniniams įtaisams. Remiantis tyrimų apžvalga buvo suformuluotas disertacijos tikslas ir uždaviniai, nustatytas temos aktualumas. Tyrimo aspektai – netiesioginis įtaiso JD švytavimų poslinkio amplitudės ir švytavimų centro poslinkio nustatymo metodas, panaudojant bendrosios srovės spektro informaciją, įrenginio dvimasės dvipusės sistemos įvertinimas, spektrinis viso įtaiso kintamųjų tyrimas, gedimų nustatymas.
2. Nustatyti sąryšiai tarp bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir švytavimų centro poslinkio, įtaiso judžiosios dalies švytavimų poslinkio (šiuo atveju našumo atitikmuo) ir bendrosios srovės harmonikų amplitudžių. Atlikus švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso analitinį įvertinimą, sudarytas įtaiso švytavimų poslinkio harmonikų amplitudžių sąryšis su bendrosios srovės spektro harmonikos amplitudėmis, įvertinant dvimasės sistemos įtaką skaičiavimo tikslumui. Palyginus vienmasės ir dvimasės sistemos parametrus ir mechanines charakteristikas, nustatyta, kad esant mažoms aktyviosios apkrovos parametrų vertėms amplitudės paklaidos keičiasi nuo -93% iki -10%. Nustatyta, kad švytavimų centro poslinkis susijęs su bendrosios srovės nuolatine dedamąja neigiama tiesine priklausomybe, o švytavimų poslinkio amplitudė nuo bendrosios srovės pirmosios harmonikos amplitudės priklauso kvadratine priklausomybe. Aukštesniųjų bendrosios srovės harmonikų panaudojimas švytavimų poslinkio nustatymui neaktualus, nes ŠJMĮ mechaninė posistemė yra žemo dažnio filtras, ir aukštesniųjų srovės ir tuo pačiu jėgos harmonikų nepraleidžia (eksperimento metu nustatyta trečioji harmonika sudaro tik 1,4% pirmosios harmonikos).
3. Sudarytas išsamus švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso matematinis modelis įvertinantis įtaiso dvimasę sistemą, bespyruoklį darbą, apvijų varžas, nuostolius magnetolaidyje, induktyvumą kitimą, galimą abipusio induktyvumo buvimą, schemų kaitą įvertinant tiristorių darbą. Juo remiantis sudarytos charakteristikos, patvirtinančios teorinius sąryšius tarp švytavimų poslinkio ir bendrosios srovės harmonikų amplitudžių, įvertintos ir nustatytos nuolatinė dedamoji ir pirmoji harmonika. Modelis išskirtinis tuo, kad skirtas nežadinamiesiems varikliams, dvipusiams dvimasiams bespyruokliams

švytuojamojo judesio įtaisams. Modelis, jį nedaug pertvarkius, taikytinas ir žadinamiesiems įtaisams, įtaisams su dažnio keitikliu, įvairaus tipo pakaboms, vienasėms sistemoms.

4. Sudaryta veiksmų seka-algoritmas švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso valdymui ir gedimų nustatymui, panaudojant bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir pirmųjų trijų spektro harmonikų informaciją. Nustatyta, kad antroji harmonika, bendrosios srovės spektre, atsiranda sutrikus ŠJMI vienos apvijos darbui. Sudaryta įtaiso struktūrinė schema, įvertinant visas posistemas.
5. Sudaryta švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso gedimų aibė ir gedimų funkcijų lentelė. Nustatyti gedimai ir gedimų indikacijos kiekvienai iš posistemių (mechaninei posistemei 19 gedimų, elektromagnetinei – 6 gedimai, galios keitiklio posistemei – 5 gedimai, valdymo posistemei – 8 gedimai). Nustatyta, kad švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso gedimų nustatymui būtina žinoti bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir pirmųjų trijų harmonikų amplitudžių informaciją. Gedimų aibės dydis viršija gedimų indikacijų dydį, grįstą srovės harmonikų informacija, todėl būtina panaudoti ne tik bendrosios bet ir įtaiso elektrinės grandinės šakų srovių informaciją gedimams nustatyti.
6. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyti sąryšiai tarp bendrosios srovės nuolatinės dedamosios ir švytavimų centro poslinkio, sudarytos bendrosios srovės, atskiros šakos ir „statoriaus“ švytavimų poslinkio oscilogramos ir GFT, patvirtina matematinio modeliavimo rezultatus. Nustatyta bendrosios srovės harmonikų sudėtis atitinka matematinio modeliavimo rezultatus – simetrinio darbo atveju egzistuoja pirmoji ir trečioji harmonikos (nuo 12,2% iki 7,5% ir didėja didėjant tiristorių atidarymo kampui), o esant nesimetriniam darbui papildomai nustatyta nuolatinė srovės dedamoji. Atskiros šakos srovės GFT tyrimu nustatytos pirmosios trys harmonikos ir nuolatinė dedamoji. Įtaiso šakos srovės antroji ir trečioji harmonikos taip pat didėja didėjant tiristorių atidarymo kampui (antroji harmonika sudaro nuo 28,75% iki 50% pirmosios harmonikos dydžio, trečioji – nuo 4,2% iki 8%, kai kuriais atvejais nustatyta ketvirtoji – nuo 2,5% iki 5%). „Statoriaus“ tyrimo atveju – švytavimų poslinkis turi pirmas tris pirmašias harmonikas – pagrindinę 50 Hz; 100 Hz – kuri atitinka vožtuvų darbo dažnį, 150 Hz – nežymią 1,6% pirmosios harmonikos dydžio, ir vieną subharmoniką žemo dažnio (1,95 Hz). Tai atitinka matematinio modeliavimo ir analitinio skaičiavimo rezultatus (žemo dažnio harmonika – analitiniuose skaičiavimuose 1,81 Hz, modeliavime – 2,1 Hz). Eksperimentiškai nustatyta, kad bendrosios srovės nuolatinė dedamoji ir ŠJMI centro poslinkis turi tiesinę neigiamą priklausomybę. Tai patvirtina šios srovės nuolatinės dedamosios informatyvumą (taip pat nustatytą analitiškai ir modeliavimo būdu) nustatant švytavimų centro poslinkį. Tuo patvirtinamas matematinio modelio adekvatumas.

6. LITERATŪRA

Monografijos:

1. Kudarauskas, S. Švytuojamosios elektros mašinos: monografija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, 2008. 302 p. ISBN 978-9955-18-285-6.
2. Rinkevičienė, R.; Poška, A. J.; Smilgevičius A. Tiesiaieigės mechatroninės sistemos. Teorija ir taikymas. Monografija. Vilnius: Technika, 2006. 224 p. ISBN 9955-28-018-2.

Straipsniai iš mokslo žurnalų ir konferencijų medžiagos:

3. Guseinovicė, E.; Simanyniecė, L.; Kudarauskas, S. Oscillating Synchronous Pulsating Current Motor in the Piston Compressor's Drive. *Elektronika ir Elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2002, Nr. 3(38), p. 36-40.
4. Simanyniecė, L. Švytuojamojo variklio ir kompresoriaus pavaros darbo charakteristikų analizė. *Elektronika ir Elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2002, Nr. 5(40), p. 51-54.
5. Guseinovicė, E. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojančiosios srovės variklio charakteristikos. *Elektronika ir Elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2002, Nr. 5(40), p. 55-58.
6. Kudarauskas, S. Development of Electrical System for Hybrid Vehicles using the Free-Swinging Piston Engine and Oscillating Rotating Generator. *The 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008*. September 1-3, 2008, Poznan, Poland. ISBN 978-1-4244-1741-4. 2008, p. 2200-2204.
7. Jankūnas, V.; Eidukas, D.; Guseinovicė, E. Position Measurement of Oscillating Linear Movement of Mechatronic Device. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2011, No. 3(109), p. 7–10.
8. Brazaitis, A.; Guseinovicė, E. Influence of Supply Current to the Characteristics of Reactive Oscillating Motors. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2011, No. 5(111), p. 115–118.
9. Brazaitis, A.; Guseinovicė, E.; Jankūnas, V. Control of Oscillation Amplitude of Oscillating Motors. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2010, No. 3(99), p. 77–82.
10. Brazaitis, A.; Guseinovicė, E. Control of Activators of Mechatronic Devices by Real Time Information Transfer. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 2(90), p. 89–94.
11. Jankūnas, V.; Eidukas, D.; Guseinovicė, E.; Cirtautas, V. Investigation of Supply Possibilities of Mechatronic Actuator. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 5(93), p. 25–28.
12. Jankūnas, V.; Guseinovicė, E.; Urmonienė, L. Adequacy of Mathematical and Physical Model of Oscillating Mechatronic Device. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 7(87), p. 69–72.
13. Brazaitis, A.; Guseinovicė, E. Computer Aided Design on Oscillating Drives. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 6(70), p. 19–22.
14. Urmonienė, L., *et. al.* Investigation of Energetic Parameters of Oscillating Synchronous Pulsating Current Motors. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2011, No. 4(110), p. 17–20.

15. Eglėnas, T., *et. al.* Švytuojamojo judesio elektros variklių magnetinių laidžių kitimo aprašymas laipsnių eilute. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje VII. VII-osios mokslinės konferencijos medžiaga*. 2010 m. gegužės 14 d., Klaipėdos universitetas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, ISSN 1822-4652. 2010, VII t., p. 314-319.
16. Brazaitis, A.; Guseinovicė, E. Reaktyviųjų švytuojamojo judesio variklių skaitinis valdymas. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje IV. IV-osios mokslinės konferencijos medžiaga*. 2004. Klaipėdos universitetas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, ISBN 9955-585-53-6. 2004, IV t., p. 34-38.
17. Poška, A. J.; Savickienė, Z.; Šlepikas, A. Control and Adjustment of Linear Induction Motor Starting Force. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2010, No. 2(98), p. 21–24.
18. Karaliūnas, B.; Matkevičius, E.; Radzevičius, L. Peculiarities of Linear Induction Machine, Operating at the Mode of Phase Regulator. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 4(92), p. 83–86.
19. Molis, M.; Matkevičius, E.; Radzevičius, L. Calculation of the Mathematical Model of the Linear Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 7(95), p. 91–94.
20. Karaliūnas, B. Research on Electric and Magnetic Asymmetry of Linear and Arc Motors. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 1(81), p. 61–64.
21. Karaliūnas, B.; Matkevičius, E.; Radzevičius, L. Magnetic Field in the Air Gap of Double-sided Linear Induction Machine. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 5(85), p. 13–16.
22. Molis, M.; Matkevičius, E.; Radzevičius, L. The Experimental Research of the Linear Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 7(87), p. 57–60.
23. Poška, A. J.; Savickienė, Z.; Šlepikas, A. Unconventional Methods of Regulation and Control of Linear Electric Drives. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 7(87), p. 65–68.
24. Karaliūnas, B.; Matkevičius, E. Investigation of the Linear Induction Motor Braking Modes by Spectral Method. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 3(75), p. 37–40.
25. Sadauskas, T.; Smilgevičius A.; Savickienė Z. Distribution of Magnetic Field of Linear Induction Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 4(76), p. 63–66.
26. Matkevičius, E.; Radzevičius, L. Mathematical Model of the Linear Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 5(77), p. 11–14.
27. Savickienė, Z.; Poška, A. J. Simplified Calculation of Linear Induction Drives Characteristics. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 5(77), p. 15–18.
28. Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. Linear Induction Motor at Present Time. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 6(78), p. 3–8.

29. Radzevičius, L.; Matkevičius, E. Research of the Characteristics of the Linear Induction Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 6(78), p. 9–12.
30. Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S. Control Environment of Linear Induction Drive Dynamics Models. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 8(80), p. 63–66.
31. Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S. Tiesiaiegio asinchroninio variklio nesimetrinių dinamių stabdymo režimų tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, Nr. 1(65), p. 60 – 63.
32. Karaliūnas, B. Elektromechaninių energijos keitiklių nestacionariųjų procesų tyrimai. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, Nr. 1(65), p. 68–72.
33. Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S.; Šlepikas, A. Investigation into Dynamic Non-Symmetrical Breaking Modes of Linear Induction Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 4(68), p. 59–62.
34. Matkevičius, E. The Main Inductances of Linear Induction Motor Windings. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 4(68), p. 63–68.
35. Poška, A.; Rinkevičienė, R.; Savickienė, Z. The Analysis of Motivation Factors in Application on Linear Induction Electric Drives. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 5(69), p. 13–16.
36. Matkevičius, E.; Radzevičius, L. Forces of Shift of the Electromagnetic Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 6(70), p. 5–10.
37. Radzevičius, L.; Matkevičius, E. The Generalized Model of the Linear Induction Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2006, No. 7(71), p. 5–8.
38. Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S. Dinaminiai tiesiaiegių pavarų stabdymo režimai. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005, Nr. 4(60), p. 37–40.
39. Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. Dynamic Models of Controlled Linear Induction Drives. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005, No. 5(61), p. 23–27.
40. Poška, A.; Savickienė, Z.; Zubaitis, J. Daugiafunkcės tiesiaiegės asinchroninės elektros pavaros *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005, Nr. 5(61), p. 28–32.
41. Matkevičius, E. Tiesiaiegio asinchroninio variklio antrinio elemento parametrai. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005, Nr. 6(62), p. 71–76.
42. Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. Tiesiaiegės asinchroninės pavaros modelis. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2004, Nr. 1(50), p. 28-33.
43. Novickij J., et. al. Axial Magnetic Field Measurements of Pulsed Solenoids. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2004, No. 2(51), p.15-19.
44. Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. Model of Linear Induction. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2004, No. 2(51), p. 25-28.

45. Rinkevičienė R.; Poška, A. J.; Darulienė, O. Mažų greičių tiesiaiegių asinchroninių elektros pavarų charakteristikų aibės tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2004, Nr. 4(53), p. 55-58.
46. Savickienė, Z.; Poška, A. J.; Šlepikas, A. Mažos galios tiesiaiegių elektros pavarų lyginamieji parametrai. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2004, Nr. 5(54), p. 76–79.
47. Darulienė, O.; Karaliūnas, B. Tiesiaiegio asinchroninio variklio trifazė atstojamoji schema. *Elektronika ir elektrotechnika*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2003, Nr. 4(46), p. 78-82.
48. Boudiaf, A.; Aissani, Z.; Bentriou, A. Mechanical Characteristics of Linear Asynchronous Motor. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2011, – No. 4(110). – P. 21–24.
49. Boudiaf, A. Numerical Magnetic Field Computation in a Unilateral Linear Asynchronous Motor without Inverse Magnetic Circuit. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 2(90), p. 81–84.
50. Fenercioğlu, A. Design and Magnetically Analysis of Circular Flux Linear Actuator. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2010, No. 5(101), p. 21–26.
51. Geleževičius, V. A. Position Control of an Object Coupled with Motor via Elastic Joint. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 2(90), p. 47–50.
52. Grigaitis, A.; Geleževičius, V. A. Electropneumatic Positioning System with an Adaptive Force Controller. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2008, No. 7(87), p. 3–6.
53. Geleževičius, V. A.; Grigaitis, A. Research of Adaptive Force Control Loop of Electropneumatic Acting System. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 7(79), p. 7–10.
54. Geleževičius, V. A. Compensation of Acting Load Influence on Static Characteristics of Electric Drive by using Inertia Moment Observer. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2010, No. 3(99), p. 53–56.
55. Gečys, S.; Smolskas, P. Copper-squirrel-cage Solid Rotor Teeth Zone Parameter Rational Choice for Induction Motor Operating under Geophysical Conditions. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 1 (89), p. 91–94.
56. Gečys, S.; Smolskas, P. Parametrical Optimization of Equivalent Circuit Parameters of Copper-squirrel-cage Solid Rotor Induction Motor supplied through Long Geophysical Cable. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2009, No. 2(90), p. 73–76.
57. Gečys, S.; Smolskas, P. Design Aspects of Electric Motors for Borehole Investigating Mechatronic System. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2007, No. 2(74), p. 75–78.
58. Gečys, S.; Smolskas, P.; Žmuida, M. Application of Parametrical Method Synthesis for Borehole Motors Design. *Electronics and Electrical Engineering*. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2010, No. 5(101), p. 9–12.
59. Zhao Peng; Li Zhihai, Zheng Shuiying. Control System of Linear Compressor Based on Bidirectional Triode Thyristor. *3rd International Conference on Measuring Technology*

- and Mechatronics Automation (ICMTMA) 2011*. January 6-7, 2011, Shangshai, China. ISBN 978-1-4244-9010-3. 2011, vol. 1, p. 782-785.
60. Tsai, N.-C.; Chiang, C.-W. High-Frequency Linear Compressor and Lateral Position Regulation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. ISSN 1063-6536. 2010, pp(99) p. 1-12.
 61. Lin, Z.; Wang, J.; Howe, D. A Learning Feed-Forward Current Controller for Linear Reciprocating Vapor Compressors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. ISSN 0278-0046. 2011, 58(8), p. 3383-3390.
 62. Nan-Chyuan Tsai; Chao-Wen Chiang. Design and Analysis of Magnetically-Drive Actuator Applied for Linear Compressor. *Mechatronics*. ISSN 0957-4158. 2010, 5(20), p. 596-603.
 63. Pompermaier, C., *et. al.* Performance Analysis of a Tubular Linear Motor Applied in Compressors. *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*. April 19-21, 2010, Brighton, UK. (CD-ROM). 2010, p. 1-4.
 64. Wang, J.; Ibrahim, T.; Howe, D. Prediction and Measurement of Iron Loss in a Short-Stroke, Single-Phase, Tubular Permanent Magnet Machine. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2010, 46(6), p. 1315-1318.
 65. Wang, J.; Howe, D.; Lin, Z. Design Optimization of Short-Stroke Single-Phase Tubular Permanent-Magnet Motor for Refrigeration Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. ISSN 0278-0046. 2010, 57(1), p. 327-334.
 66. Hu Jian Ying, *et. al.* High Efficiency Linear Compressor Driven Pulse Tube Cryocooler Operating in Liquid Nitrogen Temperature. *Chinese Science Bulletin*. ISSN 1001-6538. 2009, 54(23), p. 4428-4431.
 67. Jinqun Zhang; Yunfeng Chang; Ziwen Xing. Study on Self-Sensor of Linear Moving Magnet Compressor's Piston Stroke. *IEEE Sensors Journal*. ISSN 1530-437X. 2009, 9(2), p. 154-158.
 68. Al-Otaibi, Z. S.; Jack, A. G. Utilising SMC in Single Phase Permanent Magnet Linear Motors for Compressor Applications. *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008*. April 2-4, 2008, York, UK. ISBN 978-0-86341-900-3. 2008, p. 752-756.
 69. Wang J.; Howe, D.; Lin, Z. Comparative Studies on Linear Motor Topologies for Reciprocating Vapor Compressors. *IEEE International Conference on Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07*, May 3-5, 2007, Antalya, Turkey. ISBN 1-4244-0742-7. 2007, vol. 1, p. 364-369.
 70. Chen, N. *et. al.* Study on Static and Dynamic Characteristics of Moving Magnet Linear Compressors. *Cryogenics*. ISSN 0011-2275. 2007, 47(9-10), p. 457-467.
 71. Huang, B. J.; Chen, Y. C. System Dynamics and Control of a Linear Compressor for Stroke and Frequency Adjustment. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. ISSN 0022-0434. 2002, Vol. 124, p. 176-182.
 72. Lamantia, M., *et. al.* Development of a High Performance Linear Compressor System. *17th European User Conference, 2002. ESRI 2002*. October 14-16, 2002, Blankenberge, Belgium. 2002, p. 1-8.
 73. Yee-Pien Yang; Wei-Ting Chen. Dual Stroke and Phase Control and System Identification of Linear Compressor of a Split-Stirling Cryocooler. *Asian Journal of Control*. ISSN 1561-8625. 1999, 1(2), p. 116-121.

74. Yee-Pien Yang; Wei-Ting Chen. Dual Stroke and Phase Control and System Identification of Linear Compressor of a Split-Stirling Cryocooler. *Proceedings of 38th IEEE Conference on Decision and Control, 1999*. December 7-10, 1999, Phoenix, Arizona, USA. ISBN 0-7803-5250-5. 1999, Vol. 5, p. 5120-5124.
75. Lu, Q., *et. al.* Thrust Force of Novel PM Transverse Flux Linear Oscillating Actuators with Moving Magnet. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2011, pp(99), p. 1-4.
76. Chen, X.; Zhu, Z. Q. Analytical Determination of Optimal Split Ratio of E-core Permanent Magnet Linear Oscillating Actuators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. ISSN 0093-9994. 2011, 1(47), p. 25-33.
77. Dan Wu; Xiaodan Xie; Shunyan Zhou. Design of a Normal Stress Electromagnetic Fast Linear Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2010, 4(46), p. 1007-1014.
78. Oono, M., *et. al.* Analysis of a New Linear Actuator Made of Soft Magnetic Composite Material With Spring. *International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009*. November 15-18, 2009, Tokyo, Japan. ISBN 978-1-4244-5177-7. 2009, p. 1-6.
79. Ummaneni, R. B., *et. al.* Experimental Characterisation of Linear Permanent Magnet Actuator with Gas Springs. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09*. May 3-6, 2009, Miami, Florida, USA. ISBN 978-1-4244-4251-5. 2009, p. 369-372.
80. Chen, X.; Zhu, Z. Q.; Howe, D. Modeling and Analysis of a Tubular Oscillating Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. ISSN 0093-9994. 2009, 45(6), p. 1961-1970.
81. Jang S.-M., *et. al.* Thrust Analysis and Measurements of Tubular Linear Actuator with Cylindrical Halbach Array. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2005, 41(5), p. 2028-2031.
82. Qipeng Li; Fan Ding; Chuanli Wang. Novel Bidirectional Linear Actuator for Electrohydraulic Valves. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2005, 41(6), p. 2199-2201.
83. Jang, S.-M., *et. al.* The Influence of Mechanical Spring on The Dynamic Performance of a Moving-Magnet Linear Actuator with Cylindrical Halbach Array. *Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. 40th IAS Annual Meeting*. October 2-6, 2005, Hongkongas. ISBN 0-7803-9208-6. 2005, vol. 3, p. 2132-2139.
84. Jang, S. M., *et. al.* The Influence of Mechanical Resonance on the Dynamic Performance of a Tubular Linear Actuator with Halbach Array. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005*. September 27-29, 2005, Nanjing, China. ISBN 7-5062-7407-8. 2005, vol. 1, p. 264-269.
85. Tae Heoung Kim, *et. al.* Development of a Flux Concentration-Type Linear Oscillatory Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2004, 40(4), p. 2092-2094.
86. Jang, S.-M.; Jeong, S.-S. Armature Reaction Effect and Inductance of Moving Coil Linear Oscillatory Actuator with Unbalanced Magnetic Circuit. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 1997, 37(4), p. 2847-2850.
87. Boldea, I.; Nasar, S. A. Linear Electric Actuators and Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. ISSN 0885-8969. 1999, 14(3), p. 712-717.

