

Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje

A. Smilgevičius

Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

Naugarduko g. 41, LT-03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2744754, el. p. algirdas.smilgevicius@el.vtu.lt

Ivadas

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo tyrimai Lietuvoje buvo pradėti 1970 m., ikūrus Vilniaus inžineriniame statybos institute TSRS elektrotechnikos pramonės ministerijos Žinybinę tiesiaeigių variklių laboratoriją. Visi darbai buvo vykdomi pagal šios laboratorijos ir Vilniaus inžinerinio statybos instituto mokslo tiriamųjų darbų planus. Pirmieji šio darbo rezultatai buvo pateikti dar 1973 m. elektrotechnikos pramonės ministerijos mokslinės techninės tarybos mažųjų elektros mašinų sekcijos posėdyje. Sekcijos nutarime rašoma: „...pritari tiesiaeigių elektros variklių, skirtų įvairiems mechanizmams ir prietaisams, kūrimui, mokslo tiriamiesiems ir konstravimo darbams, pažymint teigiamą Vilniaus inžinerinio statybos instituto žinybinės laboratorijos vaidmenį šiame darbe“.

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo tematika apgintos 3 daktaro disertacijos [1-3], habilitacinis darbas [4], paskelbta nemaža mokslinių straipsnių Lietuvos ir užsienio mokslo institucijų leidiniuose, mokslinių konferencijų darbuose, gauti 4 išradimų autorystės liudijimai.

Atskiri darbo rezultatai buvo pateikti ir svarstyti Lietuvos, Latvijos, Estijos, Rusijos, Vokietijos, Prancūzijos ir kitų šalių universitetų ir mokslo įstaigų mokslinėse konferencijose ir seminaruose. Tiesiaeigių asinchroninių mašinų variklinio ir stabdymo režimų tyrimai Lietuvoje apibūdinami kaip savarankiška ir pajėgi mokslo mokykla.

Šiame straipsnyje aptariami tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo užbaigtų tiriamųjų ir taikomųjų darbų problematika, teoriniai darbai, taikymo klausimai ir tolesnių tyrimų kryptys.

Elektrinio stabdymo problema

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinis stabdymas sudaro atskirą mokslinę ir techninę problemą.

Tiesiaeigių variklių taikymas technikos įrenginiuose ir mechanizmuose kelia pavarai labai skirtingus ir savitus reikalavimus. Didesniąją dalį sudaro įrenginiai ir mechanizmai, kuriems reikalinga ilgalaikė tiesiaeigio variklio galia. Šiuo atveju svarbią reikšmę turi viso įrenginio energiniai bei ekonominiai rodikliai. Kitais atvejais svarbu gauti maksimalią jėgą, kai antrinis

elementas nejuda arba kai jo judėjimo greitis yra nedidelis. Būdingi darbo režimai – trumpalaikis ir trumpalaikis kartotinis. Šios grupės varikliams energiniai rodikliai mažiau svarbūs, negu tokie santykiniai rodikliai, kaip jėga, tenkanti imamos galios, masės, induktoriaus paviršiaus ploto vienetui. Yra specifinės paskirties mechanizmų ir įrenginių, kuriuos naudojant svarbiausia gauti maksimalią energiją ribotoje kelio atkarpoje arba per tam tikrą laiką. Tokių įrenginių pavyzdžiai: lėktuvų greitinimo, automobilių ir laivų bandymo įrenginiai, įvairios kitos trumpo jėgos poveikio reikalingos pavaros. Joms keliami kiti reikalavimai negu bendrosios paskirties varikliams.

Yra nemažai tiesiaeigių pavarų, kurių judamosios dalies masė yra nedidelė ir stabdant atsiranda labai dideli linijiniai pagreičiai. Šios aplinkybės verčia atsižvelgti į elektromagnetinio lauko dedamąsias ne tik pagal koordinates, bet įvertinti ir jų laikinį kitimą. Todėl statinės stabdymo charakteristikos skiriasi nuo dinaminių.

Taigi sprendžiant naujas technikos problemas, susiduriama su naujais teorijos ir skaičiavimo uždaviniais.

Tiesiaeigių asinchroninių variklių teoriniams tyrimams pradžioje buvo pritaikyti tie patys elektros grandinių teorijos metodai, kaip ir sukiosioms elektros mašinoms. Tačiau dėl elektromagnetinių procesų sudėtingumo ir specifinių reiškinių, būdingų tik tiesiaeigėms asinchroninėms mašinoms, jų teorija greitai nutolo nuo tradicinių elektros mašinų tyrimo metodų ir išsiskyrė į atskirą sritį. Dabar visi teoriniai šių mašinų klausimai nagrinėjami elektromagnetinio lauko teorijos metodais.