88. Sang-Baeck Yoon, *et al.* Dynamic Analysis of a Reciprocating Linear Actuator for Gas Compression using Finite Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 1997, 33(5), p. 4113-4115.
89. Ding Guozhong, *et al.* Structural Study on Moving Magnet Compressor for Stirling Engine. *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. ICECE 2010*. June 25-27, 2010, Wuhan, China. ISBN 978-1-4244-6880-5. 2010, p. 4243-4246.
90. Junseok Ko; Sangkwon Jeong; Taekyoung Ki. Effect of Pulse Tube Volume on Dynamics of Linear Compressor and Cooling Performance in Stirling-Type Pulse Tube Refrigerator. *Cryogenics*. ISSN 0011-2275. 2010, 50(1), p. 1-7.
91. Zhang Chunping, *et al.* Design of Miniature Moving Magnet Linear Actuator for Thermoacoustic Stirling System. *Proceedings of 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. APPEEC 2010*. March 28-31, 2010, Chengdu, China. ISBN 978-1-4244-4812-8. 2010, p. 1-4.
92. Chen Xi, *et al.* Study on the Phase Shift Characteristic of the Pneumatic Stirling Cryocooler. *Cryogenics*. ISSN 0011-2275. 2009, 49 (3-4), p. 120-132.
93. Junseok Ko; Sangkwon Jeong. Analysis on the Stirling-Type Pulse Tube Refrigerator in Consideration of Dynamics of Linear Compressor. *Cryogenics*. ISSN 0011-2275. 2008, 48(1-2), p. 68-76.
94. Zhang, S.; Norum, L.; Nilssen, R. Analysis of tubular linear permanent magnet motor for drilling application. *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS '09*. November 10-12, 2009, Sharjah, United Arab Emirates. ISBN 978-1-4244-5477-8. 2009, p. 1-5.
95. Ummaneni, R. B.; Nilssen, R.; Brennvall, J. E. Force Analysis in Design of High Power Linear Permanent Magnet Actuator with Gas Springs in Drilling Applications. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07*. May 3-5, 2007, Antalya, Turkey. ISBN 1-4244-0742-7. 2007, Vol. 1. p. 285-288.
96. Paulides, J. J. H., *et al.* Active Roll Compensation for Automotive Applications using a Brushless Direct-Drive Linear Permanent Magnet Actuator. *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06*. June 18-22, 2006, Jeju, South Korea. ISBN 0-7803-9716-9. 2006, p. 1-6.
97. Uchida, M., *et al.* Sliding Mode Servo Control with Feedforward Compensation for Electromagnetic Engine Valve. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008*. July 2-5, 2008, China, Xi'an. ISBN-978-1-4244-2494-8. 2008, p. 589-594.
98. Fukui, Y.; Funakubo, A.; Fukunaga, K. Development of the Assisted Artificial Heart with Linear Motor Actuator. *SICE 2004 Annual Conference*. August 4-6, 2004, Sapporo, Japan. ISBN 4-907764-22-7. 2004, Vol. 1, p. 306-310.
99. Finocchiaro, T., *et al.* New Linear Motor Concepts for Artificial Hearts. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2008, 44(6), p. 678-681.
100. Jun Li, *et al.* Effect of Mutual Inductance on the Pulsed Current Amplification of Magnetic Flux Compressors. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 1997, 37(1), p. 489-492.
101. Mongeau, P. Combustion Driven Pulsed Linear Generators for Electric Gun Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 1997, 33(1), p. 468-473.

102. Govindaraj, T.; Chatterjee, D.; Ganguli, A. K. Development, Finite Element Analysis and Electronic Control of an Axial Flux Permanent Magnet Linear Oscillating Motor Direct Drive Suitable for Short Strokes. *2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009*. June 4-6, Erode, Tamilnadu, India. ISBN 978-1-4244-4789-3. 2009, p. 1-6.
103. Zhu, Z. Q.; Chen, X. Analysis of an E-Core Interior Permanent Magnet Linear Oscillating Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2009, 45(10), p. 4384-4387.
104. Wang, J.; Lin, Z.; Howe, D. Analysis of a Short-Stroke, Single-Phase, Quasi-Halbach Magnetised Tubular Permanent Magnet Motor for Linear Compressor Applications. *IET Electric Power Applications*. ISSN 1751-8660. 2008, 2(3), p. 193-200.
105. Chen, X.; Zhu, Z. Q.; Howe, D. Modeling and Analysis of a Tubular Oscillating Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 2008. IAS '08*. October 5-9, 2008, Edmonton, Alberta, Canada. ISBN 978-1-4244-2278-4. 2008, p. 1-8.
106. Wang, J.; Ibrahim, T.; Howe, D. Design Optimization of Short-Stroke, Single Phase Applications. *18th International Conference on Electrical Machines, 2008. ICEM 2008*. September 6-9, 2008, Algarve, Portugal. ISBN 978-1-4244-1735-3. 2008, p. 1-6.
107. Ibrahim, T.; Wang, J.; Howe, D. Analysis of a single phase, quasi-Halbach magnetised tubular permanent magnet motor with non-ferromagnetic supporting tube. *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008*. April 2-4, 2008, York, UK. ISBN 978-0-86341-900-3. 2008, p. 762-766.
108. Zhang Yu-qiu, *et al.* Estimation Method of Mover Position for Linear Oscillatory Motor with Two Separated Stators. *International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009*. November 15-18, 2009, Tokyo, Japan. ISBN 978-1-4244-5177-7. 2009, p. 1-4.
109. Chun, Tae-Won, *et al.* A Novel Strategy of Efficiency Control for a Linear Compressor System Driven by a PWM Inverter. *IEEE Transactions on Magnetics*. ISSN 0018-9464. 2008, 1(55), p. 296-301.
110. Chun, Tae-Won, *et al.* Method of Estimating the Stroke of LPMSM Driven by PWM Inverter in a Linear Compressor. *22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC 2007*. February 25 - March 1, 2007, Anaheim, California, USA. ISBN 1-4244-0713-3. 2007, p. 403-406.
111. Wang J.; Howe, D.; Lin, Z. *et al.* Comparative Study of Winding Configurations of Short-Stroke, Single Phase Tubular Permanent Magnet Motor for Refrigeration Applications. *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. Septemeber 23-27, 2007, New Orleans, Louisiana, USA. ISBN 978-1-4244-1259-4. 2007, p. 311-318.
112. Lin, Z.; Wang, J.; Howe, D. A Hybrid Current Controller for Linear Reciprocating Vapor Compressors. *Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting*. September 23-27, 2007, New Orleans, Louisiana, USA. ISBN-978-1-4244-1259-4. 2007, p. 274-280.
113. Eid, A. M., *et al.* A Unique Starting Scheme of Linear-Engine Tubular PM Linear Generator System Using Position Feedback Controlled PWM Inverter. *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06*. June 18-22, 2006, Jeju, South Korea. ISBN 0-7803-9716-9. 2006, p. 1-5.
114. Reinschke, J. Stroke control of a reciprocating linear motor connected to a slowly varying mechanical load. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006*. May 23-26, 2006, Taormina, Italy. ISBN 1-4244-0193-3. 2006, p. 675-679.

115. Panah, P. G.; Shafiei, A.; Sharifian, R. An Improved Variable Structure Design for Velocity Control of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor. *2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*. June 14-16, 2010, Pisa, Italy. ISBN 978-1-4244-4986-6. 2010, p. 1231-1236.
116. Veprik, A.; Vilenchik, H.; Pundak, N. Virtual Accelerometer for Sensorless Overstroking Control in a Linear Compressor of a Cryogenic Cooler. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Infrared technology and applications XXXI, 2005*. March 28 - April 1, 2005, Orlando, Florida, USA. ISBN 0-8194-5768-X. 2005, Vol. 5783, No. 2, p. 156-163.
117. Lin, Z.; Wang, J.; Howe, D. A Resonant Frequency Tracking Technique for Linear Vapor Compressors. *IEEE International Conference of Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07*, May 3-5, 2007, Antalya, Turkey. ISBN 1-4244-0742-7. 2007, vol. 1, p. 370-375.
118. Immovilli, F. *et al.* Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison. *IEEE Transactions on Industry Applications*. ISSN 0093-9994. 2010, 46(4), p. 1350-1359.
119. Vasylius M., *et al.* The rotating System Vibration and Diagnostics. Kaunas, *Mechanika* 2008, ISSN 1392-1207, Nr. 4(72), p. 52-58.
120. Didžiokas R., *et al.* Rotor's Flexible Coupling Failure Diagnostics. *Proceedings of V International Conference on the Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes, 2006*. December 3 - 10, 2006, Sharm el Sheikh, Egypt. ISBN 966-330-015-9. 2006, p. 161-169.
121. Mažeika, P., *et al.* Dynamics and Reliability of gear driver with antifriction bearings. *Journal of Vibroengineering*. ISSN 1392-8716. – Kaunas: Vibromechanika, 2008, Vol. 10, p. 217-221.
122. Vasylius, M. *et al.* The Rotating System Vibration and Diagnostics. Rotorių su riedėjimo guoliais diagnostikos ir gedimų prevencijos tyrimai. *Mechanika*. ISSN 1392-1207. – Kaunas: Technologija, 2008, Nr. 4(72), p. 52-58.
123. Draney, R. K. High Temperature Sensor for Bearing Health Monitoring. *IEEE Aerospace Conference, 2008*. March 1-8, 2008, Big Sky, MT, USA. ISBN 978-1-4244-1487-1. 2008, p. 1-7.
124. Younus, A. M.; Yang, Bo-Suk. Wavelet co-efficient of thermal image analysis for machine fault diagnosis. *Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10*. January 12-14, 2010, San Diego, USA. ISBN 978-1-4244-4756-5. 2010, p. 1-6.
125. Wirth, G.; Mlynski, D. A. Extended Wavelet Transforms in Acoustic Diagnosis. *IX European Signal Processing Conference, Eusipco-98, 1998*. September 8-11, 1998, Island of Rhodes, Greece. ISBN 960-7620-06-2. 1998, p. 1-4.
126. Gritli, Y., *et al.* Advanced Diagnosis of Broken Bar Fault in Induction Machines by Using Discrete Wavelet Transform under Time-Varying Condition. *IEEE International Electrical Machines and Drives Conference, IEMDC, 2011*. May 15 - 18, 2011, Niagara Falls, Canada. ISBN 978-1-4577-0060-6, p. 424-429.
127. Touhami, O., Fadel, M. Detection of Broken Rotor Bars and Stator Faults in Squirrel-Cage Induction Machine by Spectral Analysis. *Thirty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory, SSST'07, 2007*. March 4-8, 2007, Macon, Georgia. ISBN 1-4244-1126-2, p. 274-278.

128. Ji-Rong Liu. Modeling of roll eccentricity based on modified FFT. *2nd International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification, ASID, 2008*. August 20-23, 2008, Guiyang, China. E-ISBN 978-1-4244-2585-3, p. 452-454.
129. Gharavol, E. A., Ooi Ban Leong, Mouthaan, K. Blind source separation and bearing estimation using Fourier-and wavelet-based spectrally condensed data and artificial neural networks for indoor environments. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN, 2008*. June 1-8, 2008, Hong Kong, China. E-ISBN 978-1-4244-1821-3 p. 1314-1341.
130. Rosero, J., *et. al.* Simulation and Fault Detection of Short Circuit Winding in a Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) by means of Fourier and Wavelet Transform. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, IMTC 2008*. May 12-15, 2008, British Columbia, Canada. E-ISBN 978-1-4244-1541-0, p. 411-416.
131. Rajagopalan, S., *et. al.* Wigner-Ville distributions for detection of rotor faults in brushless DC (BLDC) motors operating under non-stationary conditions. *5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2005*. September 7-9, 2005, Vienna, Austria. E-ISBN 978-0-7803-9125-3, p. 1-7.
132. Riera-Guasp, M., *et. al.* Diagnosis of Induction Motor Faults via Gabor Analysis of the Current in Transient Regime. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012*. ISSN 0018-9456. 2012, 6(61), p. 1583-1596.
133. Ben Salem, S., Bacha, K., Gossa, M. Induction motor fault diagnosis using an improved combination of Hilbert and Park transforms. *16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2012*. March 25-28, 2012, Yasmine Hammamet, Tunisia. ISBN 978-1-4673-0782-6, p. 1141-1146.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

S T R A I P S N I A I

Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose

1. Senulis, Audrius; Eidukas, Danielius; Guseinovicienė, Eleonora. Generalized mathematical model of controlled linear oscillating mechatronic device // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2011, nr. 2(108), p. 55-60. [ISI Web of Knowledge: Web of Sciences, INSPEC; VINITI; EBSCO].
2. Senulis, Audrius; Guseinovicienė, Eleonora; Urmonienė, Lionė. Control possibilities of oscillating electrical motor using FFT analysis data // JVE Journal of Vibroengineering. Kaunas: Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2010, vol. 12, no. 1, NoP. 530, p. 82-88. [ISI Web of Science; SCOPUS; EBSCO; INSPEC; VINITI].
3. Senulis, Audrius; Guseinovicienė, Eleonora; Jankūnas, Valdas; Urmonienė, Lionė; Andziulis, Arūnas; Didžiokas, Rimantas. Experimental investigation of oscillation center displacement of oscillating pulsating current motor and springless compressor drive // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering = Электроника и электротехника. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2007, nr. 7(79), p. 66-69. [ISI Web of Knowledge: Web of Sciences, INSPEC; VINITI; EBSCO].

Kituose Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose [Proceedings ir kt.]

1. Kudarauskas, Sigitas; Senulis, Audrius. Historical development and theoretical principles of compressors driven by oscillating electric motor // Transactions of 2nd Int. Conference on compressors and their systems: September 7-10, 2003, London / Institution of Mechanical Engineers (ImechE), Fluid Machinery Group, British Compressed Air Society, JSME et. al. UK: ImechE, 2003. ISBN 1-86058-417-9. ISSN 1356-1448. p. 473-482. (ImechE Proceedings. Vol. 4). [ISI Web of Knowledge: Web of Sciences].

Kituose tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose

1. Senulis, Audrius; Guseinovicienė, Eleonora; Cirtautas, Viktoras; Jankūnas, Valdas; Urmonienė, Lionė. Control Efficiency Analysis of Linear Oscillating Mechatronic Device // Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials III. Switzerland: Trans Tech Publications. ISSN 1012-0394, ISBN 3-908451-65-5/978-3-908451-65-5. 2009, vol. 147-149, p. 197-202. [www.scientific.net, www.isinet.com, IEE, SCOPUS, Compendex, CSA].
2. Kudarauskas, Sigitas; Senulis, Audrius; Simanygienė, Loreta. Švytuojamojo variklio-kompresoriaus švytavimų centro valdymas // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering = Электроника и электротехника. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2004, nr. 7(56), p. 66-69. [ISI Web of Knowledge: INSPEC; VINITI].
3. Guseinovicienė, Eleonora; Simanygienė, Loreta; Senulis, Audrius; Kudarauskas, Sigitas. Specialiųjų elektros mašinų magnetiniai laukai ir magnetinės grandinės // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering = Электроника и

электротехника. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2003, nr. 4(46), p. 70-73. [ISI Web of Knowledge: INSPEC; VINITI].

4. Guseinoviėnė, Eleonora; Simanyniėnė, Loreta; Danta, Arūnas, Senulis, Audrius; Kudarauskas, Sigitas. Švytuojamasis sinchroninis pulsuojamosios srovės variklis, maitinamas stačiakampe įtampa // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering = Электроника и электротехника. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2003, nr. 2(44), p. 38-42. [ISI Web of Knowledge: INSPEC; VINITI].

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose

1. Senulis, Audrius; Guseinoviėnė, Eleonora; Urmonienė, Lionė. Švytuojamojo tiesiaieigio judesio variklio-kompresoriaus matematinio modelio struktūros kaita ir analizė // Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje VI. VI-osios tarptautinės konferencijos medžiaga, 2008 m. kovo 27-28 d., Klaipėdos universitetas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto I-klā, ISSN 1822-4652. 2008, VI t., p. 391-400.

Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Kudarauskas, Sigitas; Guseinoviėnė, Eleonora; Simanyniėnė, Loreta; Vaupšas, Jonas; Senulis, Audrius. Control problems of oscillating synchronous motor // EPE-PEMC 2004. 11th International Power Electronics and Motion Control Conference. ISBN 9984-32-010-3. – Latvia, Riga, 2-4 September 2004, p 19-22, (CD-ROM).
2. Kudarauskas, Sigitas; Guseinoviėnė, Eleonora; Simanyniėnė, Loreta; Danta, Arūnas; Senulis, Audrius. Some control problems of oscillating synchronous pulsating current motor // Proc. EDPE'03, Electrical Drives and Power Electronics. ISBN 80-89114-45-4. – The High Tatras, Slovakia, 24-26 September 2003, p. 306-311.

PADĖKOS ŽODIS

Nuoširdžiai dėkoju mokslinio darbo vadovei ir konsultantei Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedros profesorei dr. Eleonorai Guseinovienei už nuoširdų vadovavimą, patarimus moksliniam darbui ir eksperimentų vykdymą atliekant tyrimus švytuojamojo judesio mechatroninių įtaisų srityje. Taip pat už visokeriopą pagalbą ruošiant daktaro disertaciją.

Dėkoju moksliniam konsultantui Kauno technologijos universiteto Elektronikos inžinerijos katedros profesoriui habil. dr. Danieliui Eidukui už dalykinius patarimus skelbiant mokslinio darbo rezultatus ir ruošiant daktaro disertaciją.

Dėkoju buvusiam ilgamečiam Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedros profesoriui habil. dr. Sigitui Kudarauskui už sudominimą moksline veikla ir įtraukimą į specialiujų elektros mašinų tyrimus ir patirtį dalyvaujant mokslinėse konferencijose.

Dėkoju Kauno technologijos universiteto Elektronikos inžinerijos katedros kolektyvui už palaikymą, pagalbą ir sudarytas sąlygas studijuoti Kauno technologijos universiteto doktorantūroje.

Dėkoju Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedros kolektyvui už palaikymą, dalykinius patarimus, diskusijas ir konsultacijas atliekant tyrimus disertacijos tema.

Dėkoju Klaipėdos universiteto Mechatronikos mokslo instituto kolektyvui už pagalbą atliekant dalį eksperimentinių tyrimų ir konsultacijas ruošiant disertaciją.

Nuoširdžiausiai dėkoju Jurgitai Senulienei už palaikymą ir pagalbą redaguojant disertacijos tekstą ir stilių.

Audrius Senulis

PRIEDAI

Švytuojamąjį judesio mechatroninio įtaiso mechaninės posistemės kintamųjų perdavimo funkcijos ir analitinės išraiškos

ŠJMI „statoriaus“ ir JD švytavimų poslinkių $H_1(p)$, $H_2(p)$ priklausomybės ir perdavimo funkcijos $W_{H1}(p)$, $W_{H2}(p)$ nuo elektromagnetinės jėgos $F_{elm}(p)$ sudarytos remiantis darbe pateikta įtaiso mechaninės posistemės dinamikos lygčių sistema (2.25), išreikšta operatorine forma:

$$H_1(p) = \frac{(d_1 p + d_0) F_{elm}(p)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \Rightarrow W_{H1}(p) = \frac{H_1(p)}{F_{elm}(p)}, \quad (1.1)$$

$$H_2(p) = \frac{(e_2 p^2 + e_1 p + e_0) F_{elm}(p)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \Rightarrow W_{H2}(p) = \frac{H_2(p)}{F_{elm}(p)}; \quad (1.2)$$

čia daugianarių koeficientai:

$$d_1 = R_{mech2}, \quad d_0 = C_{mech2}, \quad e_2 = m_1, \quad e_1 = R_{mech1} + R_{mech2}, \quad e_0 = C_{mech1} + C_{mech2}.$$

Remiantis dvimasės sistemos universaliosiomis perdavimo funkcijomis (1.1) ir (1.2) sudarytos įtaiso dalių absoliučiuųjų greičių $W_{V1}(p)$, $W_{V2}(p)$ ir absoliučiuųjų pagreičių $W_{A1}(p)$, $W_{A2}(p)$ perdavimo funkcijos:

$$W_{V1}(p) = \frac{V_1(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p H_1(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p(d_1 p + d_0)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (1.3)$$

$$W_{V2}(p) = \frac{V_2(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p H_2(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p(e_2 p^2 + e_1 p + e_0)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (1.4)$$

$$W_{A1}(p) = \frac{A_1(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p^2 H_1(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p^2(d_1 p + d_0)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (1.5)$$

$$W_{A2}(p) = \frac{A_2(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p^2 H_2(p)}{F_{elm}(p)} = \frac{p^2(e_2 p^2 + e_1 p + e_0)}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.6)$$

Remiantis (1.1)-(1.6) sudarytos įtaiso mechaninės apkrovos išraiškos operatorinėje formoje įtaiso „statoriaus“ ir JD absoliučiuųjų kintamųjų atžvilgiu:

$$Z_{mech1}(p) = \frac{F_{elm}(p)}{V_1(p)} = \frac{1}{W_{V1}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p(d_1 p + d_0)}, \quad (1.7)$$

$$Z_{mech2}(p) = \frac{F_{elm}(p)}{V_2(p)} = \frac{1}{W_{V2}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p(e_2 p^2 + e_1 p + e_0)}. \quad (1.8)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

Išraiškos (1.7) ir (1.8) susijusios su įtaiso dalių judėjimo greičiais, tačiau analizuojant įtaiso darbą aktualus mechaninės posistemės pasipriešinimo pobūdis elektromagnetinei jėgai, kai analizuojamas minėtųjų dalių švytavimų poslinkis. Tuomet:

$$pZ_{\text{mech1}}(p) = \frac{F_{\text{elm}}(p)}{H_1(p)} = \frac{1}{W_{H1}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{d_1 p + d_0}, \quad (1.9)$$

$$pZ_{\text{mech2}}(p) = \frac{F_{\text{elm}}(p)}{H_2(p)} = \frac{1}{W_{H2}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{e_2 p^2 + e_1 p + e_0}. \quad (1.10)$$

Tapačiai pertvarkomas ir mechaninės posistemės pasipriešinimo pobūdis švytavimų pagreičiams:

$$\frac{Z_{\text{mech1}}(p)}{p} = \frac{F_{\text{elm}}(p)}{A_1(p)} = \frac{1}{W_{A1}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p^2(d_1 p + d_0)}, \quad (1.11)$$

$$\frac{Z_{\text{mech2}}(p)}{p} = \frac{F_{\text{elm}}(p)}{A_2(p)} = \frac{1}{W_{A2}(p)} = \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p^2(e_2 p^2 + e_1 p + e_0)}. \quad (1.12)$$

Sudarytos įtaiso mechaninės posistemės pilnosios mechaninės varžos analitinės išraiškos kompleksinėje formoje taikant Furjė pakeitimą funkcijoms (1.7) ir (1.8) (ir funkcijai (2.43) iš disertacijos teksto 2 skyriaus):

$$\underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n) = \frac{b_4 \omega_n^4 - b_2 \omega_n^2 + b_0 - j(b_3 \omega_n^3 - b_1 \omega_n)}{-c_1 \omega_n^2 + j(-c_2 \omega_n^3 + c_0 \omega_n)}, \quad (1.13)$$

$$\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n) = \frac{b_4 \omega_n^4 - b_2 \omega_n^2 + b_0 - j(b_3 \omega_n^3 - b_1 \omega_n)}{-d_1 \omega_n^2 + j d_0 \omega_n}, \quad (1.14)$$

$$\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n) = \frac{b_4 \omega_n^4 - b_2 \omega_n^2 + b_0 - j(b_3 \omega_n^3 - b_1 \omega_n)}{-e_1 \omega_n^2 + j(-e_2 \omega_n^3 + e_0 \omega_n)}. \quad (1.15)$$

Išraiškose (1.13)-(1.15) atlikus pakeitimus:

$$\begin{aligned} \beta_1(\omega_n) &= b_4 \omega_n^4 - b_2 \omega_n^2 + b_0, \beta_2(\omega_n) = -(b_3 \omega_n^3 - b_1 \omega_n) \delta_{1v}(\omega_n) = -d_1 \omega_n^2, \\ \delta_{2v}(\omega_n) &= d_0 \omega_n, \varepsilon_{1v}(\omega_n) = -e_1 \omega_n^2, \varepsilon_{2v}(\omega_n) = -e_2 \omega_n^3 + e_0 \omega_n, \gamma_{1v}(\omega_n) = -c_1 \omega_n^2, \\ \gamma_{2v}(\omega_n) &= -c_2 \omega_n^3 + c_0 \omega_n. \end{aligned}$$

Gaunama:

$$\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n) = \frac{\beta_1(\omega_n) + j\beta_2(\omega_n)}{\delta_{1v}(\omega_n) + j\delta_{2v}(\omega_n)}, \quad (1.16)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

$$\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n) = \frac{\beta_1(\omega_n) + j\beta_2(\omega_n)}{\varepsilon_{1v}(\omega_n) + j\varepsilon_{2v}(\omega_n)}, \quad (1.17)$$

$$\underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n) = \frac{\beta_1(\omega_n) + j\beta_2(\omega_n)}{\gamma_{1v}(\omega_n) + j\gamma_{2v}(\omega_n)}. \quad (1.18)$$

Pertvarkius išraiškas (1.16)-(1.18), sudaromos mechaninės varžos analitinės išraiškos „statoriaus“ ir judžiosios dalies absoliutesiems judėjimams:

$$|\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)| = \frac{\frac{m_1^2 m_2^2 \omega_n^8}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2)^2 - 2m_1 m_2 (C_{\text{mech2}}(m_1 + m_2) + C_{\text{mech1}} m_2)) \omega_n^6}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \frac{R_{\text{mech1}} m_2^2 (R_{\text{mech1}} + 2R_{\text{mech2}}) \omega_n^6 + m_2^2 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \frac{(m_1 C_{\text{mech2}} (2m_2 (2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1 C_{\text{mech2}}) + R_{\text{mech1}}^2 (R_{\text{mech2}}^2 - 2m_2 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \frac{(-2R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}^2) \omega_n^2}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \frac{(-2C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + m_2 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2}}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2}, \quad (1.19)$$

$$|\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)| = \frac{\frac{m_1^2 m_2^2 \omega_n^8}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2)^2 - 2m_1 m_2 (C_{\text{mech2}}(m_1 + m_2) + C_{\text{mech1}} m_2)) \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \frac{R_{\text{mech1}} m_2^2 (R_{\text{mech1}} + 2R_{\text{mech2}}) \omega_n^6 + (m_2^2 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 - 2R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \frac{(m_1 C_{\text{mech2}} (2m_2 (2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1 C_{\text{mech2}}) + R_{\text{mech1}}^2 (R_{\text{mech2}}^2 - 2m_2 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \frac{(R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}^2 - 2C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2) + m_2 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \frac{C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}^2}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2}}{m_1^2 \omega_n^6 + ((R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})) \omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2}. \quad (1.20)$$

Tapačius veiksmus atlikus šio priedo išraiškoms (1.9)-(1.12) ir palyginus su (1.19) ir (1.20), gaunamos mechaninės posistemės apkrovos pasipriešinimo analitinės išraiškos „statoriaus“ ir judžiosios dalies absoliutesiems judėjimams, kai analizuojama ŠJMĮ švytavimų poslinkis ir pagreitis:

- švytavimų poslinkiui:

$$j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n) = \frac{b_4 \omega_n^4 - b_2 \omega_n^2 + b_0 - j(b_3 \omega_n^3 - b_1 \omega_n)}{-c_2 \omega_n^2 + c_0 + jc_1 \omega_n}, \quad (1.21)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

$$|j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)| = \omega_n |\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)|, \quad (1.22)$$

$$|j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)| = \omega_n |\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)|; \quad (1.23)$$

- švytavimų pagreičiui:

$$\frac{\underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n)}{j\omega_n} = \frac{b_4\omega_n^4 - b_2\omega_n^2 + b_0 - j(b_3\omega_n^3 - b_1\omega_n)}{c_2\omega_n^4 - c_0\omega_n^2 - jc_1\omega_n^3}, \quad (1.24)$$

$$\left| \frac{\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)}{j\omega_n} \right| = \frac{|\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)|}{\omega_n}, \quad (1.25)$$

$$\left| \frac{\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)}{j\omega_n} \right| = \frac{|\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)|}{\omega_n}. \quad (1.26)$$

Kaip papildomas rezultatas pateikiamos nagrinėjamųjų ŠJMI mechaninės posistemės pasipriešinimų realiosios ir menamosios dalys, kurios gali būti naudojamos mechaninės posistemės analizei, rezonansinių dažnių nustatymui, poslinkių, greičių ir pagreičių fazinių charakteristikų sudarymui:

1. kai analizuojamas greitis – realiosios ir menamosios dalys yra lygios:

- „statoriaus“ absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)) = & - \left[\frac{m_1 m_2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + m_2 (C_{\text{mech2}} R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) \omega_n^2}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(-R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2) \omega_n^2 - C_{\text{mech2}}^2 R_{\text{mech1}}}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} \right], \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)) = & \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) + m_2 (R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} - m_1 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^3 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n} + \\ & + \frac{(C_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) - C_{\text{mech1}} (R_{\text{mech2}}^2 - m_2 C_{\text{mech2}})) \omega_n^2 - C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^3 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n}; \end{aligned} \quad (1.28)$$

- judžiosios dalies absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)) = & \frac{m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2} + \\ & + \frac{(-2m_1 C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2 R_{\text{mech2}} + C_{\text{mech2}}^2 R_{\text{mech1}}}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2}, \end{aligned} \quad (1.29)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(\underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)) &= \frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^3 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n} + \\
 &+ \frac{(m_2(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1(R_{\text{mech2}}^2 - m_1 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^3 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n} + \\
 &+ \frac{(m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 + m_1 C_{\text{mech2}}(2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^3 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n} + \\
 &+ \frac{-C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^3 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n};
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

- judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų judėjimui:

$$\begin{aligned}
 \text{Re}(\underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n)) &= \frac{m_1(m_1 + m_2)R_{\text{mech2}}\omega_n^4 + m_2(C_{\text{mech2}}R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}})\omega_n^2}{m_1^2\omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1C_{\text{mech1}})\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2} + \\
 &+ \frac{R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1C_{\text{mech1}})\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2R_{\text{mech2}}}{m_1^2\omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1C_{\text{mech1}})\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2},
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(\underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n)) &= \frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} m_2 (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - m_1 C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^3 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n} + \\
 &+ \frac{(-2m_1 m_2 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + (m_2 C_{\text{mech1}} (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - C_{\text{mech2}} (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^3 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n} + \\
 &+ \frac{-C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}}{m_1^2 \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^3 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n}.
 \end{aligned} \tag{1.32}$$

2. Kai analizuojamas poslinkis – realiosios ir menamosios dalys yra lygios:

- „statoriaus“ absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned}
 \text{Re}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)) &= - \left(\frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) + m_2 (R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} - m_1 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{(C_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) - C_{\text{mech1}} (R_{\text{mech2}}^2 - m_2 C_{\text{mech2}})) \omega_n^2 - C_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} \right),
 \end{aligned} \tag{1.33}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Im}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)) &= - \left(\frac{m_1 m_2 R_{\text{mech2}} \omega_n^5}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{(m_2 (C_{\text{mech2}} R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2) \omega_n^3 - C_{\text{mech2}}^2 R_{\text{mech1}} \omega_n}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2 + C_{\text{mech2}}^2} \right);
 \end{aligned} \tag{1.34}$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

- judžiosios dalies absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)) = & - \left(\frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \right)^2 + \\ & + \frac{(m_2(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1(R_{\text{mech2}}^2 - m_1 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2} + \\ & + \frac{(m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 + m_1 C_{\text{mech2}}(2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}}) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2} + \\ & + \frac{-C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2} \Bigg\}, \end{aligned} \quad (1.35)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech2}}(j\omega_n)) = & \frac{m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^5 + (R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - 2m_1 C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) \omega_n^3}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2} + \\ & + \frac{(C_{\text{mech1}}^2 R_{\text{mech2}} + C_{\text{mech2}}^2 R_{\text{mech1}}) \omega_n}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})} \omega_n^2 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2}; \end{aligned} \quad (1.36)$$

- judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų judėjimui:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n)) = & - \left(\frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} m_2 (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - m_1 C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2)) \omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})} \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2 \right)^2 + \\ & + \frac{(-2m_1 m_2 C_{\text{mech1}}) \omega_n^4 + (m_2 C_{\text{mech1}} (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - C_{\text{mech2}} (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})) \omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})} \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2} + \\ & + \frac{-C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})} \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2} \Bigg\}, \end{aligned} \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(j\omega_n \underline{Z}_{\text{mech}}(j\omega_n)) = & \frac{m_1(m_1 + m_2) R_{\text{mech2}} \omega_n^5 + m_2(C_{\text{mech2}} R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) \omega_n^3}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})} \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2} + \\ & + \frac{R_{\text{mech2}} (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}) \omega_n^3 + C_{\text{mech1}}^2 R_{\text{mech2}} \omega_n}{m_1^2 \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})} \omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2}. \end{aligned} \quad (1.38)$$

3. Kai analizuojamas pagreitis – realiosios ir menamosios dalys yra lygios:

- „statoriaus“ absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left(\frac{\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) = & \frac{(R_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) + m_2 (R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} - m_1 C_{\text{mech2}})) \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2} + \\ & + \frac{(C_{\text{mech2}}^2 (m_1 + m_2) - C_{\text{mech1}} (R_{\text{mech2}}^2 - m_2 C_{\text{mech2}})) \omega_n^2 - C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^4 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n^2}, \end{aligned} \quad (1.39)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}\left(\frac{\underline{Z}_{\text{mech1}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) = & \frac{m_1 m_2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^3 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n} + \\ & + \frac{(m_2 (C_{\text{mech2}} R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2) \omega_n^2 - C_{\text{mech2}}^2 R_{\text{mech1}}}{R_{\text{mech2}}^2 \omega_n^3 + C_{\text{mech2}}^2 \omega_n}; \end{aligned} \quad (1.40)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

- judžiosios dalies absoliučiajam judėjimui:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left(\frac{Z_{\text{mech2}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) &= \frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \\ &+ \frac{(m_2(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1(R_{\text{mech2}}^2 - m_1 C_{\text{mech2}}))\omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \\ &+ \frac{(m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 + m_1 C_{\text{mech2}}(2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}})\omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \\ &+ \frac{-C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2}, \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}\left(\frac{Z_{\text{mech2}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) &= -\left(\frac{m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + (R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - 2m_1 C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}})\omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}} + C_{\text{mech2}} R_{\text{mech1}}}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})\omega_n^4 + (C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})^2 \omega_n^2}\right); \end{aligned} \quad (1.42)$$

- judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų judėjimui:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left(\frac{Z_{\text{mech}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) &= \frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}} m_2 (R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - m_1 C_{\text{mech2}} (m_1 + m_2))\omega_n^4}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \\ &+ \frac{(-2m_1 m_2 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + (m_2 C_{\text{mech1}}(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - C_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}}))\omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \\ &\frac{-C_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}}}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2}; \end{aligned} \quad (1.43)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}\left(\frac{Z_{\text{mech}}(j\omega_n)}{j\omega_n}\right) &= -\left(\frac{m_1(m_1 + m_2)R_{\text{mech2}}\omega_n^4 + m_2(C_{\text{mech2}}R_{\text{mech1}} - C_{\text{mech1}}R_{\text{mech2}})\omega_n^2}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^2 + C_{\text{mech1}}^2 R_{\text{mech2}}}{m_1^2 \omega_n^6 + (R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})\omega_n^4 + C_{\text{mech1}}^2 \omega_n^2}\right). \end{aligned} \quad (1.44)$$

Remiantis šio priedo išraiškomis (1.27)-(1.32) sudaromos apkrovos fazės analitinės priklausomybės, įvertinant pakeitimus (1.16)-(1.18). Mechaninės apkrovos varžos fazė parodo fazių skirtumą tarp veikiančios elektromagnetinės jėgos ir atitinkamų ŠJMĮ dalių judėjimo greičių:

$$\varphi_{Z_{\text{mech1}}}(\omega_n) = \arctg \frac{-\beta_1(\omega_n)\delta_{2v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\delta_{1v}(\omega_n)}{\beta_1(\omega_n)\delta_{1v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\delta_{2v}(\omega_n)}, \quad (1.45)$$

$$\varphi_{Z_{\text{mech2}}}(\omega_n) = \arctg \frac{-\beta_1(\omega_n)\varepsilon_{2v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\varepsilon_{1v}(\omega_n)}{\beta_1(\omega_n)\varepsilon_{1v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\varepsilon_{2v}(\omega_n)}, \quad (1.46)$$

$$\varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n) = \arctg \frac{-\beta_1(\omega_n)\gamma_{2v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\gamma_{1v}(\omega_n)}{\beta_1(\omega_n)\gamma_{1v}(\omega_n) + \beta_2(\omega_n)\gamma_{2v}(\omega_n)}. \quad (1.47)$$

Priedas Nr. 1 (tęsinys)

Įvertinus visus pakeitimus ir atlikus išraiškų (1.45)-(1.47) pertvarkymus, gaunama:

$$\varphi_{Z_{\text{mech1}}}(\omega_n) = \arctg \left[\frac{[m_2(m_1 C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech2}}^2(m_1 + m_2)]\omega_n^4}{[m_1 m_2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + [m_2(R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2]\omega_n^2 - R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2]\omega_n} + \right. \quad (1.48)$$

$$\left. + \frac{[C_{\text{mech1}}(R_{\text{mech2}}^2 - m_2 C_{\text{mech2}}) - C_{\text{mech2}}^2(m_1 + m_2)]\omega_n^2 + C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2}{[m_1 m_2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + [m_2(R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} - C_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}) - R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}^2]\omega_n^2 - R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2]\omega_n} \right];$$

$$\varphi_{Z_{\text{mech2}}}(\omega_n) = \arctg \left[\frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6}{[m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + [R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - 2m_1 R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}]\omega_n^2 + R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} + \right. \quad (1.49)$$

$$\left. + \frac{[m_2(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}})^2 - 2m_1 m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) + m_1(R_{\text{mech2}}^2 - m_1 C_{\text{mech2}})]\omega_n^4}{[m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + [R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - 2m_1 R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}]\omega_n^2 + R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} + \right.$$

$$\left. + \frac{[C_{\text{mech2}}(2C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})(m_1 + m_2) - R_{\text{mech1}}^2 C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}}^2 C_{\text{mech1}} + m_2 C_{\text{mech1}}^2]\omega_n^2 + C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}})}{[m_1^2 R_{\text{mech2}} \omega_n^4 + [R_{\text{mech1}} R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - 2m_1 R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}]\omega_n^2 + R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} \right];$$

$$\varphi_{Z_{\text{mech}}}(\omega_n) = \arctg \left[\frac{m_1^2 m_2 \omega_n^6}{[m_1 R_{\text{mech2}}(m_1 + m_2)\omega_n^4 + [m_2(R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}) + R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})]\omega_n^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} + \right. \quad (1.50)$$

$$\left. + \frac{[R_{\text{mech1}} m_2(R_{\text{mech1}} + R_{\text{mech2}}) - m_1 C_{\text{mech2}}(m_1 + m_2) - 2m_1 m_2 C_{\text{mech1}}]\omega_n^4}{[m_1 R_{\text{mech2}}(m_1 + m_2)\omega_n^4 + [m_2(R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}) + R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})]\omega_n^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} + \right.$$

$$\left. + \frac{[C_{\text{mech1}} m_2(C_{\text{mech1}} + C_{\text{mech2}}) - C_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})]\omega_n^2 - C_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}}}{[m_1 R_{\text{mech2}}(m_1 + m_2)\omega_n^4 + [m_2(R_{\text{mech1}} C_{\text{mech2}} - R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}) + R_{\text{mech2}}(R_{\text{mech1}}^2 - 2m_1 C_{\text{mech1}})]\omega_n^2 + R_{\text{mech2}} C_{\text{mech1}}^2]\omega_n} \right];$$

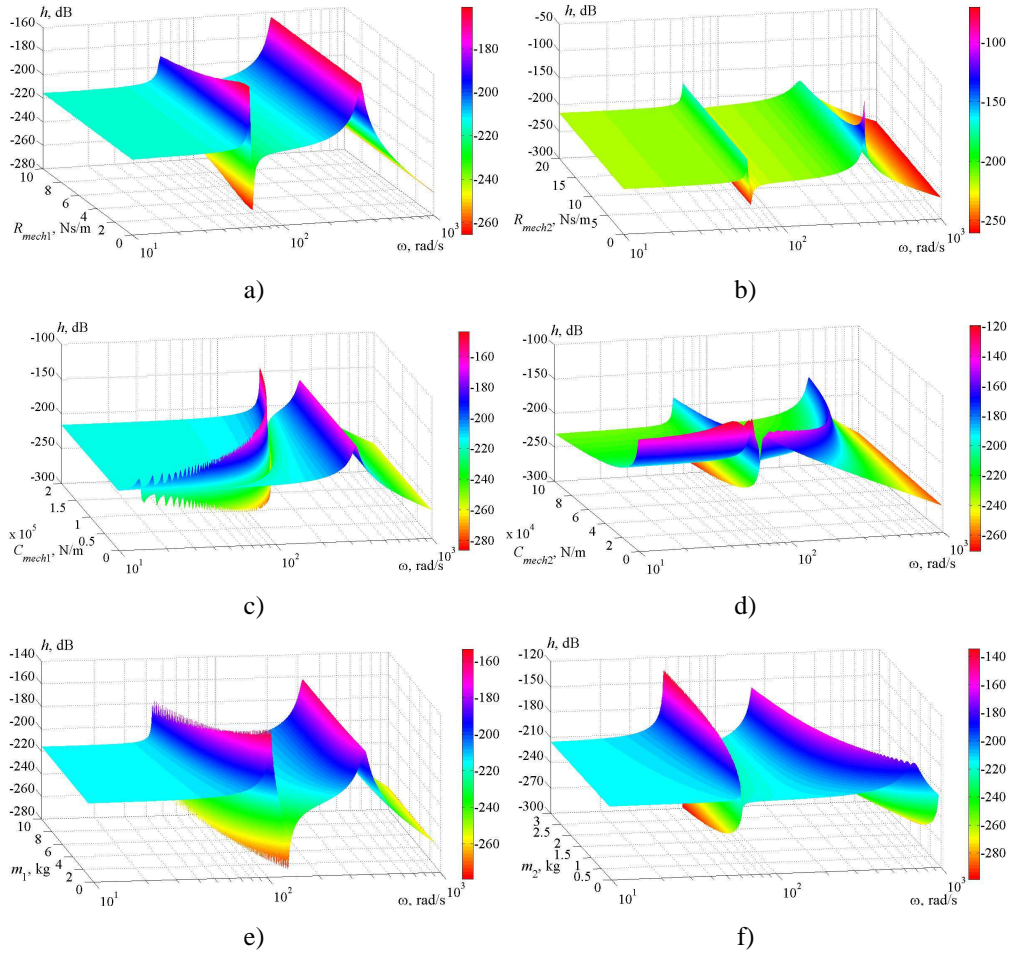
ŠJMĮ mechaninės posistemės „statoriaus“ ir JD absoliučiąjų švytavimų poslinkių, greičių ir pagreičių amplitudžių ir fazių vertės, kiekvienai elektromagnetinės jėgos n -ajai harmonikai apskaičiuojamos panaudojant (1.7)-(1.12) ir (1.19)-(1.26) išraiškas, pateiktos 1.1 lentelėje (indeksas 1 atitinka „statorių“, indeksas 2 – judžiąją dalį).