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo mokslinę bei techninę problemą sudaro šie pagrindiniai klausimai:

1. Tiesiaeigio asinchroninio variklio matematinio modelio sudarymas stabdymo režimams skaičiuoti.
2. Induktoriaus elektromagnetinio lauko aprašymas ir skaičiavimas.
3. Stabdymo jėgos skaičiavimas įvairiems tiesiaeigio variklio konstrukcijos atvejams ir skirtingoms magnetinio Reynoldso skaičiaus vertėms.
4. Nestacionaraus stabdymo režimo skaičiavimai, atsižvelgiant į pagreičio įtaką variklio charakteristikoms.
5. Įvairių stabdymo būdų efektyvumo nustatymas.
6. Naujų stabdymo būdų ir schemų kūrimas.

Lietuvoje daugiausiai tyrinėti šie tiesiaeigių asinchroninių stabdymo būdai: dinaminis stabdymas, vienfazis stabdymas ir stabdymas pulsuojamąja srove.

Dinaminis stabdymas

Pagrindinės tyrimų prielaidos apibūdinamos taip:

1. Atskaitos sistema yra nejudamame induktoriuje, naudojama stačiakampė koordinatinių sistema.
2. Induktorių magnetolaidžiai yra baigtinio pločio ir be galo ilgi ($\gamma = 0$; $\mu = \infty$), juose nėra griovelių ir plieno nuostolių.
3. Antrinio elemento elektrinis laidis yra γ_2 ir magnetinė skvarba $\mu = \mu_0$, jo plotis yra didesnis už induktorių plotį $2c$. Antrinis elementas užima visą oro tarpą tarp induktorių ir juda koordinatės x kryptimi.
4. Induktoriaus apvija visame induktoriaus ilgyje L sukuria nejudamą erdvėje tūrinio srovės tankio bangą, kuri gali turėti bet kokių aktyviųjų zonų skaičių.
5. Magnetinis laukas oro tarpe yra plokščiai lygiagretus ir už induktoriaus ribų jo nėra.

Dinaminio stabdymo metu pirminį magnetinį lauką kuria nuolatinė srovė, kurios tūrinis tankis per visą induktoriaus ilgį L sudaro nejudamą erdvėje sinusinį magnetinį lauką. Jo analizinę išraišką galima užrašyti įvairiai. Tai priklauso nuo induktorių konstrukcijos ir apvijos tipo.

Realiai pasitaiko ir yra nagrinėti šie atvejai:

1. Viensluoksnė pilnutinio žingsnio induktoriaus apvija:

$$\begin{cases} \underline{j}_{-1}(x) = \underline{J}_{1m} \cdot e^{-i\alpha_1 x}, & \text{kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \\ \underline{j}_{-1}(x) = 0, & \text{kai } |x| \geq \frac{L}{2}; \end{cases} \quad (1)$$

čia $\underline{J}_{1m} = J_m e^{i\psi}$ – nuolatinės srovės tūrinio tankio kompleksinė amplitudė;

ψ – pradinė nejudamo sinusinio magnetinio lauko fazė, kurią sudaro jo ašis su induktoriaus ašimi;

τ – induktoriaus apvijos poliaus žingsnis;

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{\tau}.$$

2. Dvisluoksnė pilnutinio žingsnio induktoriaus apvija:

$$\underline{j}_{-1}(x) = \underline{J}_{1m} \cdot e^{-i\alpha_1 x} + \underline{J}_{1m} \cdot e^{-i\alpha_1 x + \tau}, \text{ kai } |x| < \frac{L}{2}. \quad (2)$$

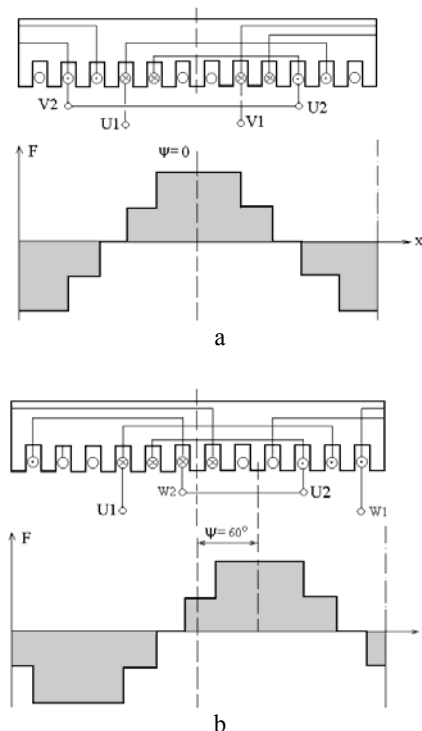
3. Dvisluoksnė sumažinto žingsnio induktoriaus apvija:

$$\begin{cases} \underline{j}_{-1}(x) = \underline{J}_{1m} \cdot e^{-i\alpha_1 x} + \underline{J}_{1m} \cdot e^{-i\alpha_1 x + \beta\tau}, & \text{kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \\ \underline{j}_{-1}(x) = 0, & \text{kai } |x| \geq \frac{L}{2}; \end{cases} \quad (3)$$