1.1 lentelė. ŠJMĮ absoliučiąjų švytavimų „statoriaus“ ir judžiosios dalies kintamųjų analitinės išraiškos.

Kintamieji	Amplitudė	Fazė
Absoliučiąjų švytavimų poslinkis	$\left \frac{H_{1,2m,n}(j\omega_n)}{j\omega_n Z_{\text{mech1,2}}(j\omega_n)} \right = \frac{ F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n) }{ j\omega_n Z_{\text{mech1,2}}(j\omega_n) }$	$\varphi_{h1,2}(\omega_n) = \varphi_{F_{\text{elm.n}}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech1,2}}}(\omega_n) - \frac{\pi}{2}$
Absoliučiąjų švytavimų greitis	$\left \frac{V_{1,2m,n}(j\omega_n)}{Z_{\text{mech1,2}}(j\omega_n)} \right = \frac{ F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n) }{ Z_{\text{mech1,2}}(j\omega_n) }$	$\varphi_{v1,2}(\omega_n) = \varphi_{F_{\text{elm.n}}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech1,2}}}(\omega_n)$
Absoliučiąjų švytavimų pagreitis	$\left \frac{A_{1,2m,n}(j\omega_n)}{j\omega_n} \right = \frac{ F_{\text{elm.m.n}}(j\omega_n) }{ Z_{\text{mech1,2}}(j\omega_n) }$	$\varphi_{a1,2}(\omega_n) = \varphi_{F_{\text{elm.n}}}(\omega_n) - \varphi_{Z_{\text{mech1,2}}}(\omega_n) + \frac{\pi}{2}$

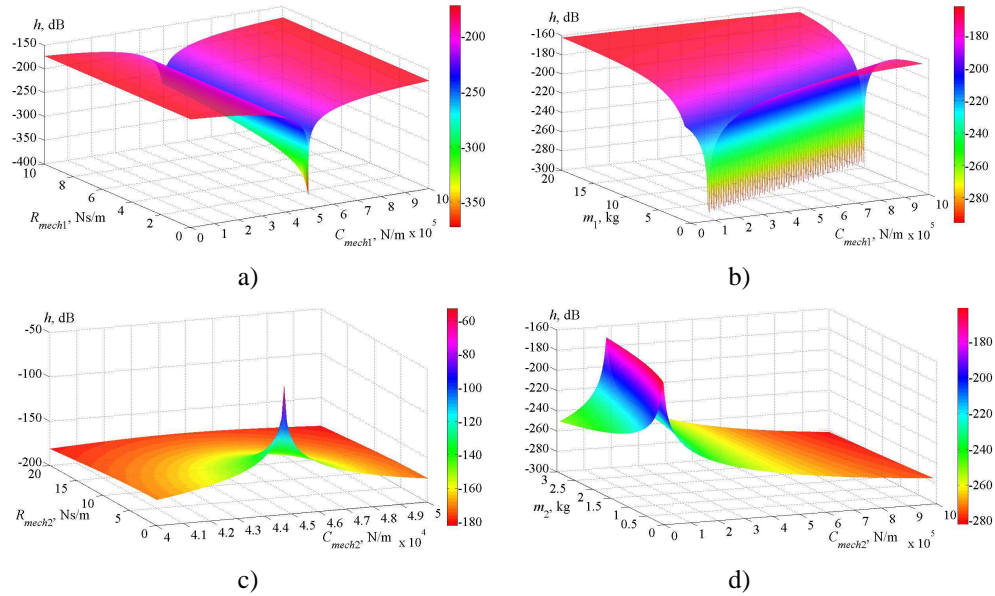
Švytuojamąjį judesio mechatroninio įtaiso mechaninės posistemės kintamųjų (poslinkio, greičio ir pagreičio) amplitudinės charakteristikos

Priede pateikiamos mechaninės posistemės reliatyviųjų švytaviųjų poslinkių, greičių, pagreičių amplitudinės-dažninės ir amplitudinės charakteristikos, sudarytos remiantis disertacijos išraiškomis, pateiktomis 2.1 lentelėje. Grafikai pateikti įvairioms mechaninės posistemės parametrų vertėms, kai sistemą veikia vienietinė elektromagnetinės jėgos harmonika.

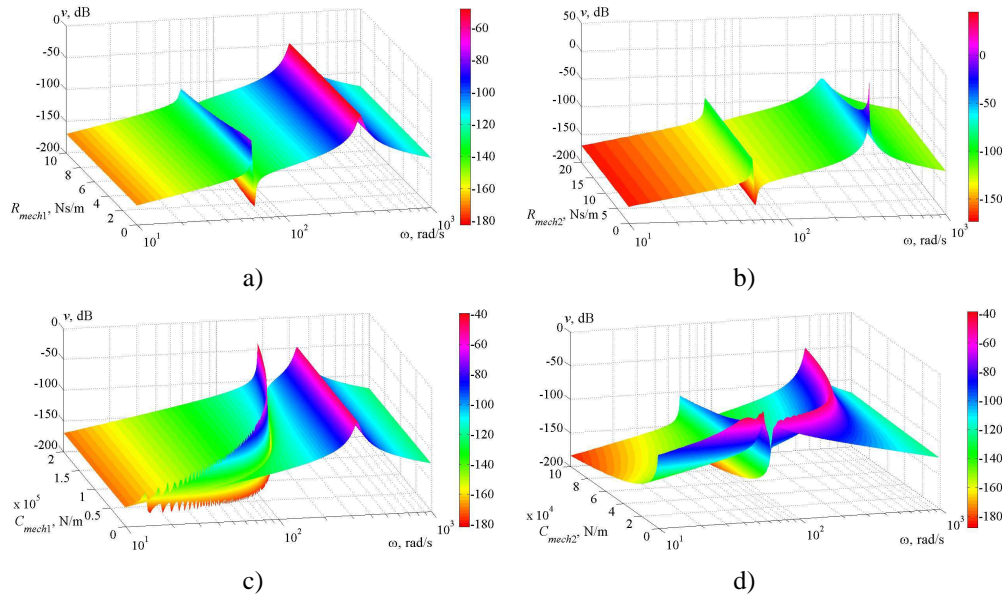


2.1 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytaviųjų poslinkio amplitudinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametrų: a) $h=f(\omega, R_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m; b) $h=f(\omega, R_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m; c) $h=f(\omega, C_{mech1})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $2 \cdot 10^5$] N/m; d) $h=f(\omega, C_{mech2})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; e) $h=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 10] kg; f) $h=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{mech1}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1}=1$ Ns/m, $R_{mech2}=10$ Ns/m, $F_{elm}=1$ N

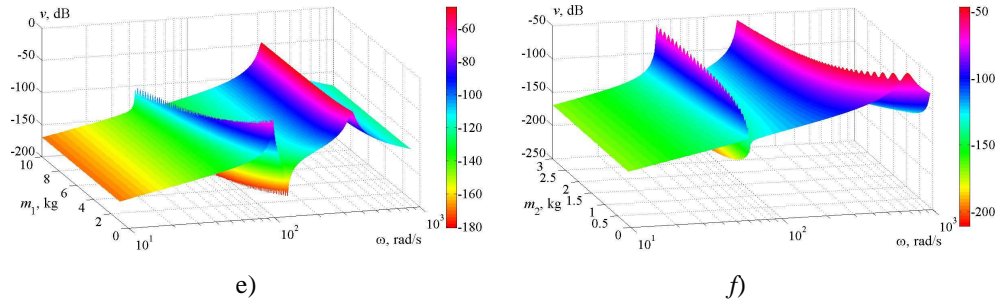
Priedas Nr. 2 (tęsinys)



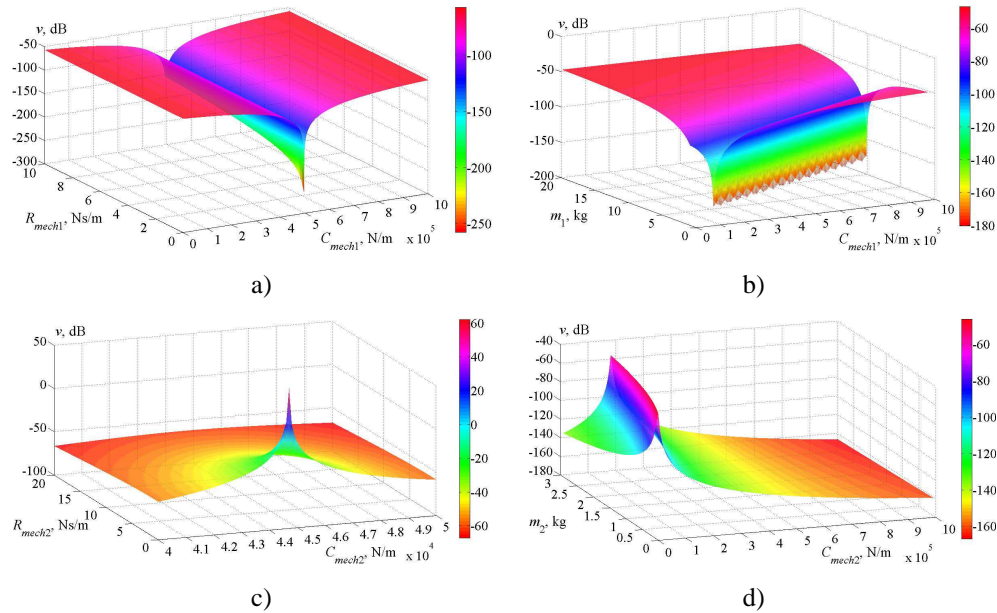
2.2 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytaviųjų poslinkio amplitudinės charakteristikos, keičiantis dviem iš mechaninės posistemės parametru: a) $h=f(R_{\text{mech1}}, C_{\text{mech1}})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose $[0; 10]$ Ns/m, keičiant parametru C_{mech1} ribose $[10^3; 10^6]$ N/m; b) $h=f(m_1, C_{\text{mech1}})$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose $[1; 20]$ kg, keičiant parametru C_{mech1} ribose $[10^3; 10^6]$ N/m; c) $h=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose $[0; 20]$ Ns/m, keičiant parametru C_{mech2} ribose $[4 \cdot 10^4; 5 \cdot 10^4]$ N/m; d) $h=f(m_2, C_{\text{mech2}})$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose $[0,1; 3]$ kg, keičiant parametru C_{mech2} ribose $[10^4; 10^6]$ N/m. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{\text{mech1}}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{\text{mech2}}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{\text{mech1}}=1$ Ns/m, $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m, $F_{\text{el}}=1$ N, $\omega_1=314$ rad/s



Priedas Nr. 2 (tęsinys)

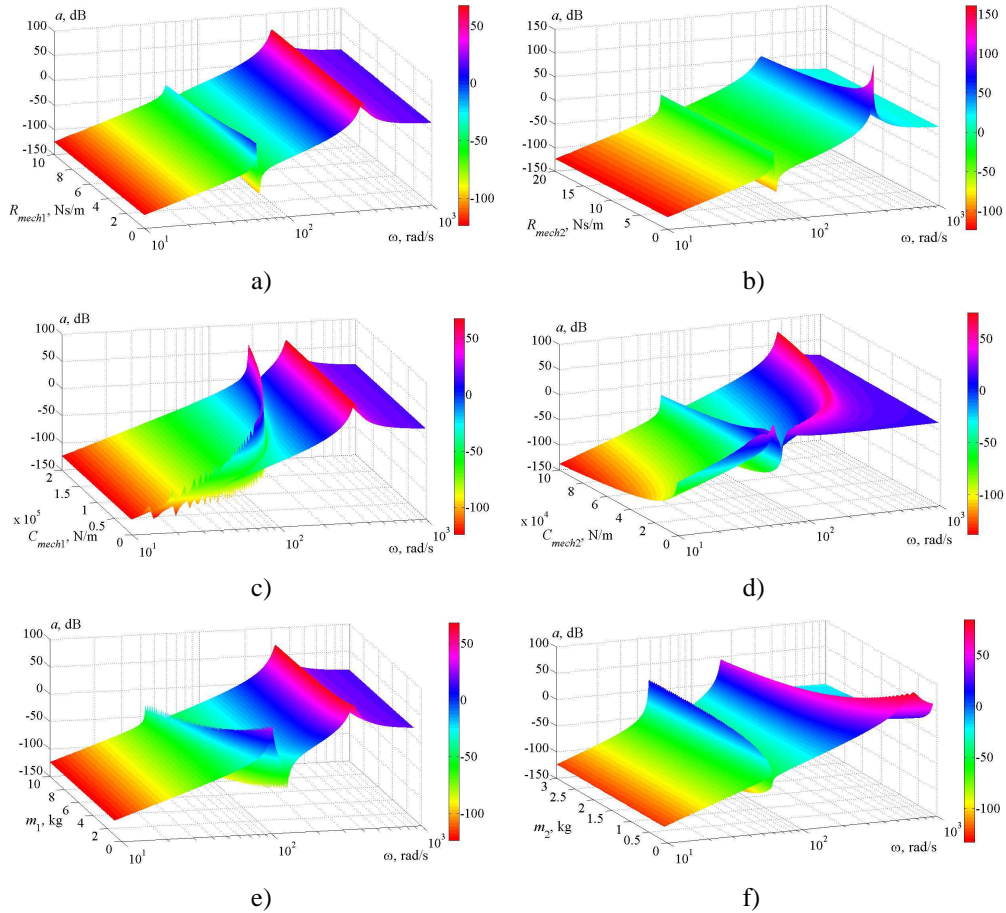


2.3 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavių greičio amplitudinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametru: a) $v=f(\omega, R_{\text{mech1}})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m; b) $v=f(\omega, R_{\text{mech2}})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m; c) $v=f(\omega, C_{\text{mech1}})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $2 \cdot 10^5$] N/m; d) $v=f(\omega, C_{\text{mech2}})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; e) $v=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 10] kg; f) $v=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{\text{mech1}}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{\text{mech2}}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{\text{mech1}}=1$ Ns/m, $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m, $F_{\text{elm}}=1$ N

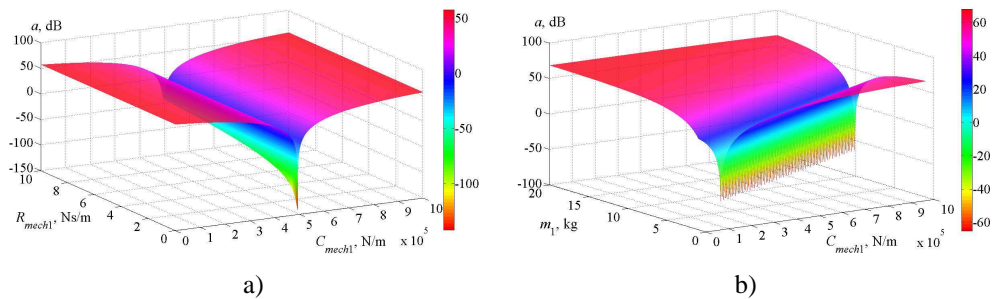


2.4 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavių greičio amplitudinės charakteristikos, keičiantis dviem iš mechaninės posistemės parametru: a) $v=f(R_{\text{mech1}}, C_{\text{mech1}})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; 10^6] N/m; b) $v=f(m_1, C_{\text{mech1}})$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 20] kg, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; 10^6] N/m; c) $v=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m, keičiant parametru C_{mech2} ribose [$4 \cdot 10^4$; $5 \cdot 10^4$] N/m; d) $v=f(m_2, C_{\text{mech2}})$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^4 ; 10^6] N/m. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{\text{mech1}}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{\text{mech2}}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{\text{mech1}}=1$ Ns/m, $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m, $F_{\text{elm}}=1$ N, $\omega_1=314$ rad/s

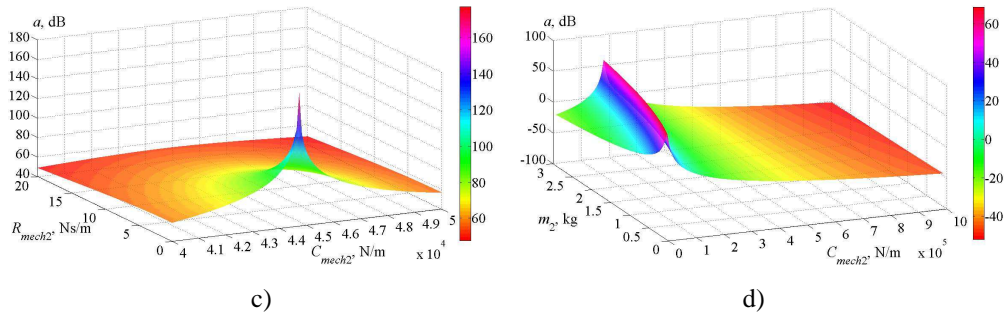
Priedas Nr. 2 (tęsinys)



2.5 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavių pagreičio amplitudinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametru: a) $a=f(\omega, R_{\text{mech1}})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m; b) $a=f(\omega, R_{\text{mech2}})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m; c) $a=f(\omega, C_{\text{mech1}})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $2 \cdot 10^5$] N/m; d) $a=f(\omega, C_{\text{mech2}})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; e) $a=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 10] kg; f) $a=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{\text{mech1}}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{\text{mech2}}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{\text{mech1}}=1$ Ns/m, $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m, $F_{\text{elm}}=1$ N



Priedas Nr. 2 (tęsinys)

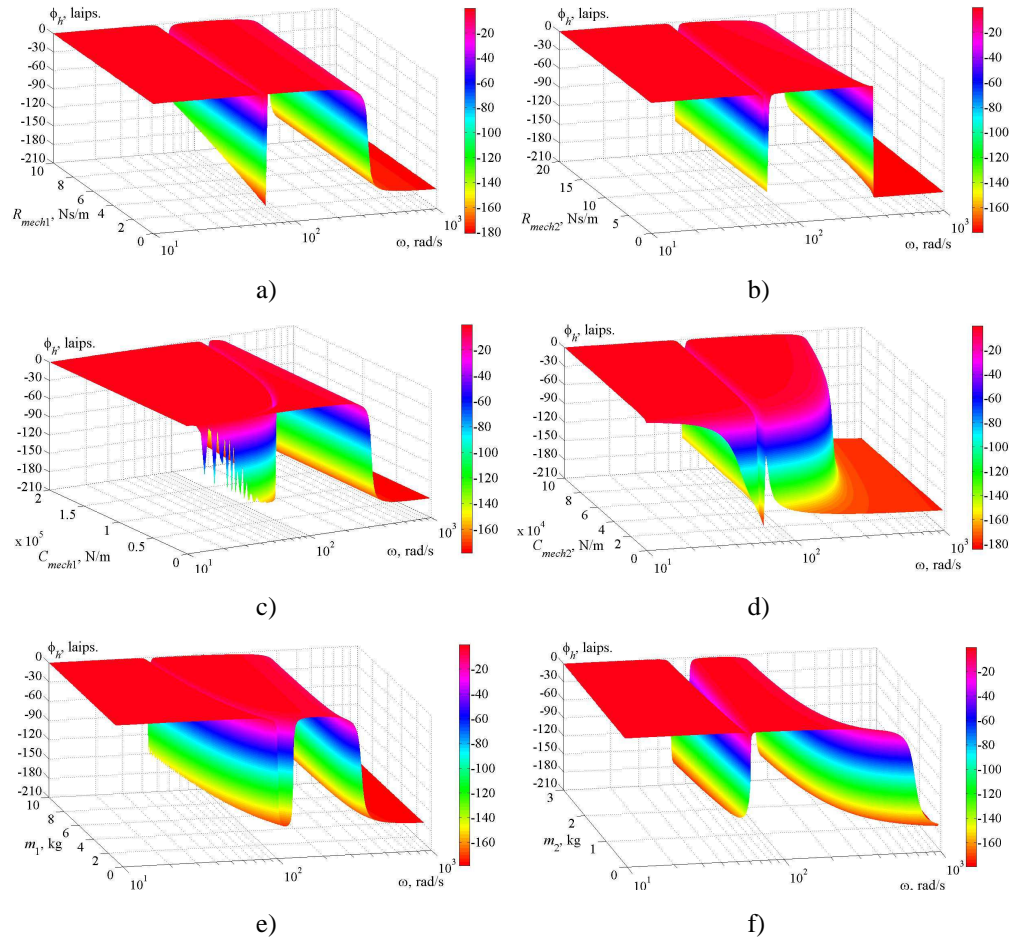


2.6 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų pagreičio amplitudinės charakteristikos, keičiantis dviem iš mechaninės posistemės parametru: a) $a=f(R_{\text{mech1}}, C_{\text{mech1}})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; 10^6] N/m; b) $a=f(m_1, C_{\text{mech1}})$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 20] kg, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; 10^6] N/m; c) $a=f(R_{\text{mech2}}, C_{\text{mech2}})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m, keičiant parametru C_{mech2} ribose [$4 \cdot 10^4$; $5 \cdot 10^4$] N/m; d) $a=f(m_2, C_{\text{mech2}})$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^4 ; 10^6] N/m. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{\text{mech1}}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{\text{mech2}}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{\text{mech1}}=3$ Ns/m, $R_{\text{mech2}}=10$ Ns/m, $\omega_1=314$ rad/s, $F_{\text{elm}}=1$ N

Absoliučiuųjų judžiosios dalies ir „statoriaus“ švytavimų poslinkio, greičio ir pagreičio amplitudinės arba amplitudinės-fazinės charakteristikos sudaromos tokiu pačiu principu, pagal priedo nr.1 lentelėje 1.1 pateiktas amplitudžių išraiškas, ir suteikia informacijos apie šių kintamųjų priklausomybes nuo sistemos parametru. Kadangi darbe tiriami reliatyvieji švytavimai, tai absoliučiuųjų švytavimų kintamųjų grafikai nepateikiami.

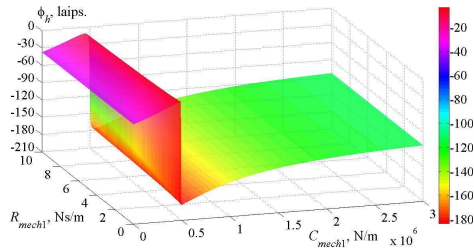
Švytuojamąjį judesio mechatroninio įtaiso mechaninės posistemės kintamųjų (poslinkio, greičio ir pagreičio) fazinės charakteristikos

Priede pateikiamos mechaninės posistemės reliatyviųjų ir absoliučiąjų (dalis) švytavimų poslinkių, greičių, pagreičių fazinės-dažninės ir fazinės charakteristikos, sudarytos remiantis, disertacijos tekste lentelėje 2.1 ir priedo nr.1 lentelėje 1.1 pateiktomis išraiškomis. Grafikai pateikti įvairioms ŠJMĮ mechaninės posistemės parametrų vertėms.

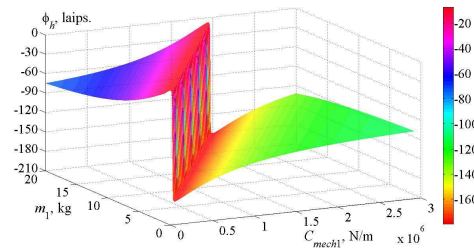


3.1 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkio fazinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametrų: a) $\varphi_h=f(\omega, R_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m; b) $\varphi_h=f(\omega, R_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m; c) $\varphi_h=f(\omega, C_{mech1})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $2 \cdot 10^5$] N/m; d) $\varphi_h=f(\omega, C_{mech2})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; e) $\varphi_h=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 10] kg; f) $\varphi_h=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{mech1}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1}=1$ Ns/m, $R_{mech2}=10$ Ns/m

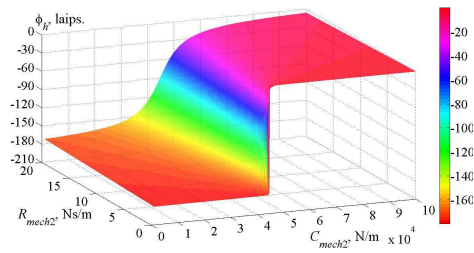
Priedas Nr. 3 (tęsinys)



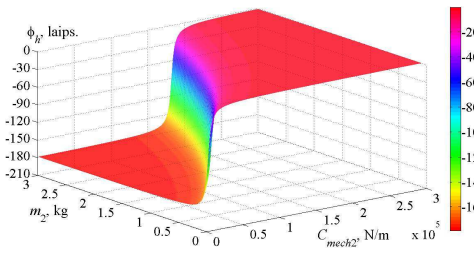
a)



b)

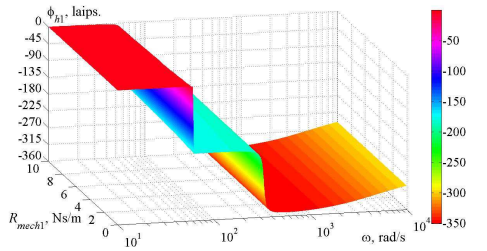


c)

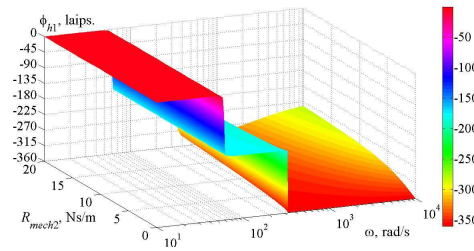


d)

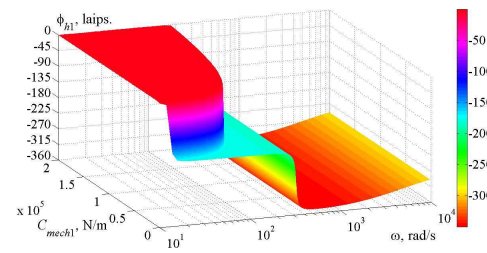
3.2 pav. Judžiosios dalies reliatyviųjų švytaviųjų poslinkio fazinės charakteristikos, keičiantis dviem iš mechaninės posistemės parametru: a) $\varphi_h = f(R_{mech1}, C_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose $[0; 10]$ Ns/m, keičiant parametru C_{mech1} ribose $[10^3; 3 \cdot 10^6]$ N/m; b) $\varphi_h = f(m_1, C_{mech1})$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose $[1; 20]$ kg, keičiant parametru C_{mech1} ribose $[10^3; 3 \cdot 10^6]$ N/m; c) $\varphi_h = f(R_{mech2}, C_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose $[0; 20]$ Ns/m keičiant parametru C_{mech2} ribose $[10^3; 10^5]$ N/m; d) $\varphi_h = f(m_2, C_{mech2})$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose $[0,1; 3]$ kg, keičiant parametru C_{mech2} ribose $[10^3; 3 \cdot 10^5]$ N/m. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1 = 5$ kg, $m_2 = 0,5$ kg, $C_{mech1} = 2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2} = 4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1} = 1$ Ns/m, $R_{mech2} = 10$ Ns/m, $\omega_1 = 314$ rad/s



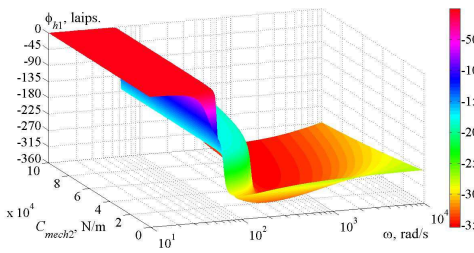
a)



b)

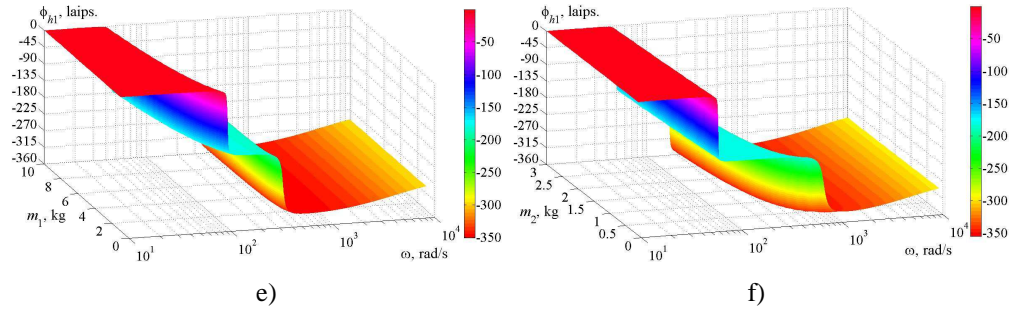


c)

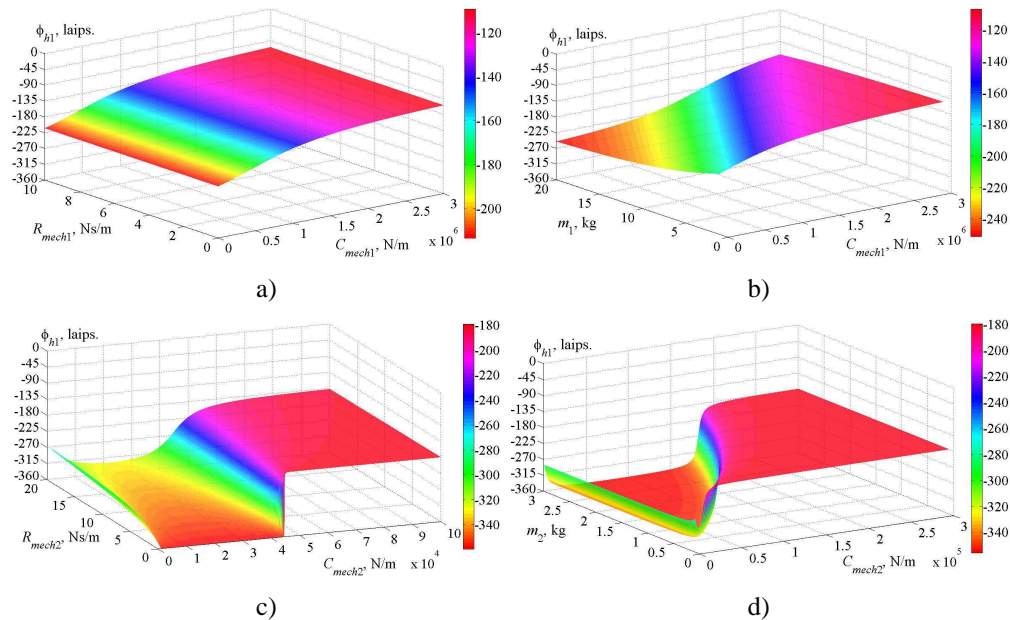


d)

Priedas Nr. 3 (tęsinys)

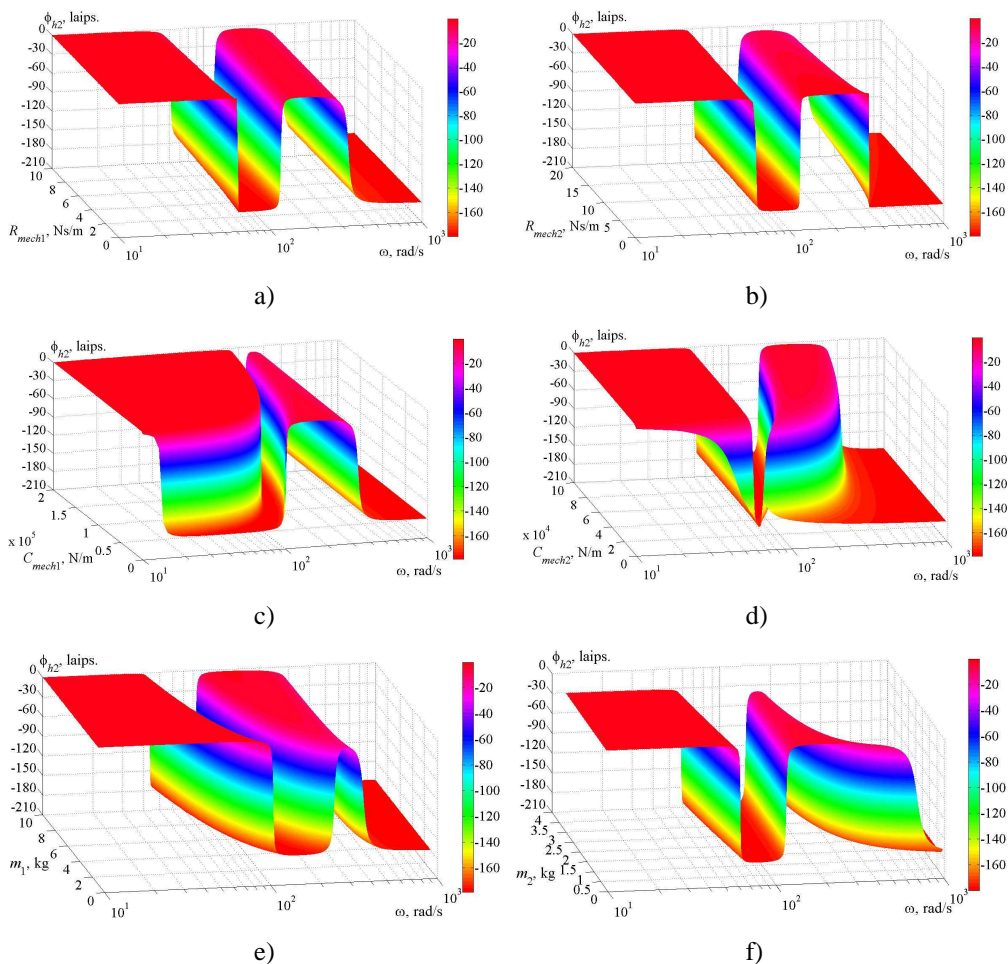


3.3 pav. „Statoriaus“ absoliučiujų švytavimų poslinkio fazinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametru: a) $\varphi_{h1}=f(\omega, R_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m; b) $\varphi_{h1}=f(\omega, R_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m; c) $\varphi_{h1}=f(\omega, C_{mech1})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $2 \cdot 10^5$] N/m; d) $\varphi_{h1}=f(\omega, C_{mech2})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; e) $\varphi_{h1}=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 10] kg; f) $\varphi_{h1}=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{mech1}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1}=1$ Ns/m, $R_{mech2}=10$ Ns/m



3.4 pav. „Statoriaus“ absoliučiujų švytavimų poslinkio fazinės charakteristikos, keičiantis dviem iš mechaninės posistemės parametru: a) $\varphi_{h1}=f(R_{mech1}, C_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose [0; 10] Ns/m, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $3 \cdot 10^6$] N/m; b) $\varphi_{h1}=f(m_1, C_{mech1})$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose [1; 20] kg, keičiant parametru C_{mech1} ribose [10^3 ; $3 \cdot 10^6$] N/m; c) $\varphi_{h1}=f(R_{mech2}, C_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose [0; 20] Ns/m keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; 10^5] N/m; d) $\varphi_{h1}=f(m_2, C_{mech2})$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose [0,1; 3] kg, keičiant parametru C_{mech2} ribose [10^3 ; $3 \cdot 10^5$] N/m. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{mech1}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1}=1$ Ns/m, $R_{mech2}=10$ Ns/m, $\omega_1=314$ rad/s

Priedas Nr. 3 (tęsinys)



3.5 pav. Judžiosios dalies absoliučiąjų švytavių poslinkio fazinės-dažninės charakteristikos, keičiantis vienam iš mechaninės posistemės parametru: a) $\varphi_{h22}=f(\omega, R_{mech1})$, keičiant parametru R_{mech1} ribose $[0; 10]$ Ns/m; b) $\varphi_{h22}=f(\omega, R_{mech2})$, keičiant parametru R_{mech2} ribose $[0; 20]$ Ns/m; c) $\varphi_{h22}=f(\omega, C_{mech1})$, keičiant parametru C_{mech1} ribose $[10^3; 2 \cdot 10^5]$ N/m; d) $\varphi_{h22}=f(\omega, C_{mech2})$, keičiant parametru C_{mech2} ribose $[10^3; 10^5]$ N/m; e) $\varphi_{h22}=f(\omega, m_1)$, keičiant „statoriaus“ masę m_1 ribose $[1; 10]$ kg; f) $\varphi_{h22}=f(\omega, m_2)$, keičiant judžiosios dalies masę m_2 ribose $[0,1; 3]$ kg. Pastovūs mechaninės posistemės parametrai: $m_1=5$ kg, $m_2=0,5$ kg, $C_{mech1}=2 \cdot 10^4$ N/m, $C_{mech2}=4,9 \cdot 10^4$ N/m, $R_{mech1}=1$ Ns/m, $R_{mech2}=10$ Ns/m

Greičio ir pagreičio fazinės dažninės charakteristikos yra tapačios švytavių poslinkių fazinėms-dažninėms pobūdžiu, o skiriasi tik $+\pi/2$ (greičio) ir $+\pi$ (pagreičio), todėl priede pateiktos tik švytavių poslinkių fazinės-dažninės charakteristikos.

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso induktyvumų analizės priedas

1. Induktyvumų kitimo dėsniai, priklausantys nuo laiko skirti tiek pereinamajam tiek ir nusistovėjusiems vyksmui:

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm K_{\sin} \sin\left(\frac{H_0(t) + H_{m.1}(t) \sin(\omega t + \varphi_{H.1}(t))}{H_m} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.1)$$

Atlikus pakeitimus (4.1) gauta:

$$L_{1,2}(t) = L_0 \pm K_{\sin} \sin\left(\left(k(H_0(t)) + k(H_{m.1}(t)) \sin(\omega t + \varphi_{H.1}(t))\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right); \quad (4.2)$$

čia $k(H_0(t))$, $k(H_{m.1}(t))$ – santykiniai švytavimų centro poslinkio ir 1-osios švytavimų poslinkio harmonikos amplitudės koeficientai, kurie lygūs:

$$k(H_0(t)) = \frac{H_0(t)}{H_m} \quad \text{ir} \quad k(H_{m.1}(t)) = \frac{H_{m.1}(t)}{H_m}. \quad (4.3)$$

Šie koeficientai turi tenkinti švytavimų poslinkio amplitudės apribojimo sąlygas:

$$|k(H_0(t)) + k(H_{m.1}(t))| \leq 1, \quad \text{arba} \quad |k(H_{m.1}(t))| \leq 1, \quad \text{kai} \quad k(H_0(t)) = 0. \quad (4.4)$$

Įvertinus (4.3) ir išraiškos (2.80) (esančios pagrindiniame tekste) lygčių sistemoje esančias induktyvumų išvestines laiko atžvilgiu, gaunama:

$$\begin{aligned} \frac{dL_{1,2}(t)}{dt} &= \pm K_{\sin} \cos\left(\left(k(H_0(t)) + k(H_{m.1}(t)) \sin(\omega t + \varphi_{H.1}(t))\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right) \times \\ &\times \left(\left(\frac{d[k(H_0(t))]}{dt} + \frac{d[k(H_{m.1}(t))]}{dt} \sin(\omega t + \varphi_{H.1}(t)) + \right. \right. \\ &\left. \left. + k(H_{m.1}(t)) \cos(\omega t + \varphi_{H.1}(t)) \left(\omega + \frac{d[\varphi_{H.1}(t)]}{dt} \right) \right) \cdot \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.5)$$

2. Sinuso ir kosinuso begalinės eilutės:

$$\sin(z) = z \cdot \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{z}{k\pi} \right)^2 \right] \quad \text{ir} \quad \cos(z) = \prod_{l=0}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{2z}{\pi(2l+1)} \right)^2 \right]. \quad (4.6)$$

3. Pataisos koeficiento skaičiavimas. Pataisos koeficientas K_{pat} gaunamas sulyginant (2.100) ir (4.9) išraiškos variantą su begalinės eilutės nariu (analizuojamas $L_1(t, k)$ induktyvumas; išraiška (2.100) iš pagrindinio teksto):

Priedas Nr. 4 (tęsinys)

$$\begin{aligned}
 L_0 + K_{\sin} \sin\left(\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) &= L_0 + K_{\sin} K_{\text{pat}} \times \\
 \times \left(\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) &\times \\
 \times \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}))\right)^2}{2k}\right)\right]. &
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Pertvarkius (4.7), išreiškiamas induktyvumo $L_1(t, k)$ pataiso koeficientas K_{pat} (tinkantis ir $L_2(t, k)$ išraiškai):

$$\begin{aligned}
 K_{\text{pat}}(k(H_0), k(H_{m.1}), m, t) &= \\
 &= \frac{\sin\left(\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right)}{\left(\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \prod_{k=1}^m \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}))\right)^2}{2k}\right)\right]}.
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Pataisos koeficientas yra lygus 1, kai $k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}) = 0$, nes dalis pataisos koeficiento išraiškos (4.8) yra lygi sinuso ir jo argumento santykiui.

$$\begin{aligned}
 L_{1,2}(t) &= L_0 \pm K_{\sin} K_{\text{pat}} \left(\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) \times \\
 &\times \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) + k(H_{m.1}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1}))\right)^2}{2k}\right)\right],
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Analizuojamas atvejis, kai narys $\sin(\omega_1 t + \varphi_{H.1})$ įgauna didžiausias ir mažiausias vertes – 1 ir -1. Tuo atveju (4.9) įgauna pavidalą:

$$\begin{aligned}
 L_{1\max, 1\min}(k(H_0), k(H_{m.1}), k) &= L_0 + K_{\sin} K_{\text{pat}1,2} \left(\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) \times \\
 &\times \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1}))\right)^2}{2k}\right)\right].
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Išraiškoje (2.100) įvertinus didžiausias ir mažiausias induktyvumų vertes ir palyginus su (4.10), gaunamos lygtys pataisos koeficientų nustatymui:

$$\begin{aligned}
 L_0 + K_{\sin} \sin\left(\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) &= L_0 + K_{\sin} K_{\text{pat}1} \times \\
 \times \left(\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1})) \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) &\cdot \prod_{k=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{\left(k(H_0) \pm k(H_{m.1}))\right)^2}{2k}\right)\right],
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Priedas Nr. 4 (tęsinys)

Galutinės pataisos koeficientų išraiškos pateiktos disertacijoje (2.106 išraiška).