čia β – apvijos žingsnio sumažinimo koeficientas; L – induktoriaus ilgis: $L = 2p\tau$, kai aktyviųjų zonų skaičius

lyginis, $L = (2p+1)\tau$, kai aktyviųjų zonų skaičius nelyginis, ir $L = (2p-r)\tau$, kai aktyviųjų zonų skaičius trupmeninis.

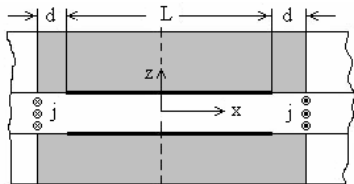
Trifazė viensluoksnė apvija induktoriuje sukuria magnetovara, kuri per visą induktoriaus ilgį sudaro $2p\tau$ aktyviųjų zonų. 1 pav. parodyti du skirtingi maitinimo atvejai: a – kai nuolatinė srovė tiekama U ir V fazinėms apvijoms, ir b – kai ji tiekama U ir W fazinėms apvijoms. Iš magnetovaros pasiskirstymo kreivių matyti, kad pirmuoju atveju kreivės ašis sutampa su induktoriaus ašimi, o antruoju atveju sudaro su ja 30° kampą. Vadinasi, dinaminio stabdymo atveju pirminio magnetinio lauko ašis induktoriaus ašies atžvilgiu gali užimti įvairių padėčių. Tai įvertinama kampu ψ .



1 pav. Induktoriaus apvijų maitinimo būdai ir magnetovaros kreivės: a – kai maitinamos U ir V apvijos; b – kai maitinamos U ir W apvijos

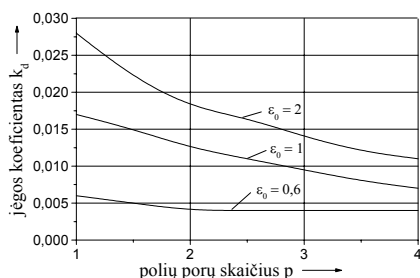
Tiesiaeigių variklių teorijoje principinis klausimas yra kraštų reiškinų įvertinimas. Tradicinės konstrukcijos asinchroninėse mašinose su tuo nesusiduriama, nes rotoriaus srovės teka per trumpai sujungtus žiedus. Tiesiaeigių variklių antriniame elemente srovių pasiskirstymą lemia elektromagnetinis laukas ir antrinės srovės jame teka tam tikrais kontūrais. Tos srovės turi įtakos magnetinio lauko pasiskirstymui ir kuriamai jėgai. Įprastos konstrukcijos asinchroninėse mašinose statoriaus magnetinė grandinė yra uždara, todėl laidumas magnetiniam srautui visur yra vienodas. Tiesiaeigių variklių induktorius yra plokščias, todėl magnetinis srautas už jo ribų tarsi nutrūksta. Praktiškai srautas eina per induktoriaus galus, jungus ir kitas konstrukcines dalis. Tai sukelia papildomus galų ir šonų reiškinus. Visi moksliniai tyrimai tiesiaeigių variklių srityje iš esmės ir skiriasi tų reiškinų įvertinimu.

Kitas klausimas – magnetinių srautų už induktoriaus galų įvertinimas. Dr. R. Juška ištyrė tokių šuntuojančiųjų srautų įtaką variklio kuriamai stabdymo jėgai [1]. Išnagrinėtas atvejis (2 pav.), kai visas magnetinis srautas eina per ekvivalentinį induktoriaus ilgį $L = 2(p\tau + d)$, t. y. per aktyvųjį induktoriaus ilgį $L = 2p\tau$ ir šuntuojančiąsias dalis, kurių ilgis d . Už ekvivalentinio ilgio ribų, t. y. kai $x > p\tau + d$, magnetinio lauko nėra.



2 pav. Tiesiaegio variklio modelis su baigtinio ilgio aktyviaja zona L ir šuntuojančiosiomis dalimis d

Apskaičiuota jėgos koeficiento dedamoji k_d , susijusi su šuntuojančiąja induktoriaus dalimi d , esant įvairiam polių porų skaičiui ir magnetiniam Reynoldso skaičiui ϵ_0 (3 pav.).