4. Modeliavimo rezultatai, skirti induktyvumų spektrinei analizei pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Induktyvumų harmonikų skaičiavimo rezultatai.

$\varphi_{H,1}$	$k(H_0)$	$k(H_{m,1})$	ΔL_0	$L_{m,1,1}$	$L_{m,1,2}$	$L_{m,1,3}$	$L_{m,1,4}$	$L_{m,1,5}$	$\varphi_{L,1,1}$	$\varphi_{L,1,2}$	$\varphi_{L,1,3}$	$\varphi_{L,1,4}$	$\varphi_{L,1,5}$
laips.	-	-	H	H	H	H	H	H	laips.	laips.	laips.	laips.	laips.
0	0	1	0	1,805	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,220	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,007	0,003	90	0,022	-270	0,680
0	0	0,75	0	1,569	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,099	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,018	0,003	-270	0,049	-270	2,738
0	0	0,5	0	1,157	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,031	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,004	-270	0,157	90	19,37
0	0	0,25	0	0,613	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,004	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	0,008	-270	1,223	90	84,82
30	0	1	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,805	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,220	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,007	30,003	90	90	-270	-210,84
60	0	1	$2,6 \cdot 10^{-3}$	1,805	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,220	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,007	60,002	-270	180,04	-270	-59,44
90	0	1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	1,805	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,220	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,007	90	-270	270	90	-270
-90	0	1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	1,805	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,220	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,007	-90	-270	-270	-270	-90
-60	0	1	$2,6 \cdot 10^{-3}$	1,805	$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,220	$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,007	-60	-270	-180	-270	60,13
-30	0	1	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,805	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,220	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,007	-30	90	-90	90	-150,33
0	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,002	0,004	90	0,051	90	2,51
0	0,4	0,6	0,739	1,084	0,193	0,043	0,004	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0,006	90	0,157	90	13,58
0	0,5	0,5	0,959	0,818	0,165	0,022	0,002	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,009	90	0,321	90	35,64
0	0,4	0,4	0,846	0,770	0,090	0,013	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,009	90	0,512	90	60,9
30	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,002	30,004	150	90	-151,1	-212,7
60	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,002	60,002	210	180,1	-28,8	-58,2
90	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,003	90	270	270	90	90
-90	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,003	-90	-90	-270	90	-90
-60	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,002	-60	-29,99	-180	-150,4	60,6
-30	0,2	0,8	0,316	1,551	0,17	0,113	0,006	0,002	-30	30,02	-90	-29,4	-151,5

Švytuojamojo judesio mechatroninio įtaiso gedimai ir jų indikacijos

Diagnostikos objektui – ŠJMĮ, sudarytos gedimų ir jų indikacijų, bendrojoje srovėje, aibės. Įtaiso gedimų aibę E galima suskirstyti į poaibes, pagal įtaiso posistemės:

- mechaninės posistemės gedimų poaibė $E_{1,i}$. Šios poaibės gedimai pateikti 5.1 lentelėje;

5.1 lentelė. Mechaninės posistemės gedimai.

Eil. Nr.	Gedimo žymuo	Gedimas	Pasekmės įtaisu	Bendrosios srovės indikacijos	Veiksmai, gedimo atveju
1	$E_{1,1}$	Sugadinta arba nutrūkusi pakabos spyruoklė	Įtaiso padėties pasikeitimas, dėl ko atsiranda nevienoda apkrova kompresoriaus kameroje	Nežymiai padidėja pirmoji harmonika, gali atsirasti nuolatinė srovės dedamoji	Įtaisas turėtų būti stabdomas, remontuojamas, gedimą pagal srovę nustatyti sudėtinga
2	$E_{1,2}$	Aušinimo pablogėjimas (oru arba tepalu)	Sumažėjęs kompresoriaus našumas, kenksmingas poveikis apvijų izoliacijai, kenksmingas poveikis magnetolaidžio tarpbloktelinei izoliacijai	Srovės indikacijos informacijos nesuteikia, būtina temperatūrinė indikacija	Įrenginys trumpą laiką gali dirbti, tačiau aušinimui negerėjant – stabdomas
3	$E_{1,3}$	Vienas iš įsiurbimo vožtuvų atsidaro per anksti	Sumažėja kompresoriaus našumas ir mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Bendrojoje srovėje atsiranda nuolatinė srovės dedamoji, sumažėja pirmoji harmonika (nuolatinės dedamosios ženklas nurodo, kuri dalis sugedusi)	Padidinti tiristorių atidarymo kampus ir stabdyti įrenginį remontui
4	$E_{1,4}$	Vienas iš įsiurbimo vožtuvų atsidaro per vėlai	Sumažėja kompresoriaus našumas ir mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1,3}$	Taip pat kaip $E_{1,3}$
5	$E_{1,5}$	Vienas iš įsiurbimo vožtuvų užsidaro per anksti	Sumažėja kompresoriaus našumas ir mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1,3}$	Taip pat kaip $E_{1,3}$
6	$E_{1,6}$	Vienas iš įsiurbimo vožtuvų užsidaro per vėlai	Sumažėja kompresoriaus našumas ir mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1,3}$	Taip pat kaip $E_{1,3}$
7	$E_{1,7}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų atsidaro per anksti	Padidėja mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Bendrojoje srovėje atsiranda nuolatinė srovės dedamoji, padidėja pirmoji harmonika (nuolatinės dedamosios ženklas nurodo, kuri dalis sugedusi)	Padidinti tiristorių atidarymo kampus ir stabdyti įrenginį remontui

8	$E_{1.8}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų atsidaro per vėlai	Padidėja mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1.7}$	Taip pat kaip $E_{1.7}$
9	$E_{1.9}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų užsidaro per anksti	Sumažėja našumas, padidėja mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1.7}$	Taip pat kaip $E_{1.7}$
10	$E_{1.10}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų užsidaro per vėlai	Sumažėja našumas, padidėja mechaninė varža, atsiranda švytavimų centro poslinkis	Taip pat kaip $E_{1.7}$	Taip pat kaip $E_{1.7}$
11	$E_{1.11}$	Vienas iš išsiurbimo vožtuvų neatsidaro	Sumažėja našumas, atsiranda švytavimų centro poslinkis, judžioji dalis „daužosi“ į „statorių“	Bendrosios srovės formoje atsiranda staigūs srovės pikai	Padidinti tiristorių atidarymo kampą, jei problema neišnyksta, stabdyti įrenginį
12	$E_{1.12}$	Vienas iš išsiurbimo vožtuvų neužsidaro	Sumažėja našumas, atsiranda švytavimų centro poslinkis, judžioji dalis „daužosi“ į „statorių“	Taip pat kaip $E_{1.11}$	Taip pat kaip $E_{1.11}$
13	$E_{1.13}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų neatsidaro	Sumažėja našumas, atsiranda švytavimų centro poslinkis, judžioji dalis „daužosi“ į „statorių“	Taip pat kaip $E_{1.11}$	Taip pat kaip $E_{1.11}$
14	$E_{1.14}$	Vienas iš suspaudimo vožtuvų neužsidaro	Sumažėja našumas, atsiranda švytavimų centro poslinkis, judžioji dalis „daužosi“ į „statorių“	Taip pat kaip $E_{1.11}$	Taip pat kaip $E_{1.11}$
15	$E_{1.15}$	Judžiosios dalies tepimo žiedo lūžis	Dėl pablogėjusio tepimo, padidėja mechaninė varža	Kai nekeičiamas tiristorių atidarymo kampas, padidėja bendroji srovė. Taip pat turi būti gaunama informacija apie našumą ir slėgį. Jei jie nekinta, nustatomas gedimas	Galima dirbti toliau. Pablogėja įrenginio energetinės charakteristikos (dalis energijos prarandama dėl papildomos trinties)
16	$E_{1.16}$	Tepimo pablogėjimas tarp judžiosios dalies ir „statoriaus“	Padidėja mechaninė varža	Taip pat kaip $E_{1.15}$	Taip pat kaip $E_{1.15}$
17	$E_{1.17}$	Stūmoklio „daužymasis“ į kompresoriaus kameros dugną	Galimi mechaniniai pažeidimai tiek judžiosios dalies, tiek ir „statoriaus“, našumas sumažėja, galimai dirba su švytavimų centro poslinkiu	Bendrosios srovės formoje atsiranda staigūs srovės pikai	Padidinti tiristorių atidarymo kampą, jei problema neišnyksta, stabdyti įrenginį
18	$E_{1.18}$	Judėjimo kameros sienelių išsidėvėjimas	Sumažėja našumas, stūmoklis gali būti pakrypęs horizontalios ašies atžvilgiu	Padidėjus oro tarpui, padidėja pirmoji srovės harmonika	Gali dirbti trumpą laiką iki remonto
19	$E_{1.19}$	Judžiosios dalies žiedų išsidėvėjimas	Padidėja mechaninė varža	Taip pat kaip $E_{1.15}$	Taip pat kaip $E_{1.15}$

Priedas Nr. 5 (tęsinys)

- elektromagnetinės posistemės gedimų poaibė $E_{2,i}$. Šios poaibės gedimai pateikti 5.2 lentelėje;

5.2 lentelė. Elektromagnetinės posistemės gedimai.

Eil. Nr.	Gedimo žymuo	Gedimas	Pasekmės įtaisui	Bendrosios srovės indikacijos	Veiksmai, gedimo atveju
1	$E_{2,1}$	Nutrūkusi viena „statoriaus“ apvija	Judžioji dalis nejuda, pritraukta prie priešingos pusės, teka vienpusė srovė	Bendrojoje srovėje atsiranda lyginės harmonikos (antrosios harmonikos indikacija, nuolatinės dedamosios ženklas parodo gedimo kryptį, bendrosios srovės dydis sumažėja beveik per pusę)	Atjungti įrenginį avariniu būdu
2	$E_{2,2}$	Dėl pablogėjusios izoliacijos, užsitrupina dalis „statoriaus“ apvijų	Sumažėja vienos apvijos varža ir induktyvumas, judžioji dalis pasislenka link apvijos su didesniu induktyvumu, padidėja tos šakos srovė, atsiranda srovės nuolatinė dedamoji	Atsiranda nežymi nuolatinės srovės dedamoji	Galimas tolesnis darbas padidinus tiristorių atidarymo kampą
3	$E_{2,3}$	Izoliacijos pablogėjimas tarp magnetolaidžio plokštelių	Gali padidėti nuostoliai magnetolaidyje dėl Fuko srovių, pablogėja aušinimo sąlygos	Srovės indikacijos nesuteikia informacijos, būtina temperatūrinė indikacija	Galimas tolesnis darbas padidinus tiristorių atidarymo kampą
4	$E_{2,4}$	Jei įtaisas žadinamasis – magneto savybių praradimas	Sumažėja elektromagnetinė jėga, našumas, gali sumažėti švytavimų amplitudė	Žymiai sumažėja pirmoji srovės harmonika ir bendrosios srovės efektinė vertė	Įrenginys stabdomas
5	$E_{2,5}$	„Statoriaus“ apvijų perkaitimas	Padidėja „statoriaus“ apvijų varža ir elektriniai nuostoliai, silpsta izoliacija	Srovės indikacijos nesuteikia informacijos, būtina temperatūrinė indikacija	Galimas trumpalaikis darbas padidinus tiristorių atidarymo kampą
6	$E_{2,6}$	Magnetolaidžio perkaitimas	Padidėja nuostoliai magnetolaidyje, silpsta izoliacija, sumažėja srautas	Taip pat kaip $E_{2,5}$	Taip pat kaip $E_{2,5}$

Priedas Nr. 5 (tęsinys)

- galios keitiklio posistemės gedimų poaibė $E_{3.i}$. Šios poaibės gedimai pateikti 5.3 lentelėje;

5.3 lentelė. Galios keitiklio posistemės gedimai.

Eil. Nr.	Gedimo žymuo	Gedimas	Pasekmės įtaisui	Bendrosios srovės indikacijos	Veiksmai, gedimo atveju
1	$E_{3,1}$	Vienas tiristorius visada uždaras	Judžioji dalis nejuda, pritraukta prie priešingos pusės, teka vienpusė srovė	Bendrojoje srovėje atsiranda lyginės harmonikos (antrosios harmonikos indikacija, nuolatinės dedamosios ženklas parodo gedimo kryptį, bendrosios srovės dydis sumažėja beveik per pusę)	Atjungti įrenginį avariniu būdu
2	$E_{3,2}$	Vienas tiristorius visada atviras	Gedimo šaka teka sinusinė srovė, judžioji dalis „daužosi“ į „statorių“, sumažėja našumas	Bendrojoje srovėje atsiranda antroji ir ketvirtoji harmonikos, bendrosios srovės dydis padidėja. Gedimo kryptį rodo nuolatinės srovės dedamosios ženklas	Atjungti įrenginį avariniu būdu
3	$E_{3,3}$	Abu tiristoriai atidaryti skirtingais kampais, nors valdymo sistema nustato vienodą atidarymo kampą	Atsiranda švytavimų centro poslinkis, sumažėja našumas	Atsiranda srovės nuolatinė dedamoji	Galimas trumpalaikis darbas padidinus tiristorių atidarymo kampus
4	$E_{3,4}$	Nesikeičia tiristoriaus atidarymo kampas, nors keičiamas valdymo impulsas	Gali atsirasti švytavimų centro poslinkis, sumažėja našumas	Atsiranda srovės nuolatinė dedamoji	Įrenginys stabdomas
5	$E_{3,5}$	Tiristoriaus atidarymo kampas keičiasi, nors valdymo signalas pastovus	Tiristorius nestabilus, gali atsirasti švytavimų centro poslinkis, judžiosios dalies daužymasis į „statorių“	Atsiranda srovės nuolatinė dedamoji, gali atsirasti srovės pikai srovės formoje	Įrenginys stabdomas

Priedas Nr. 5 (tęsinys)

- valdymo posistemės, skirtos tiristoriniam įtampos keitikliui, gedimų poaibė $E_{4.i}$. Šios poaibės gedimai pateikti 5.4 lentelėje.

5.4 lentelė. Valdymo posistemės gedimai.

Eil. Nr.	Gedimo žymuo	Gedimas	Pasekmės įtaisui	Bendrosios srovės indikacijos	Veiksmai, gedimo atveju
1	$E_{4,1}$	Srovės jutiklio išėjime nėra signalo	Valdymo ir stebėsenos sistema neveiksni, neįmanomas valdymas	Nulinis srovės gr.r. signalas	Atjungti įrenginį
2	$E_{4,2}$	Srovės jutiklio signalas – tik triukšmas	Brokuotas srovės jutiklis arba galvaninis atskyriklis, valdymo ir stebėsenos sistema neveiksni, neįmanomas valdymas	Spektre įvairaus dydžio ir dažnio harmonikos	Atjungti įrenginį
3	$E_{4,3}$	Srovės jutiklio signalas – trūkinėjantis	Blogas kontaktas srovės grįžtamojo ryšio grandinėje, valdymo sutrikimai	Srovės gr.r. signalo GFT keičiasi plačiose ribose	Atjungti įrenginį
4	$E_{4,4}$	Nėra tiristoriaus valdymo impulso	Tiristorius visada uždaras, judžioji dalis nejuda, pritraukta prie priešingos pusės, teka vienpusė srovė	Bendrojoje srovėje atsiranda lyginės harmonikos (antrosios harmonikos indikacija, nuolatinės dedamosios ženklas parodo gedimo kryptį, bendrosios srovės dydis sumažėja beveik per pusę)	Atjungti įrenginį avariniu būdu
5	$E_{4,5}$	Tiristoriaus valdymo signalas pastovus, nors valdymo sistema jį keičia	Valdymo sistemos išėjimo grandinės gedimas, gali atsirasti švytavimų centro poslinkis, ar net „daužymasis“ į „statorių“	Nuolatinės srovės dedamosios atsiradimas, srovės pikai srovės formoje	Atjungti įrenginį avariniu būdu
6	$E_{4,6}$	Tiristoriaus valdymo signalas pastovus, nors užduoties signalas keičiasi	Blogai veikia valdymo algoritmo programa, nevykdomi technologiniai reikalavimai	Srovės signalas nesikeičia	Patikrinti arba perkrauti programą atjungus įrenginį
7	$E_{4,7}$	Tiristoriaus valdymo signalas keičiasi, nors užduoties signalas pastovus	Blogai veikia valdymo algoritmo programa, nevykdomi technologiniai reikalavimai	Srovės signalas keičiasi, nesant užduoties signalo pokyčiui, būtina apkrovos parametrų indikacija	Patikrinti arba perkrauti programą atjungus įrenginį
8	$E_{4,8}$	Nustatomas gedimas jam nesant	Gedimų diagnostikos sistemos gedimas, nenormalus įtaiso darbas, technologinio proceso sutrikdymas	Galimos įvairios srovės parametrų indikacijos (harmonikų kaita, jų dydžio kaita, nuolatinės dedamosios atsiradimas)	Patikrinti arba perkrauti programą atjungus įrenginį

Priedas Nr. 6

Programos kodas sudarytas Matlab programiniu paketu, skirtas įvairių ŠJMĮ charakteristikų skaičiavimui.

Rinkmena: „Osc_motor_main.m“

% Dvipusis švytuojamojo judesio mechatroninis įtaisas – švytuojamojo judesio variklis su ekvivalentinės oro spyruoklės ir ekvivalentinės mechaninės varžos apkrova. Matematinis modelis.

clc

clear all

close all

global Hm w m m1 m2 Um r11 r12 r21 r22 L0 Lmin Lmax K R1 R2 C1 C2 f Fp

% -----

% Duomenys.

% Mechaninė dalis.

% Hm – judžiosios dalies švytavimų amplitudė „statoriaus“ atžvilgiu, m;

% m – bendra sistemos masių matrica; m1 – judžiosios dalies masė, kg; m2 – “statoriaus” masė, kg;

% R1 – trinties parametras tarp „statoriaus“ ir aplinkos arba slopintuvo, Ns/m;

% R2 – trinties parametras tarp „statoriaus“ ir judžiosios dalies ir įvertinanti kompresoriaus naudingą

% darbą, Ns/m;

% C1 – “statoriaus” standis apibūdinantis slopintuvų charakteristikas, N/m;

% C2 – kompresoriaus kamerų ekvivalentinis standis, N/m;

% Fp – papildoma išorinė jėga, N.

Hm=0.015; m1=5; m2=0.5; m=[m1; m2]; R1=3; R2=10; C1=2000000; C2=49000; Fp=0;

% -----

% Elektrinė ir magnetinė dalis.

% Maitinimo įtampa u, jos dažniai f ir w.

% XL0, XLmin, XLmax, L0, Lmax, Lmin – variklio induktyviosios varžos ir induktyvumai, kai h kinta nuo -Hm iki Hm;

% r11, r21 – variklio apvijų varžos;

% r12, r22 – varžos apibūdinančios nuostolius magnetolaidyje;

% K - induktyvumų koeficientas.

Um=sqrt(2)*220;

f=50; fnom=50;

w=2*pi*f; wnom=2*pi*fnom;

tpp=0.6;

XL0=800; XLmin=300; XLmax=1300;

L0=XL0/wnom; Lmin=XLmin/wnom; Lmax=XLmax/wnom;

K=(Lmax-Lmin)/(2*sin(pi/2));

r11=45; r21=r11; r12=3000*((f+f^2)/(fnom+fnom^2)); r22=r12;

pat=false;

h=0.00005;

% Tiristorių atidarymo kampas α .

alpha=0*(5*pi/180);

% -----

% Apkrovos keitimo pasirinkimo parametrai.

while ~pat

 Pasirinkty=['1. Standžio C2 keitimas intervalu ';

 '2. Standžio C2 keitimas darbo metu';

 '3. Trinties R2 keitimas intervalu ';

 '4. Trinties R2 keitimas darbo metu';

 '10. Darbo pabaiga ' ']

 ats=str2double(input('Pasirinkite punkta:', 's'));

 switch ats

 case 1

 ats1=str2double(input('Pasirinkite, kiek bus standžio C2 verčių:', 's'));

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```
C2=[];
i=1;
while ats1>=i
    C2ivedimas=str2double(input('Įveskite norimą C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    while C2ivedimas<1000 || C2ivedimas>500000
        disp('Blogai įvesta C vertė');
        C2ivedimas=str2double(input('Įveskite norimą C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    end
    C2(i)=C2ivedimas;
    i=i+1;
end
pat=true;
case 2
    C2pradine=str2double(input('Įveskite pradinę C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    C2galine=str2double(input('Įveskite galinę C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    while C2pradine<1000 || C2pradine>500000
        disp('Blogai įvesta C2 vertė');
        C2pradine=str2double(input('Įveskite pradinę C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    end
    while C2galine<1000 || C2galine>500000
        disp('Blogai įvesta C2 vertė');
        C2galine=str2double(input('Įveskite galinę C2 vertę iš intervalo [1000;500000]:','s'));
    end
    C2(1)=C2pradine;
    C2(2)=C2galine;
    tpov=str2double(input('Įveskite apkrovos C2 pasikeitimo laiko vertę iš intervalo [0;1]:','s'));
    pat=true;
case 3
    ats1=str2double(input('Pasirinkite, kiek bus trinties koeficiento R2 verčių','s'));
    R2=[];
    i=1;
    while ats1>=i
        R2ivedimas=str2double(input('Įveskite norimą trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo [1;20]:','s'));
        while Rivedimas<1 || R2ivedimas>20
            disp('Blogai įvesta trinties koeficiento R2 vertė');
            R2ivedimas=str2double(input('Įveskite norimą trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo [1;20]:','s'));
        end
        R2(i)=R2ivedimas;
        i=i+1;
    end
    pat=true;
case 4
    R2pradine=str2double(input('Įveskite pradinę trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo [1;20]:','s'));
    R2galine=str2double(input('Įveskite galinę trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo [1;20]:','s'));
    while R2pradine<1 || R2pradine>20
        disp('Blogai įvesta trinties koeficiento R2 vertė');
        R2pradine=str2double(input('Įveskite pradinę trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo [1;20]:','s'));
    end
    while R2galine<1 || R2galine>20
        disp('Blogai įvesta trinties koeficiento R2 vertė');
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```
R2galine=str2double(input('Įveskite galinę trinties koeficiento R2 vertę iš intervalo
[1;20]:' , 's'));
end
R2(1)=R2pradine;
R2(2)=R2galine;
tpov=str2double(input('Įveskite apkrovos trinties koeficiento R2 pasikeitimo laiko vertę iš
intervalo [0;1]:' , 's'));
pat=true;
case 10
break
otherwise
disp('Tokio punkto nėra');
pat=false;
end
end
% -----
% Rezultatų pateikimas.
% Spektrai - h, v, i ir Felm.
 spalva=['b'; 'g'; 'r'; 'c'; 'm'; 'y'; 'k'];
% Pereinamųjų vyksmų skaičiavimas.
figure;
for k=1:i-1
if max(size(C2))==1
AA=[m; R2(k); C2; Hm];
else
AA=[m; R2; C2(k); Hm];
end
[A1,A2,A3,A4]=proc_osc_motor_tm(AA, tpp, alpha, h);
% Švytavimų poslinkių pereinamieji vyksmai.
subplot(3,1,1); plot(A3, A1(:,1), spalva(k)); set (gca, 'Xlim', [0 max(A3)]); grid on;
title("Statoriaus" švytavimų poslinkio p.v.  $\{i\}_{1}$ ); xlabel('{i},s');
ylabel('{i}_{1}, m');
hold on;
subplot(3,1,2); plot(A3, A1(:,2), spalva(k)); set (gca, 'Xlim', [0 max(A3)]); grid on;
title('Judžiosios dalies švytavimų poslinkio p.v.  $\{i\}_{2}$ ); xlabel('{i},s');
ylabel('{i}_{2}, m');
hold on;
subplot(3,1,3); plot(A3, A1(:,27), spalva(k)); set (gca, 'Xlim', [0 max(A3)]); grid on;
title('Judžiosios dalies reliatyviųjų švytavimų poslinkio "statoriaus" atžvilgiu p.v.  $\{i\}$ );
xlabel('{i},s'); ylabel('{i}, m');
hold on;
end
hold off;
% Kiti grafikai sudaromi panašiu principu, todėl programinis kodas nepateikiamas.
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

Rinkmena: „proc_osc_motor_tm.m“. Atlieka pagrindinės paprogramės-funkcijos vykdymą.

```
function [z,AA2,tt,psi]=proc_osc_motor_tm(mech,tp,alpha,h)
% Paprogramė. Dvipusis švytuojamąjį judesio mechatroninis įtaisas – švytuojamąjį judesio variklis su
ekvivalentinės oro spyruoklės ir ekvivalentinės mechaninės varžos apkrova. Matematinis modelis.
```

```
global A M w Um r11 r12 r21 r22 K f C1 R1 m1
```

```
% -----
```

```
% Matricos A ir M elementai.
```

```
n=6;
```

```
A=zeros(n); M=zeros(n);
```

```
A(1,3)=1;
```

```
A(2,4)=1;
```

```
A(3,1)=-(C1+mech(4))/mech(1); A(3,2)=mech(4)/mech(1); A(3,3)=-(R1+mech(3))/mech(1);
```

```
A(3,4)=mech(3)/mech(1);
```

```
A(4,1)=mech(4)/mech(2); A(4,2)=-mech(4)/mech(2); A(4,3)=mech(3)/mech(2);
```

```
A(4,4)=-mech(3)/mech(2);
```

```
dMh=0;
```

```
% -----
```

```
% Pradinės sąlygos.
```

```
z=[];
```

```
t=0;
```

```
i=1;
```

```
Nr=0;
```

```
x=zeros(31,1);
```

```
y0=zeros(6,1);
```

```
z(1,:)=x';
```

```
% -----
```

```
% Tiristorių atidarymo kampai - h1 ir h2.
```

```
wh=2*pi;
```

```
h1=alpha;
```

```
h2=alpha+pi;
```

```
% -----
```

```
% Pagrindinio ciklo skaičiavimas.
```

```
while t<=tp
```

```
    i=i+1;
```

```
    t=t+h;
```

```
% -----
```

```
% Tiristorių atidarymo signalų formavimas.
```

```
    if w*t>=h1
```

```
        Nr=1;
```

```
        h1=h1+wh;
```

```
        g1=1;
```

```
    end
```

```
    if w*t>=h2
```

```
        Nr=2;
```

```
        h2=h2+wh;
```

```
        g1=1;
```

```
    end
```

```
    u=Um*sin(w*t);
```

```
% -----
```

```
% Sistemos dif. lygčių sprendimas.
```

```
    switch Nr
```

```
        case 1
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```

y0(1,1)=x(1,1);
y0(2,1)=x(2,1);
y0(3,1)=x(3,1);
y0(4,1)=x(4,1);
y0(5,1)=x(5,1);
y0(6,1)=x(6,1);
if x(6,1)==0 && g1
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje grandinės dalyje
    % teka per vieną (pirmąjį) tiristorių, esant paleidimo momentui.
    y=rungekutta('struct_1_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=(Um*sin(w*t)+r12*x(5,1))/(r11+r12);
    x(9,1)=0;
    g1=0;
elseif x(9,1)<0
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje teka per abu tiristorius.
    y=rungekutta('struct_12_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=(Um*sin(w*t)+r12*x(5,1))/(r11+r12);
    x(9,1)=(Um*sin(w*t)+r22*x(6,1))/(r21+r22);
elseif (x(7,1)>0 && x(9,1)==0) || g1
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje teka per pirmąjį tiristorių (ne paleidimo metu).
    y=rungekutta('struct_13_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=(Um*sin(w*t)+r12*x(5,1))/(r11+r12);
    x(9,1)=0;
    g1=0;
elseif x(7,1)==0 && x(9,1)==0
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje neteka nei per vieną tiristorių
    % (srovė egzistuoja tik antriniuose grandinės kontūruose).
    y=rungekutta('struct_15_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=0;
    x(9,1)=0;
else
end
x(1,1)=y(1,1);
x(2,1)=y(2,1);
x(3,1)=y(3,1);
x(4,1)=y(4,1);
% Reliatyviųjų švytavių poslinkio skaičiavimas
x(27,1)=y(2,1)-y(1,1);
% Reliatyviųjų švytavių greičio skaičiavimas
x(28,1)=y(4,1)-y(3,1);

```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```

if x(7,1)<0;
    x(7,1)=0;
elseif x(9,1)>0;
    x(9,1)=0;
else
end
case 2
y0(1,1)=x(1,1);
y0(2,1)=x(2,1);
y0(3,1)=x(3,1);
y0(4,1)=x(4,1);
y0(5,1)=x(5,1);
y0(6,1)=x(6,1);
if x(7,1)>0
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje teka per abu tiristorius.
    y=rungekutta('struct_12_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=(Um*sin(w*t)+r12*x(5,1))/(r11+r12);
    x(9,1)=(Um*sin(w*t)+r22*x(6,1))/(r21+r22);
elseif (x(7,1)==0 && x(9,1)<0) || (x(5,1)>0 && x(9,1)==0 && g1) || g1
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje teka per antrąjį tiristorių (ne paleidimo
    % metu).
    y=rungekutta('struct_14_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=0;
    x(9,1)=(Um*sin(w*t)+r22*x(6,1))/(r21+r22);
    g1=0;
elseif x(7,1)==0 && x(9,1)==0
    % Diferencialinių lygčių sprendimas, kai srovė šakotoje
    % grandinės dalyje neteka nei per vieną tiristorių
    % (srovė egzistuoja tik antriniuose grandinės kontūruose).
    y=rungekutta('struct_15_1tm',t,y0,h,w);
    x(5,1)=y(5,1);
    x(6,1)=y(6,1);
    x(7,1)=0;
    x(9,1)=0;
else
end
x(1,1)=y(1,1);
x(2,1)=y(2,1);
x(3,1)=y(3,1);
x(4,1)=y(4,1);
% Reliatyviųjų švytvimų poslinkio skaičiavimas
x(27,1)=y(2,1)-y(1,1);
% Reliatyviųjų švytvimų greičio skaičiavimas
x(28,1)=y(4,1)-y(3,1);
if x(7,1)<0;
    x(7,1)=0;
elseif x(9,1)>0;
    x(9,1)=0;

```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```

else
end
otherwise
end
% Grandinės šakų įtampos
if x(7,1)>0
x(13,1)=u;
else
x(13,1)=0;
end
if x(9,1)<0
x(14,1)=u;
else
x(14,1)=0;
end
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkio apribojimas
if x(27,1)>mech(5)
x(27,1)=mech(5);
elseif x(27,1)<-mech(5)
x(27,1)=-mech(5);
else
end
% -----
% Kitų kintamųjų skaičiavimas
tt(i)=t;
x(8,1)=x(7,1)-x(5,1);
x(10,1)=x(9,1)-x(6,1);
x(11,1)=x(7,1)+x(9,1);
x(12,1)=0.5*(x(5,1)^2)*((pi/(2*mech(5)))*K*cos(((x(27,1)/mech(5))*pi)/2))+0.5*(x(6,1)^2)*(-
(pi/(mech(5)*2))*K*cos(((x(27,1)/mech(5))*pi)/2))+x(5,1)*x(6,1)*dMh;
% Maitinimo šaltinio įtampa
if u>=0
x(15,1)=x(13,1);
else
x(15,1)=x(14,1);
end
x(16,1)=Um*sin(w*t);
x(17,1)=Um*sin(w*t)*x(11,1);
x(18,1)=x(3,1)*x(12,1);
x(19,1)=x(4,1)*x(12,1);
x(20,1)=x(18,1)+x(19,1);
x(21,1)=x(28,1)*x(12,1);
x(22,1)=x(17,1)-x(21,1)-x(7,1)^2*r11-x(8,1)^2*r12-x(9,1)^2*r21-x(10,1)^2*r22-x(21,1);
x(23,1)=x(7,1)^2*r11;
x(24,1)=x(8,1)^2*r12;
x(25,1)=x(9,1)^2*r21;
x(26,1)=x(10,1)^2*r22;
x(29,1)=-((R1+mech(3))*x(3,1)+mech(3)*x(4,1)-(C1+mech(4))*x(1,1)+mech(4)*x(2,1))/mech(1);
x(30,1)=(x(12,1)+mech(3)*x(3,1)-mech(3)*x(4,1)+mech(4)*x(1,1)-mech(4)*x(2,1))/mech(2);
x(31,1)=x(30,1)-x(29,1);
% -----
% Rezultatų matricos formavimas:
% z(:,1) – „statoriaus“ švytavimų poslinkis h1, m; z(:,2) – judžiosios dalies švytavimų poslinkis h2, m;
% z(:,3) – „statoriaus“ švytavimų greitis v1, m/s; z(:,4) – judžiosios dalies švytavimų greitis v2, m/s;

```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```

% z(:,5) – srovė iL1, A; z(:,6) – srovė iL2, A;
% z(:,7) – srovė i11, A; z(:,8) – srovė i12, A;
% z(:,9) – srovė i21, A; z(:,10) – srovė i22, A;
% z(:,11) – bendroji grandinės srovė i, A; z(:,12) – elektromagnetinė jėga Felm, N;
% z(:,13) – pirmos apvijos įtampa u1, V; z(:,14) – antros apvijos įtampa u2, V;
% z(:,15) – bendra įtampa u, V; z(:,16) – bendra šaltinio įtampa u, V;
% z(:,17) – pilnoji tinklo momentinė aktyvioji galia p, VA;
% z(:,18) – elektromechaninė momentinė atiduodama „statoriaus“ galia pmechs, W;
% z(:,19) – elektromechaninė momentinė atiduodama judžiosios dalies galia pmechjd, W;
% z(:,20) – elektromechaninė momentinė atiduodama bendra sistemos galia pmech, W;
% z(:,21) – momentinė mechaninė galia pmech, W; z(:,22) – momentinis galių balansas;
% z(:,23) – galia r11 varžoje, W; z(:,24) – galia r12 varžoje, W;
% z(:,25) – galia r21 varžoje, W; z(:,26) – galia r22 varžoje, W;
% z(:,27) – reliatyviųjų švytavimų poslinkis h, m; z(:,28) – reliatyviųjų švytavimų greitis v, m/s;
% z(:,29) – „statoriaus“ švytavimų pagreitis a1, m/s^2; z(:,30) – judžiosios dalies švytavimų pagreitis
a2, m/s^2;
% z(:,31) – reliatyviųjų švytavimų pagreitis a, m/s^2;
z(i,:)=x';
end
% -----
% Spektrų skaičiavimas lyginant su pirmosiomis harmonikomis.
ff=round(sqrt(C1/m1)/(2*pi)); fff=0.2;
w1=2*pi*fff;
N=size(z(end-(round(1/(f*h))-1):end,1));
% Spektra harmonikų amplitudžių skaičiavimas
for k=0:10
    if k<1
        D=(1/N(1)).*sum(z(end-(round(1/(f*h))-1):end,1:31));
    else
        for i=1:31
            D(1,i)=(2/N(1)).*sum(z(end-(round(1/(f*h))-1):end,i).*(sin(k.*w.*tt(end-(round(1/(f*h))-1):end')+1i.*cos(k.*w.*tt(end-(round(1/(f*h))-1):end'))));
        end
        end
        NN(k+1)=k;
        DD(k+1,:)=D;
    end
AA=sqrt((real(DD)).^2+(imag(DD)).^2);
AAR=real(DD);
AAI=imag(DD);
% Spektra harmonikų fazių skaičiavimas lyginant su įtampos nuline faze.
for kk=2:11
    for l=1:31
        psi(kk,l)=(atan(imag(DD(kk,l))/real(DD(kk,l))))*(180/pi);
        if real(DD(kk,l))<0
            psi(kk,l)=psi(kk,l)-180;
        end
    end
end
% Spektra santykinių harmonikų amplitudžių skaičiavimas
for v=1:11
    AA1(v,:)=AA(v,:)/AA(2,:);
end
AA2=[NN' AA1 AA AAR AAI];

```


Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```
Rinkmena: „struct_1_1tm.m“, paprogramė-funkcija.
function yd=struct_1_1tm(t,r,w)
global A M Um L0 r11 r12 K Hm m2 Fp
% -----
% Maitinimo įtampa.
u=Um*sin(w*t);
%-----
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkis h=hh, reliatyviųjų švytavimų greitis v=vv.
hh=r(2)-r(1);
vv=r(4)-r(3);
% -----
% Induktyvumų L1(h), L2(h) ir savitarpio induktuvumo M(h) skaičiavimas.
L1=L0+K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
L2=L0-K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
Mh=0;
% -----
% Induktyvumų išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dL1(h)/dh ir dL2(h)/dh.
% Savitarpio induktyvumo išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dM(h)/dh
dL1=(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dL2=-pi/(2*Hm)*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dMh=0;
% -----
% Matricos A koeficientų k1(iL1,h), k2(iL2,h), k3(iL1,iL2,h) kr1(r11,r12) ir kr2(r11,r12) skaičiavimas.
k1=(r(5)*dL1)/(2*m2);
k2=(r(6)*dL2)/(2*m2);
k3=(r(5)*dMh)/m2;
kr1=(r11*r12)/(r11+r12);
kr2=r12/(r11+r12);
% -----
% Matricos A elementų skaičiavimas.
A(4,5)=k1;
A(4,6)=k2+k3;
A(5,5)=-(kr1+dL1*vv)/L1; A(5,6)=dMh*vv/L1;
% -----
% Matricos M elementų skaičiavimas.
M(1:4,1:4)=eye(4);
M(5,5)=L1;
M(5,6)=-Mh;
% -----
% Vektoriaus b elementų skaičiavimas.
b=[0; 0; 0; 0; 0];
b(5,1)=u*kr2;
% Papildomos jėgos įvedimas.
if t>0.3
    b(4,1)=Fp/m2;
else
    b(4,1)=0;
end
% -----
yd=A*r+b;
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

Rinkmena: „struct_12_1tm.m“, paprogramė-funkcija.

```
function yd=struct_12_1tm(t,r,w)
global A Um L0 r11 r12 r21 r22 K Hm m2 Fp
% -----
% Maitinimo įtampa.
u=Um*sin(w*t);
% -----
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkis h=hh, reliatyviųjų švytavimų greitis v=vv.
hh=r(2)-r(1);
vv=r(4)-r(3);
% -----
% Induktyvumų L1(h), L2(h) ir savitarpio induktuvumo M(h) skaičiavimas.
L1=L0+K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
L2=L0-K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
Mh=0;
% -----
% Induktyvumų išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dL1(h)/dh ir dL2(h)/dh.
% Savitarpio induktuvumo išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dM(h)/dh
dL1=(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dL2=-(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dMh=0;
% -----
% Matricos A koeficientų k1(iL1,h), k2(iL2,h), k3(iL1,iL2,h) kr1(r11,r12) ir kr2(r11,r12) skaičiavimas.
k1=(r(5)*dL1)/(2*m2);
k2=(r(6)*dL2)/(2*m2);
k3=(r(5)*dMh)/m2;
kr1=(r11*r12)/(r11+r12);
kr2=(r21*r22)/(r21+r22);
kr3=r12/(r11+r12); kr4=kr3;
% -----
% Matricos A elementų skaičiavimas.
A(4,5)=k1;
A(4,6)=k2+k3;
A(5,5)=-(kr1+dL1*vv); A(5,6)=dMh*vv;
A(6,5)=dMh*vv; A(6,6)=-(kr2+dL2*vv);
% -----
% Matricos M elementų skaičiavimas.
M(1:4,1:4)=eye(4);
M(5,5)=L1;
M(6,6)=L2;
M(5,6)=-Mh; M(6,5)=-Mh;
% -----
% Vektoriaus b elementų skaičiavimas.
b=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
b(5,1)=u*kr3; b(6,1)=u*kr4;
% Papildomos jėgos įvedimas.
if t>0.3
    b(4,1)=Fp/m2;
else
    b(4,1)=0;
end
% -----
yd=inv(M)*(A*r+b);
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

```
Rinkmena: „struct_13_1tm.m“, paprogramė-funkcija.
function yd=struct_13_1tm(t,r,w)
global A Um L0 r11 r12 r22 K Hm m2 Fp
% -----
% Maitinimo įtampa.
u=Um*sin(w*t);
%-----
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkis h=hh, reliatyviųjų švytavimų greitis v=vv.
hh=r(2)-r(1);
vv=r(4)-r(3);
% -----
% Induktyvumų L1(h), L2(h) ir savitarpio induktuvumo M(h) skaičiavimas.
L1=L0+K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
L2=L0-K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
Mh=0;
% -----
% Induktyvumų išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dL1(h)/dh ir dL2(h)/dh.
% Savitarpio induktyvumo išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dM(h)/dh
dL1=(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dL2=-pi/(2*Hm)*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dMh=0;
% -----
% Matricos A koeficientų k1(iL1,h), k2(iL2,h), k3(iL1,iL2,h) kr1(r11,r12) ir kr2(r11,r12) skaičiavimas.
k1=(r(5)*dL1)/(2*m2);
k2=(r(6)*dL2)/(2*m2);
k3=(r(5)*dMh)/m2;
kr1=(r11*r12)/(r11+r12);
kr2=r22;
kr3=r12/(r11+r12);
% kr4=0;
% -----
% Matricos A elementų skaičiavimas.
A(4,5)=k1;
A(4,6)=k2+k3;
A(5,5)=-(kr1+dL1*vv); A(5,6)=dMh*vv;
A(6,5)=dMh*vv; A(6,6)=-(kr2+dL2*vv);
% -----
% Matricos M elementų skaičiavimas.
M(1:4,1:4)=eye(4);
M(5,5)=L1; M(6,6)=L2;
M(5,6)=-Mh; M(6,5)=-Mh;
% -----
% Vektoriaus b elementų skaičiavimas.
b=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
b(5,1)=u*kr3;
% Papildomos jėgos įvedimas.
if t>0.3
    b(4,1)=Fp/m2;
else
    b(4,1)=0;
end
% -----
yd=inv(M)*(A*r+b);
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

Rinkmena: „struct_14_1tm.m“, paprogramė-funkcija.