3 pav. Jėgos koeficiento dedamosios k_d priklausomybė nuo polių porų ir magnetinio Reynoldso skaičiaus

Jėgos koeficiento k_d analizė (3 pav.) rodo, kad šuntuojančiųjų dalių induktorių galuose įtaka stabdymo jėgai yra ne didesnė kaip 3 %, todėl galima naudoti paprastesnį modelį, kurio $d = 0$.

Visi tiesiausių asinchroninių variklių stabdymo režimo skaičiavimai yra pagrįsti elektromagnetinio lauko lygčių sprendimu. Bėgamojo lauko lygčių sprendimo būdas priklauso nuo pasirinktos problemos sudėtingumo ir ribinių sąlygų.

Galimi šie pagrindiniai tiesiausių asinchroninių variklių teorinio tyrimo metodai: tiesioginis lauko lygčių sprendimas, spektrinis metodas, skaitmeniniai metodai, pvz., baigtinių elementų metodas, kiti metodai, pvz., Furjė eilutės, srovinės apkrovos idealizacija Dirako delta funkcija arba diskrečiosiomis atkarpomis.

Visuose darbuose [1-4] taikytas spektrinis metodas.

Stacionarų dinaminio stabdymo režimą, esant lyginiam aktyviųjų zonų skaičiui, nagrinėjo dr. R. Juška [1], o esant nelyginiam aktyviųjų zonų skaičiui, – dr. J. Bubulis [2]. Gauta tokia elektromagnetinės stabdymo jėgos išraiška:

$$F = -k_F \cdot \frac{1}{1 + \epsilon^2} \cdot F_0; \quad (4)$$

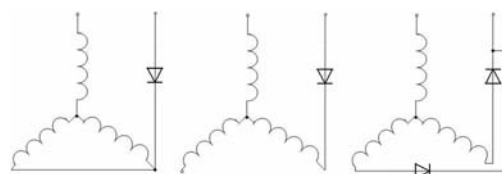
čia k_F – jėgos koeficientas; ϵ – magnetinis Reynoldso skaičius; F_0 – be galo plataus ir be galo ilgo variklio stabdymo jėga.

Gautos jėgos koeficientų išraiškos lyginiam ir nelyginiam aktyviųjų zonų skaičiui leidžia apskaičiuoti stabdymo jėgą ir jos priklausomybę nuo antrinio elemento judėjimo greičio abiem atvejais.

Nestacionariojo dinaminio stabdymo režimą, kai aktyviųjų zonų skaičius lyginis, nagrinėjo doc. dr. B. Karaliūnas [3]. Darbo esmė – elektromagnetinio lauko, stabdymo jėgos ir pereinamojo proceso rodiklių skaičiavimai, atsižvelgiant į pagreičio įtaką dinaminiam procesui. Vėlesnėse publikacijose paskelbė jis medžiagos apie spektrines charakteristikas ir kitus klausimus.

Stabdymas pulsuojamąja srove

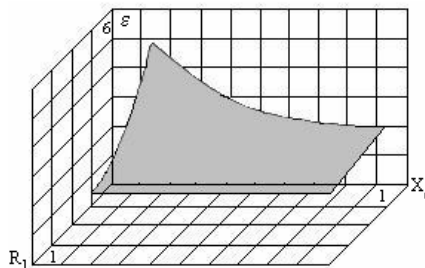
Stabdymas pulsuojamąja srove gaunamas naudojant puslaidininkinius ventilius ir įvairias induktorių apvijų maitinimo schemas. Priklausomai nuo ventilių skaičiaus stabdymo režimui gauti gali būti naudojama viena, dvi arba visos trys fazinės apvijos (4 pav.).



4 pav. Ventilinės stabdymo schemas

Stabdymo esmė – variklyje sukuriama pulsuojamasis magnetinis laukas, turintis kintamąją ir nuolatinę dedamąsias. Kiekviena iš dedamųjų, sąveikaudama su antrinio elemento srovėmis, kuria stabdymo jėgą, kuri ir yra šio stabdymo būdo tyrimų objektas.

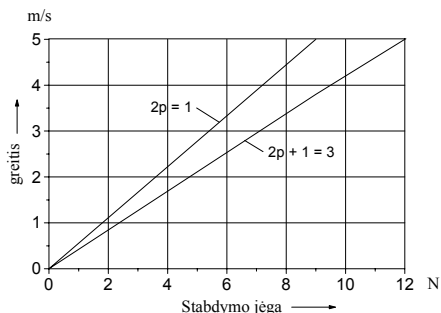
Dr. J. Bubulio darbe [2] apskaičiuota ir pateikta parametų sritis (5 pav.), kurioje susidaro stabdymo jėgos dedamoji, susijusi su kintamąja pulsuojamosios srovės dedamoja. Už tos srities ribų kintamoji srovės dedamoji stabdymo jėgos nesukuria.



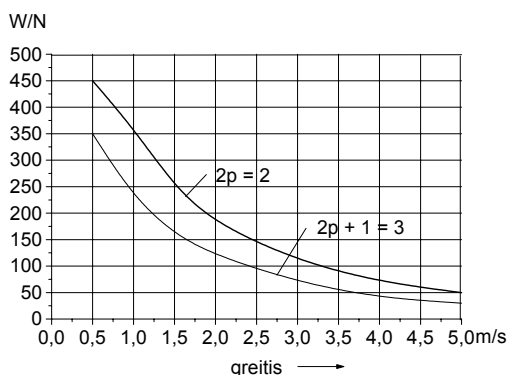
5 pav. Parametų sritis, kurioje gaunamas efektyvus vienfazis stabdymas

Nuolatinė srovės dedamoji kuria dinaminio stabdymo jėgą. Skirtingai nuo ankstesnių darbų, skaičiuojamas dinaminis stabdymas, kai aktyviųjų zonų skaičius yra nelyginis.

Nustatyta, kad stabdymas pulsuojamąja srove yra efektyvesnis, kai aktyviųjų zonų skaičius yra nelyginis. Mechaninės charakteristikos ir santykinės stabdymui naudojamos galios palyginimas pagal [3] ir [4] pateikiamas 6 ir 7 pav.



6 pav. Stabdymo pulsuojamąja srove charakteristikos



7 pav. Santykinės galios sąnaudos stabdymo jėgos vienetai

Kondensatorinis stabdymas

Susižadinimo reiškiniai būdingi įvairiems technikos įrenginiams bei elektros mašinoms. Vienais atvejais sudaromos kuo palankesnės susižadinimo sąlygos, pavyzdžiui, lygiagrečiojo žadinimo generatoriuose, kitais atvejais šis vyksmas slopinamas, kad nesukeltų nepageidaujimų reiškinų.

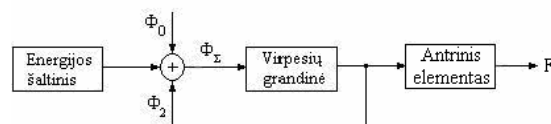
Asinchroninių mašinų susižadinimas yra žinomas ir tyrinėtas reiškinys, kai atsirado mažos galios asinchroninių generatorių vandens bei vėjo jėgainėms sukūrimo problema. Šis reiškinys gali būti naudojamas asinchroninių variklių stabdymui.

Fizikinių susižadinimo reiškinų asinchroninėse mašinose aiškinimas nėra vienodas. Dažniausiai jis siejamas su liekamuoju įmagnetėjimu, tačiau pasitaiko teiginių ir publikacijų, kuriuose aiškinama, kad stabdymo jėgą kuria kondensatorių iškrovos srovė. Tai verčia grįžti prie šio klausimo ir išsiaiškinti susižadinimo reiškinį bei sąlygas, kuriomis jis gali vykti.

Asinchroninio variklio susižadinimas priklauso nuo ekvivalentinės schemos parametrų ir kondensatoriaus talpos C reaktyviosios varžos. Tokią elektromechaninę sistemą veikia išorinė mechaninė jėga arba elektromagnetinė galia. Esant tam tikroms minėtų elektrinių parametrų vėrtėms, sistema gali susižadinti tik esant tam tikram judesio greičiui. Sistemoje susižadinimas

ir virpesių pastovumas yra susiję su vidiniu grįžtamuoju ryšiu ir judesio greičiu. Jeigu tokios sistemos elementai yra pakankamai geros kokybės, tai gaunami silpstantieji savojo žadinimo virpesiai, o esant tam tikroms sąlygoms susidaro elektromechaninis rezonansas. Tokio rezonanso susidarymo reiškiniai kol kas nėra ištirti.

Nagrinėjamoje sistemoje galima gauti stabilų režimą ir elektromagnetinę (stabdymo) jėgą, jeigu kiekvieno švytvimų takto metu nuostolių energija bus papildoma iš išorinio šaltinio. Tai būdinga autovirpesių sistema, kurią sudaro asinchroninė mašina ir kondensatorius. Jos struktūra pateikta 8 pav.



8 pav. Autovirpesių sistema asinchroninė mašina – kondensatorius

Čia yra šios autovirpesių sistemos grandys: virpesių grandinė – variklio ekvivalentinės varžos ir kondensatoriaus reaktyvioji varža; magnetinio srauto grįžtamasis ryšys – elektromagnetinis ryšys tarp statoriaus ir rotoriaus, kurį sudaro antrinis žadinimo srautas; energijos šaltinis – kitas variklis arba judžių sistemų dalių inercija.

Jeigu variklio antrinio elemento judėjimo greitis yra didesnis už kontūro rezonansinį dažnį ω , mašina veikia generatoriniu režimu, kurio slydimas s yra neigiamas.

Kai rotoriaus slydimas yra neigiamas ir mažas (tai atitinka didelį judėjimo greitį), statoriaus apvija teka nedidelė srovė ir kuria srautą Φ_1 . Kadangi antrinis elementas juda greičiau už magnetinį lauką, tai elementariuosiuose jo laidininkuose, kurie yra 90 el. laipsnių nuo nagrinėjamos statoriaus fazės, indukuojama elektrovara E_2 . Veikiant šiai elektrovarai atsiranda srovė I_2 ir rotorius srautas Φ_2 . Šis srautas kerta statoriaus apvija ir indukuoja joje elektrovarą E_1 . Jai veikiant statoriuje atsiranda srovė. Kadangi mažų slydimų srityje rotoriaus srovių dažnis yra labai mažas (vos keli hercai), tai induktyvioji varža bus labai maža ir E_2 bei I_2 fazoriai sutaps. Todėl srautų Φ_1 ir Φ_2 laikinės fazės yra vienodos, tačiau erdvinės padėtys skiriasi 90 el. laipsnių. Statoriaus srovių fazės taip pat yra vienodos.

Tai reiškia, kad tuo momentu, kai statoriuje sukaupiama didžiausia energija, tas pats statorius papildomai gauna energijos iš antrinio elemento pusės. Tai atitinka virpesių palaikymo režimą.

Tais laiko momentais, kai akimirkinė antrinio elemento srovė lygi nuliui, nutrūksta energijos tiekimas iš rotoriaus ir virpesiai nutrūksta. Kitų periodų metu padėtis kartojasi ir taip gaunamas stacionarus susižadinimo procesas.

Esant didesnei kondensatoriaus talpai, minimalus greitis, kuriam esant mašina susižadina, mažės. Esant tam tikrai kondensatoriaus talpai, kuri vadinama kritine, susižadinimas pasibaigia. Tai susižadinimo pabaigos greitis.

Tyrimai rodo, kad elektromechaninė sistema, kurią sudaro asinchroninis variklis ir kondensatorių baterija,

pagal struktūrą, veikimo principą ir savybes generatorinio režimo atveju atitinka tipinę autovirpesių sistemą, o stabdymo atveju slopstančiųjų virpesių sistemą. Susižadinimo procesas yra ekvivalentiškas virpesių susidarymui rezonansinėje grandinėje, kurios virpesių pastovumas yra susijęs su vidiniu srauto grįžtamuoju ryšiu ir su antrinio elemento judesio greičiu. Kai tokioje sistemoje susidaro elektromechaninio rezonanso sąlygos, gaunamas stabilus asinchroninės mašinos generatorinis arba stabdomasis režimas.

Kondensatoriaus tiekiamą srovę yra grynai reaktyvaus pobūdžio, todėl stabdymo jėgos sukurti negali. Ji dalyvauja tik energijos mainuose ir palaiko srautą susižadinimo metu.

Apibendrinimas

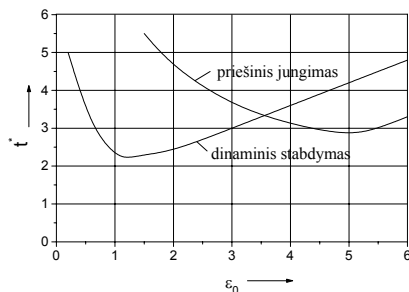
Lietuvoje yra atlikti platus tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo moksliniai tyrimai [1-4], sukurti nauji stabdymo charakteristikų ir rodiklių skaičiavimo metodai, sukurtos ir įdiegtos naujos tiesiaeigės pavaros. Taip susidarė nauja tiesiaeigių variklių stabdymo mokslinė kryptis, kurioje moksliniai tyrimai tęsiasi ir dabar.

Iki šiol užbaigtų mokslinių tyrimų komplekso rezultatai apibūdinami taip:

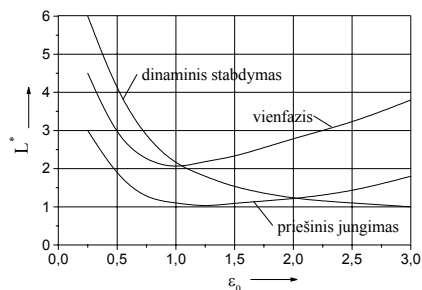
1. Sukurta apibendrinta tiesiaeigių asinchroninių variklių dinaminio stabdymo teorija nusistovėjusiems ir nestacionariems režimams [4] skaičiuoti. Atskirus jos atvejus, kai aktyviųjų zonų skaičius lyginis, nagrinėjo dr. R. Juška [1] ir doc. dr. B. Karaliūnas [3], o kai nelyginis, – dr. J. Bubulis [2].
2. Teoriškai išnagrinėta ir eksperimentiškai patikrinta tiesiaeigio asinchroninio variklio magnetinio lauko struktūra ir jos priklausomybė nuo variklio parametrų.
3. Pirminio magnetinio lauko kreivės forma priklauso nuo aktyviųjų zonų skaičiaus ir apvijų maitinimo būdo. Dinaminiam stabdymui palankiausias magnetinis laukas susidaro esant nelyginiam aktyviųjų zonų skaičiui, kai stabdymo srovė tiekiamas induktoriaus kraštuose esančioms apvijoms.
4. Magnetinį lauką iškraipo galų ir šonų reiškiniai bei jų tarpusavio sąveika. Tiesiaeigėms asinchroninėms mašinoms, kurių oro tarpas, linijinis greitis ir magnetinis Reynoldso skaičius yra mažas, matematinis modelis, įvertinantis tik normalinę dedamąją magnetinio lauko oro tarpe, duoda inžinerinei praktikai pakankamo tikslumo rezultatus.
5. Baigtinis induktoriaus magnetolaidžio ilgis sukelia papildomą magnetinio lauko nuolatinę dedamąją. Ji sudaro ne daugiau kaip 3% visos stabdymo jėgos, todėl galima naudoti matematinį induktoriaus modelį, kuriame magnetolaidžiai yra be galo ilgi, o aktyvioji zona baigtinio ilgio.
6. Gautos analizinės išraiškos dinaminio stabdymo mechaniniai charakteristikai skaičiuoti. Išnagrinėta santykinų parametrų įtaka stabdymo charakteristikoms: stabdymo charakteristikos lyginio ir nelyginio aktyviųjų zonų skaičiaus atvejais savo forma nesiskiria, tačiau nelyginio aktyviųjų zonų skaičiaus atveju santykinė stabdymo jėga gali būti iki

dvejų kartų didesnė negu esant lyginiam aktyviųjų zonų skaičiui.

7. Stabdymo jėga, susijusi su šonų reiškiniais, priklauso nuo santykinų tiesiaeigio variklio parametrų: induktoriaus ir antrinio elemento pločių santykio. Nustatyta, kad antrinis elementas turi būti 1,5 – 1,6 karto platesnis už induktorių. To pločio didinimas yra ekvivalentiškas antrinio elemento aktyviosios varžos mažinimui.
8. Nustatyti optimalūs tiesiaeigių asinchroninių variklių santykiniai parametrai, kuriems esant reikia taikyti konkretų stabdymo būdą (9 ir 10 pav.). Nustatyta, kad dinaminio stabdymo trukmė ir kelias yra mažesni negu priešinio jungimo, kai $\epsilon_0 < 3$.



9 pav. Santykinės stabdymo trukmės priklausomybė nuo ϵ_0



10 pav. Santykinio stabdymo kelio priklausomybė nuo ϵ_0

9. Sukurtos naujos tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo schemas ir būdai, patvirtinti tuometiniais išradimais [5-8].
10. Tolesni tiesiaeigių variklių tyrimai turėtų būti orientuoti į elektromechaninių sistemų su tiesiaeigiais varikliais dinamikos, valdymo ir optimizavimo klausimus.

Literatūra

1. Юшка Р.-А. Исследование линейного асинхронного двигателя в режиме динамического торможения: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Каунасский политехн. и-т им. Антанаса Снечкуса. – Каунас, 1975. – 156 с.
2. Бубулис И. И. Торможение линейного асинхронного двигателя пульсирующим током: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Ленинградский и-т авиационного приборостроения. – Ленинград, 1981. – 184 с.
3. Каралиюнас Б. С. Нестационарный режим динамического торможения линейного асинхронного двигателя: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Ленинградский и-т авиационного приборостроения. – Ленинград, 1983. – 235 с.

4. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymas. – Vilnius: Technika, 1993. – 56 p.
5. **А. с. СССР 725176.** Способ торможения двустороннего линейного электродвигателя / Смилгявичюс А.Ю., Бубулис И.И., Каралюнас Б.С., Бюл. № 12, 1980, 3 с.
6. **А. с. СССР 773878.** Устройство для торможения индукционного электродвигателя с разомкнутым магнитопроводом / Смилгявичюс А.Ю., Каралюнас Б.С., Бюл. № 39, 1980, –3 с.
7. **А. с. СССР 858185.** Устройство для торможения линейного индукционного электродвигателя / Смилгявичюс А.Ю., Бубулис И.И., Каралюнас Б.С., Бюл. № 31, 1981, –3 с.
8. **А. с. СССР 928552.** Способ торможения линейно-го электродвигателя / Смилгявичюс А.Ю., Каралюнас Б.С., Бюл. № 18, 1982.

Pateikta spaudai 2004-08-30

A. Smilgevičius. Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(57). – P. 42–47.

Straipsnis skiriamas tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo tyrimų Lietuvoje 30-mečiui. Aptariami per 30 metų užbaigtų mokslo tiriamųjų ir taikomųjų darbų rezultatai: problematika, teoriniai darbai, taikymo klausimai ir tolesnių tyrimų kryptys. Sistemingi tyrimai buvo pradėti Žinybinėje tiesiaeigių variklių laboratorijoje, kuri veikė Vilniaus inžineriniame statybos institute 1970 – 1976 m. Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo teorijos ir praktinio taikymo klausimais Lietuvoje parengtos 3 daktaro disertacijos ir 1 habilitacinis darbas. Šių mokslo darbų rezultatai paskelbti daugelyje mokslinių žurnalų, pateikti ir svarstyti įvairių Europos ir Azijos šalių mokslinėse konferencijose. Pagrindiniai tyrimų rezultatai: išnagrinėti įvairūs tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo režimai, atsižvelgiant į baigtinius induktorių ir antrinio elemento matmenis, pagreičio įtaką dinaminiam procesams, sukurtos mažo greičio tiesiaeigių asinchroninių variklių statinių ir dinaminių stabdymo charakteristikų skaičiavimo metodikos, nauji stabdymo būdai ir įtaisai, patvirtinti tuometiniais išradimais. Il. 10, bibl. 8 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

A. Smilgevičius. Investigation into Electric Braking of Linear Induction Motors in Lithuania // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 1(57). – P. 42–47.

A paper is devoted to the 30-th anniversary of investigation into electric braking of linear induction motors in Lithuania. There are discussed results of carried out research and engineering works: problems, theoretical research as well as questions of application and directions of further investigations. Scientific research was began in the Departmental laboratory of linear induction motors that was functioned in the Vilnius Civil Engineering Institute during 1970-1976 years. There were made 3 PhD dissertations and 1 habilitation work in the field of theory and application of linear induction motors braking. Results of these research works were published in many scientific magazines, presented and discussed in various scientific conferences of Europe and Asia. The main obtained results are: designed and investigated new models of linear induction motors with consideration of limited dimensions of inductor and secondary parts, there were developed methods to investigate and calculate static and dynamic characteristics of low speed linear induction motors, considering influence of acceleration into dynamic process, developed new methods and devices of braking of linear induction motors. They were certificated by former inventions. Ill. 10, bibl. 8 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

A. Смилгявичюс. Исследования торможения линейных асинхронных электродвигателей в Литве // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – № 1(57). – С. 42–47.

Статья посвящена 30-летию исследований линейных двигателей в Литве. Обсуждаются основные результаты исследовательских и прикладных работ по электрическому торможению за 30 лет: проблематика, теоретические работы, вопросы практического применения и направления дальнейших исследований. Исследования были начаты в Отраслевой лаборатории линейных двигателей, которая действовала в 1970-1976 г. в Вильнюсском инженерно-строительном институте. Основное направление ее работы были линейные асинхронные двигатели. По вопросам теории электрического торможения и практического применения линейных асинхронных двигателей в Литве подготовлены и защищены 3 кандидатские и 1 докторская диссертация. Результаты исследований опубликованы во многих научных журналах, представлены и обсуждались в различных научных конференциях стран Европы и Азии. Основные результаты исследований: исследованы различные режимы электрического торможения линейных асинхронных двигателей, в которых учтены конечные размеры индукторов, вторичного элемента, влияние ускорения на динамические процессы, разработаны методики расчета статических и динамических характеристик, новые устройства и способы торможения линейных двигателей, на которые были получены тогдашние авторские свидетельства. Ил. 10, библи. 8 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).