```
function yd=struct_14_1tm(t,r,w)
global A Um L0 r12 r21 r22 K Hm m2 Fp
% -----
% Maitinimo įtampa.
u=Um*sin(w*t);
% -----
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkis h=hh, reliatyviųjų švytavimų greitis v=vv.
hh=r(2)-r(1);
vv=r(4)-r(3);
% -----
% Induktyvumų L1(h), L2(h) ir savitarpio induktuvumo M(h) skaičiavimas.
L1=L0+K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
L2=L0-K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
Mh=0;
% -----
% Induktyvumų išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dL1(h)/dh ir dL2(h)/dh.
% Savitarpio induktuvumo išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dM(h)/dh
dL1=(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dL2=-(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dMh=0;
% -----
% Matricos A koeficientų k1(iL1,h), k2(iL2,h), k3(iL1,iL2,h) kr1(r11,r12) ir kr2(r11,r12) skaičiavimas.
k1=(r(5)*dL1)/(2*m2);
k2=(r(6)*dL2)/(2*m2);
k3=(r(5)*dMh)/m2;
kr1=r12;
kr2=(r21*r22)/(r21+r22);
kr4=r22/(r21+r22);
% kr3=0;
% -----
% Matricos A elementų skaičiavimas.
A(4,5)=k1;
A(4,6)=k2+k3;
A(5,5)=-(kr1+dL1*vv); A(5,6)=dMh*vv;
A(6,5)=dMh*vv; A(6,6)=-(kr2+dL2*vv);
% -----
% Matricos M elementų skaičiavimas.
M(1:4,1:4)=eye(4);
M(5,5)=L1; M(6,6)=L2;
M(5,6)=-Mh; M(6,5)=-Mh;
% -----
% Vektoriaus b elementų skaičiavimas.
b=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
b(6,1)=u*kr4;
% Papildomos jėgos įvedimas.
if t>0.3
    b(4,1)=Fp/m2;
else
    b(4,1)=0;
end
% -----
yd=inv(M)*(A*r+b);
```

Priedas Nr. 6 (tęsinys)

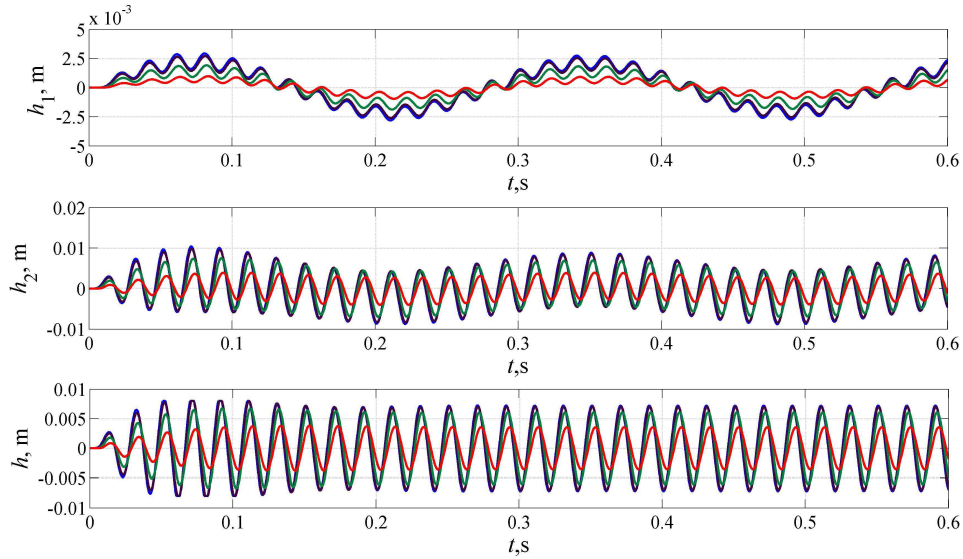
```

Rinkmena: „struct_15_1tm.m“, paprogramė-funkcija.
function yd=struct_15_1tm(t,r,w)
global A Um L0 r12 r22 K Hm m2 Fp
% -----
% Maitinimo įtampa.
% u=Um*sin(w*t);
% -----
% Reliatyviųjų švytavimų poslinkis h=hh, reliatyviųjų švytavimų greitis v=vv.
hh=r(2)-r(1);
vv=r(4)-r(3);
% -----
% Induktyvumų L1(h), L2(h) ir savitarpio induktuvumo M(h) skaičiavimas.
L1=L0+K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
L2=L0-K*sin(((hh/Hm)*pi)/2);
Mh=0;
% -----
% Induktyvumų išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dL1(h)/dh ir dL2(h)/dh.
% Savitarpio induktyvumo išvestinių poslinkio atžvilgiu skaičiavimas dM(h)/dh
dL1=(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dL2=-(pi/(2*Hm))*K*cos(((hh/Hm)*pi)/2);
dMh=0;
% -----
% Matricos A koeficientų k1(iL1,h), k2(iL2,h), k3(iL1,iL2,h) kr1(r11,r12) ir kr2(r11,r12) skaičiavimas.
k1=(r(5)*dL1)/(2*m2);
k2=(r(6)*dL2)/(2*m2);
k3=(r(5)*dMh)/m2;
kr1=r12;
kr2=r22;
% kr3=0; kr4=0;
% -----
% Matricos A elementų skaičiavimas.
A(4,5)=k1;
A(4,6)=k2+k3;
A(5,5)=-(kr1+dL1*vv); A(5,6)=dMh*vv;
A(6,5)=dMh*vv; A(6,6)=-(kr2+dL2*vv);
% -----
% Matricos M elementų skaičiavimas.
M(1:4,1:4)=eye(4);
M(5,5)=L1;
M(6,6)=L2;
M(5,6)=-Mh; M(6,5)=-Mh;
% -----
% Vektoriaus b elementų skaičiavimas.
b=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
% Papildomos jėgos įvedimas.
if t>0.3
    b(4,1)=Fp/m2;
else
    b(4,1)=0;
end
% -----
yd=inv(M)*(A*r+b);

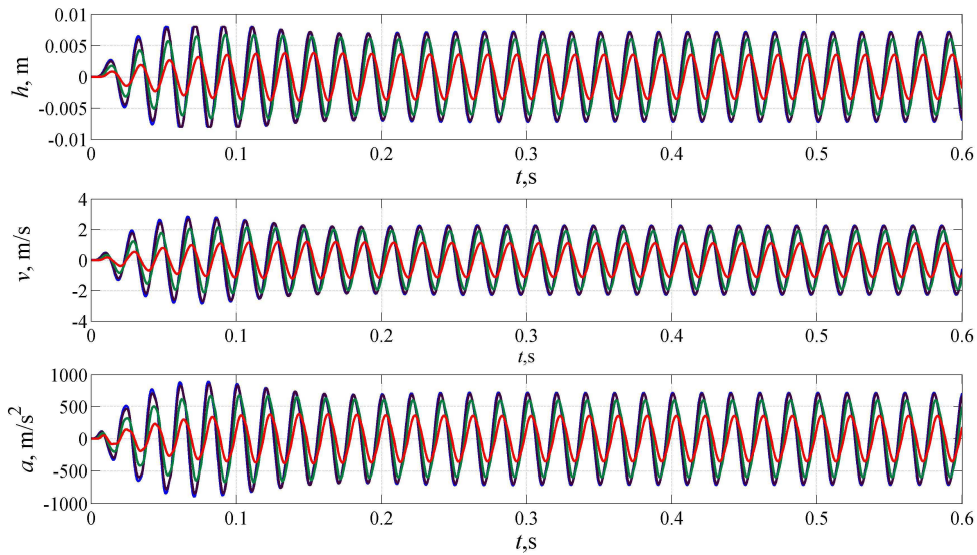
```

ŠJMĮ matematinio modeliavimo rezultatai – pereinamieji vyksmai

Priede pateikiami ŠJMĮ pereinamieji vyksmai kaip papildomas modeliavimo rezultatas, keičiant tiristorių atidarymo kampus.



7.1 pav. Įtaiso švytavimų poslinkių pereinamieji vyksmai $h_1=f(t)$, $h_2=f(t)$ ir $h=f(t)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m); $\alpha_{Tir}=0^\circ$ – mėlyna; $\alpha_{Tir}=30^\circ$ – juoda; $\alpha_{Tir}=60^\circ$ – žalia; $\alpha_{Tir}=90^\circ$ – raudona



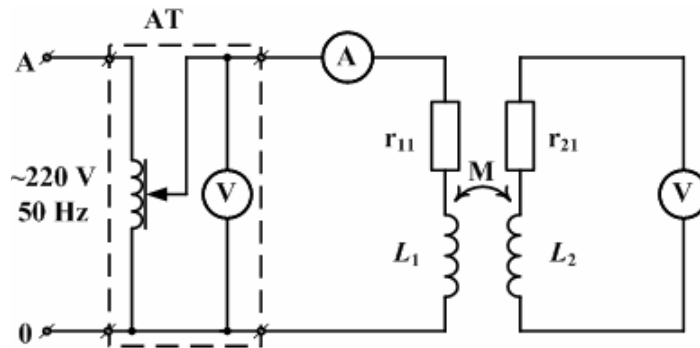
7.2 pav. Įtaiso JD reliatyviųjų švytavimų poslinkio, greičio bei pagreičio pereinamieji vyksmai $h=f(t)$, $v=f(t)$ ir $a=f(t)$, kai $C_{mech1} < C_{mech2}$ (čia $C_{mech1}=2 \cdot 10^3$ N/m, $C_{mech2}=28 \cdot 10^3$ N/m); $\alpha_{Tir}=0^\circ$ – mėlyna; $\alpha_{Tir}=30^\circ$ – juoda; $\alpha_{Tir}=60^\circ$ – žalia; $\alpha_{Tir}=90^\circ$ – raudona

Eksperimentinę dalį papildanti informacija – priemonės, matavimo schemas, tarpiniai matavimų rezultatų grafikai

Eksperimentinio tyrimo metu naudota matavimo įranga:

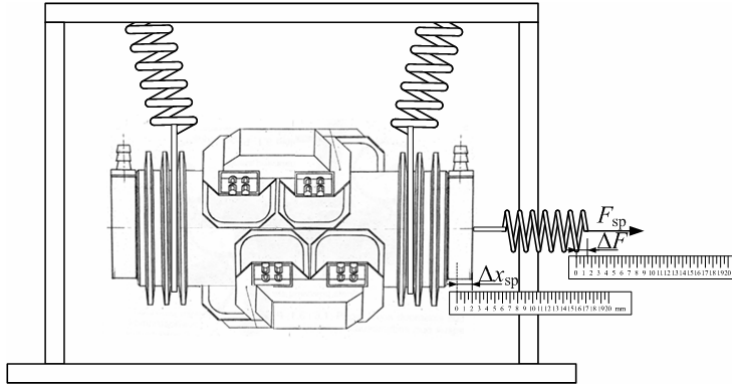
1. Elektrinių dydžių matavimui:
 - a) kintamosios srovės ampermetras – bendrosios srovės efektinei vertei matuoti (M-9803R);
 - b) nuolatinės srovės ampermetras – bendrosios srovės nuolatininei dedamajai matuoti (M-9803R);
 - c) kintamosios srovės vatmetras – elektrinės aktyviosios galios matavimui (galios analizatorius Peaktech 2510);
 - d) multimetras – srovės, įtampos matavimui (stalinis multimetras M-9803R; multimetras Agilent U1242A);
 - e) kintamosios įtampos voltmėtras – maitinančiosios įtampos matavimui (M-9803R);
 - f) oscilografas – srovių oscilogramų sudarymui, ir jų GFT analizei (DSO3062A);
 - g) varžiniai šuntai – srovės signalui paduoti į oscilografą.
2. Neelektrinių dydžių matavimui:
 - a) dinamometras – jėgos matavimui, nustatant parametą C_{mech1} (iki 20 N, spyruoklės, 0,1 N padala);
 - b) elektroninis slankmatis – poslinkiui matuoti, nustatant parametą C_{mech1} (iki 300 mm, tikslumas 0,05 mm);
 - c) stroboskopas – pagalbiniė priemonė švytavimų poslinkio amplitudei matuoti;
 - d) barometras – slėgiui matuoti (iki 8 atm);
 - e) rotamėtras – našumui matuoti (iki 100 l/min);
 - f) mechaninių virpesių matavimo įranga – „statoriaus“ korpuso mechaninių švytavimų poslinkio, greičio ir pagreičio oscilogramoms sudaryti ir gautųjų duomenų GFT analizei (Oros MobiPak OR-36 vibracijų matavimo sistema, naudojanti akselerometrų vibracijų matavimams).

Matavimo schemas.



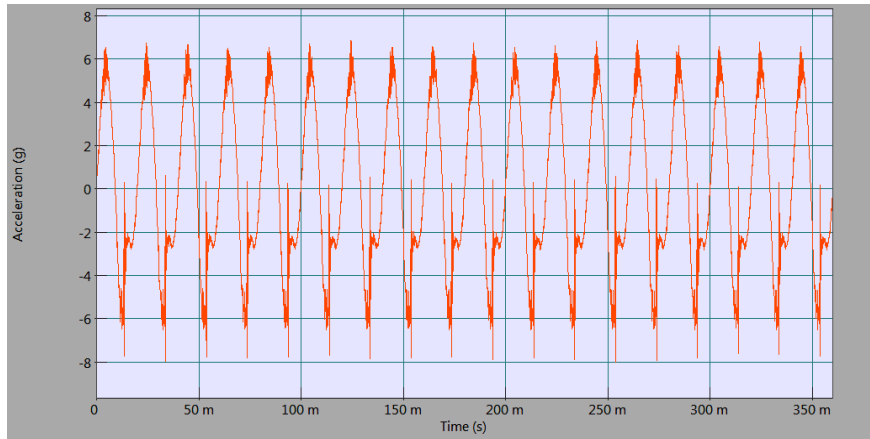
8.1 pav. ŠJMĮ tyrimo schema abipusio induktyvumo nustatymui

Priedas Nr. 8 (tęsinys)

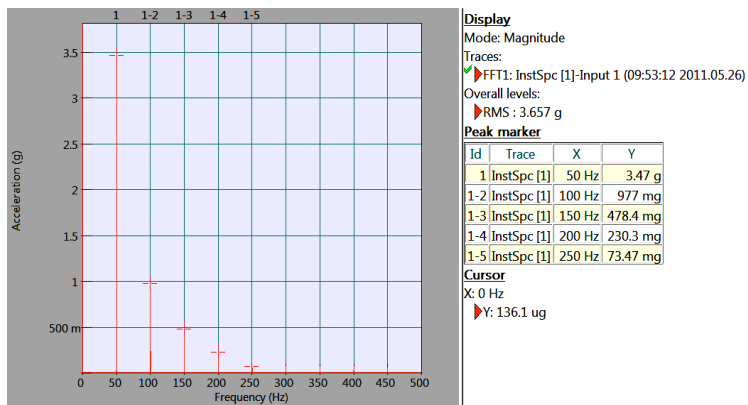


8.2 pav. ŠJMĮ tyrimo schema parametro C_{mech1} nustatymui

Ekperimentiniai rezultatai – pagreičio ir greičio oscilogramos ir GFT.

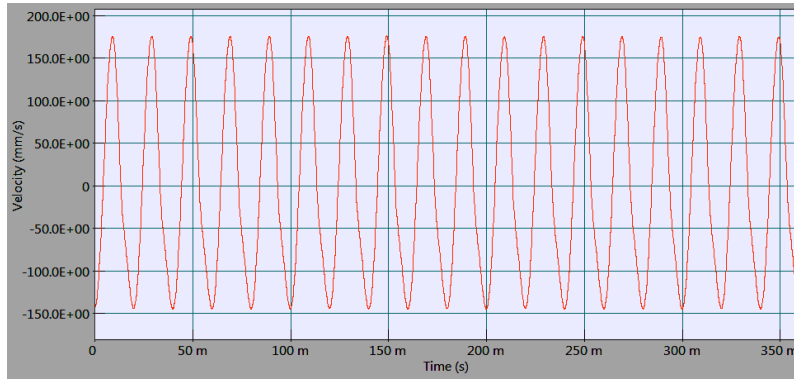


a)

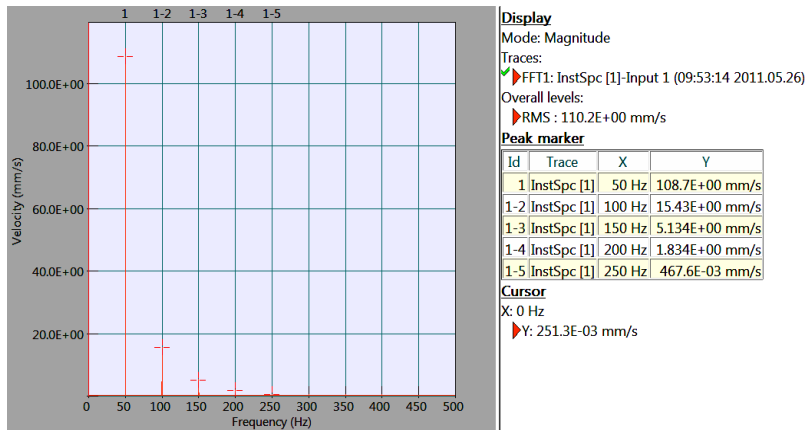


b)

Priedas Nr. 8 (tęsinys)

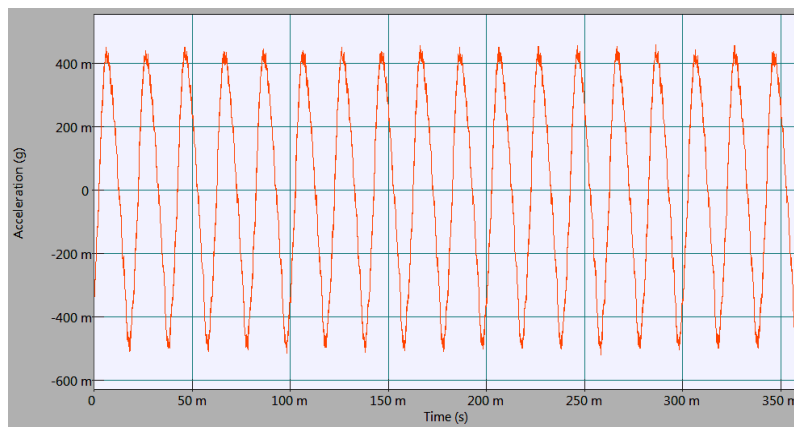


c)



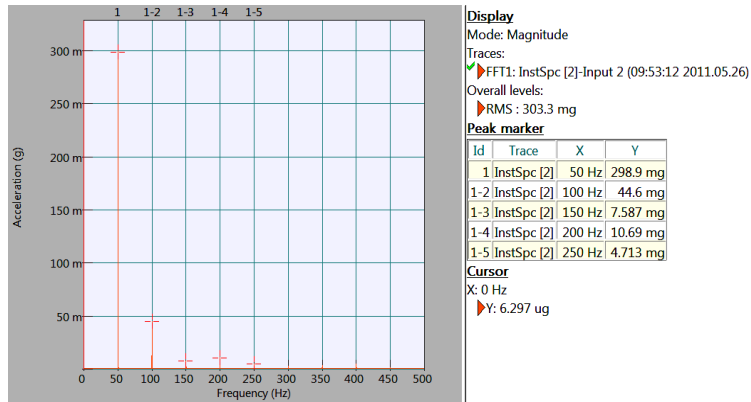
d)

8.3 pav. ŠJMĮ „statoriaus“ pagreičio a) oscilogramos ir b) GFT; greičio c) oscilogramos ir d) GFT (matavimai atlikti su pagreičio jutikliu prijungtu prie ŠJMĮ „statoriaus“)

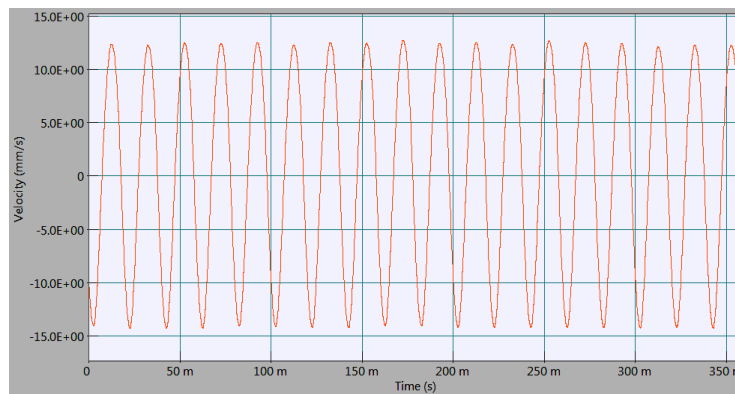


a)

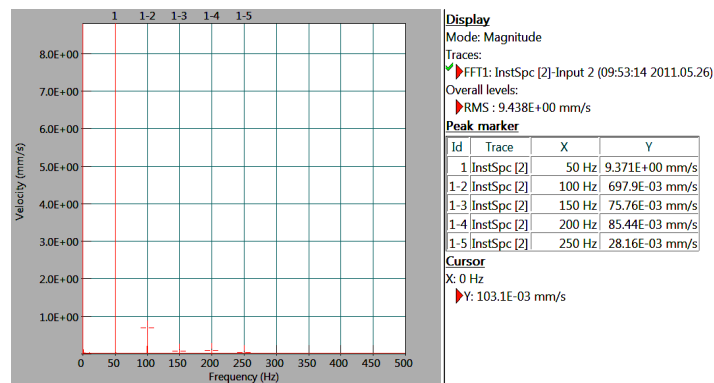
Priedas Nr. 8 (tęsinys)



b)



c)



d)

8.4 pav. ŠJMĮ „statoriaus“: pagreičio a) oscilograma ir b) GFT; greičio c) oscilograma ir d) GFT (matavimai atlikti su pagreičio jutikliu prijungtu prie ŠJMĮ „statoriaus“ tvirtinimo rėmo)

SL344. 2013-04-29, 12 leidyb. apsk. I. Tiražas 16 egz.
Kaina sutartinė. Užsakymas 348.
Išleido leidykla „Technologija“, Studentų g. 54, 51424 Kaunas.
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas.