

## Mažų greičių tiesiaiegių asinchroninių elektros pavarų charakteristikų aibės tyrimas

R. Rinkevičienė, A.J. Poška, O. Darulienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Naugarduko g. 41, LT-03227, Vilnius, tel. 370 5 2744759,  
el. paštas algimantas.poska@el.vtu.lt

### Įvadas

Tiesiaiegių asinchroninių elektros pavarų taikymo sritys nuolat plečiasi [1-3]. Tai įvairių pramonės šakų ir negamybinės sferos mechanizmų bei elektrinio transporto reguliuojamo ir nereguliuojamo greičio tiesiaieigės elektros pavaros (TEP). Pagal Yamamura kriterijų [4] dauguma šių TEP yra mažų greičių. Tačiau mažų greičių tiesiaiegiai asinchroniniai varikliai (TAV) ir TEP su šiais TAV didesnėmis serijomis negaminami, nes pavarų su TAV mechaninė ir darbo charakteristikos dažnai būna prastesnės už analogiškas rotacinių asinchroninių pavarų charakteristikas. Todėl netikslinga kurti universalias pavaras su TAV. Tačiau specifinės TAV savybės (galimybė TAV antrinį elementą sutapatinti su mechanizmo srovei laidžiomis dalimis, jį katapultuoti; tiesioginis elektros magnetinis poveikis vykdymo elementui; labai didelė veikimo sparta ir kt.) sudaro galimybes TAV pagrindu kurti įvairias efektyvias automatinio valdymo ir automatinės apsaugos sistemas. Todėl reikia sudaryti tokią TAV ir TEP parametrų ir charakteristikų analizės metodiką, kuri leistų kiekvienu konkrečiu atveju atsakyti į klausimą, ar TAV (TEP) charakteristikų parametrai (kritinis greitis, jėga, kritinis slydimas, dinaminė charakteristikų minimumai, maksimumai, pereinamojo proceso trukmė ir kt.) tenkina mechanizmui keliamus reikalavimus, taigi ar tikslinga šiam mechanizmui taikyti tiesiaieigę, o ne sukamojo judesio asinchroninę elektros pavarą.

Todėl projektuotojai privalo turėti įvairius TAV (įvairias TEP) apibūdinančių charakteristikų aibes. Kadangi TAV (TEP) aprašomi sudėtingomis matematinėmis išraiškomis, jų charakteristikų aibėms apskaičiuoti sugaištama daug kompiuterio laiko. Skaičiavimams paspartinti patogiu taikyti supaprastintas (aproksimuojančias) išraiškas.

TAV darbo ir mechaninės charakteristikas patogiu skaičiuoti pagal nuosekliają ekvivalentinę schemą, kurioje nuosekliai sujungtos pirminės grandinės aktyvioji  $R_1$ , sklaidos induktyvioji  $X_{\sigma 1}$ , pirminės grandinės pagrindinė induktyvioji  $X_{p1}$  ir aktyvioji  $R_2$  bei induktyvioji  $X_2$  varžos, išreiškiančios TAV antrinio elemento (antrinės grandinės) įtaką pirminei grandinei. Dauguma šių varžų apskaičiuojamos pagal klasikinę elektros mašinų teoriją. Tačiau varžos  $R_2$  ir  $X_2$  skaičiuojamos pagal sudėtingas magnetohidrodinaminė ir tiesiaiegių elektros mašinų

teorijos išraiškas. Siekiant supaprastinti šių varžų skaičiavimą ir taip paspartinti TAV (TEP) charakteristikų aibių skaičiavimus, naudotinos toliau pateikiamos aproksimuojančiosios išraiškos.

### TAV charakteristikų aibių paspartinto skaičiavimo metodika

TAV, kurio antrinio elemento plotis lygus induktoriaus pločiui, atstojamosios schemos varžos  $R_2$  ir  $X_2$  apskaičiuojamos šitaip:

$$R_2 = \varepsilon k_a X_{p1}, \quad (1)$$

$$X_2 = \varepsilon k_r X_{p1}; \quad (2)$$

čia  $\varepsilon = \varepsilon_0 s$  - magnetinis Reinoldso skaičius;  $\varepsilon_0$  - magnetinis Reinoldso skaičius, kai slydimas  $s=1$ .

Šiuo atveju  $k_a$  ir  $k_r$  skaičiavimams paspartinti galima naudoti tokias supaprastintas išraiškas [6]:

$$k_a \cong \frac{a_1 + b_1 \varepsilon_0 s}{1 + \varepsilon_0^2 s^2}; \quad (3)$$

$$k_r \cong -\varepsilon_0 s \frac{a_2 + b_2 \varepsilon_0 s}{1 + \varepsilon_0^2 s^2}; \quad (4)$$

čia  $a_1, b_1, a_2, b_2$  - aproksimacijos koeficientai [6].

Cilindrinės konstrukcijos TAV (CTAV) šie koeficientai apskaičiuojami pagal žinomas išraiškas, atitinkančias (3), (4), kai  $a_1 = a_2 = 1$ , o  $b_1 = b_2 = 0$ .

Tuo atveju, kai plokščios konstrukcijos TAV antrinis elementas yra platesnis už induktorių, koeficientams  $K_A = \varepsilon k_a$  ir  $K_R = -\varepsilon k_r$  apskaičiuoti taikytinos tokios išraiškos:

$$K_A = \frac{2 \sum_{i=0}^m (-1)^m \alpha_i \left(\frac{a}{\tau}\right)^m \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^n \beta_i \left(\frac{a}{\tau}\right)^n}{\frac{1}{\varepsilon_0^2} \left[ \sum_{i=0}^n (-1)^n \beta_i \left(\frac{a}{\tau}\right)^n \right]^2 + s^2} s; \quad (5)$$

$$K_R = \frac{2 \sum_{i=0}^m (-1)^m \alpha_i \left(\frac{a}{\tau}\right)^m}{\frac{1}{\varepsilon_0^2} \left[ \sum_{i=0}^n (-1)^n \beta_i \left(\frac{a}{\tau}\right)^n \right]^2 + s^2} s^2; \quad (6)$$

čia  $\alpha_i = f\left(\frac{t}{\tau}\right)$  ir  $\beta_i = \varphi\left(\frac{t}{\tau}\right)$  – aproksimacijos koeficientai;

$2t$  – TAV antrinio elemento plotis;  $\tau$  – TAV poliaus žingsnis;  $2a$  – induktoriaus plotis.

Koeficientų  $a_i$  ir  $b_i$  vertės, esant skirtingoms  $t/\tau$  vertėms, pateiktos 1 ir 2 lentelėse.

**1 lentelė.** Koeficientų  $a_i$  vertės, esant skirtingoms  $t/\tau$  vertėms

$a_i$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$t/\tau = 0,5$	0,49 5	0,012	0,0002	0,533	0	0
$t/\tau = 1,0$	0,58 5	0,833	3,050	5,583	5,067	1,853
$t/\tau = 1,5$	0,52 2	0,137	0,190	0,084	0	0
$t/\tau = 2,0$	0,51 8	0,135	0,262	0,259	0,131	0,027
$t/\tau = 2,5$	0,51 9	0,130	0,227	0,191	0,077	0,001
$t/\tau = 3,0$	0,51 6	0,108	0,168	0,120	0,041	0,005

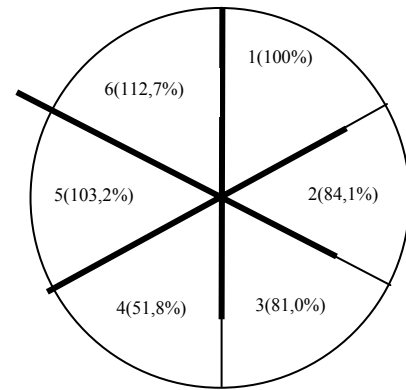
**2 lentelė.** Koeficientų  $b_i$  vertės, esant skirtingoms  $t/\tau$  vertėms

$b_i$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$t/\tau = 1,0$	4,588	19,39	49,01	62,72	38,98	9,076
$t/\tau = 1,5$	5,766	34,52	122,61	238,5	262,4	162,2
$t/\tau = 2,0$	3,646	10,10	17,20	15,04	6,45	1,07
$t/\tau = 2,5$	3,395	7,997	11,352	8,097	2,82	0,38
$t/\tau = 3,0$	3,179	6,40	7,62	4,45	1,253	0,134

### Diskretinė cilindrinės konstrukcijos TAV (CTAV) paleidimo jėgų aibė

CTAV naudojami mechanizmuose, veikiančiuose trumpalaikiu režimu, pavyzdžiui, vienvariklėse aukštosios įtampos jungtuvų pavarose, taip pat pafaziui valdomų jungtuvų pavarose. Kadangi jungtuvų išjungimo spyruoklės, kurias įveržia CTAV, kuria nevienodas statinio pasipriešinimo jėgas, siekiant suvienodinti pafaziui valdomo jungtuvo atskirų fazių įjungimo laikus, reikia parinkti CTAV paleidimo jėgą, garantuojančią reikiamą pavaros suveikimo laiką.

Atsižvelgiant į trumpalaikį įjungimo režimą, CTAV paleidimo jėgą (1 pav., 1 linija) galima keisti šitaip [6]: 1) pakeičiant CTAV apvijų vienos ritės jungimo poliškumą (2 linija); 2) pakeičiant visų trijų fazių kraštinių ričių jungimo poliškumus, t.y. sukryžiuojant šių ričių galus (3 linija); 3) sukryžiuojant vienoje fazėje dviejų, o kitose fazėse vienos ritės galus ir t.t. (4 linija); 4) trumpai sujungiant vienos fazės apvijų kraštinę ritę (5 linija); 5) išjungiant iš schemos vienos fazės vieną ritę (šie pakeitimai stiprina CTAV srovę) (6 linija). Eksperimentiškai nustatyta (1 pav.), kad 1 – 3 būdais (2 – 4 linija) galima sumažinti, o 4 ir 5 būdais (5, 6 linijos) – padidinti CTAV paleidimo jėgą.



**1 pav.** CTAV paleidimo jėgos priklausomybė nuo apvijų jungimo būdo

### TAV statinių charakteristikų aibės

Įvade aprašytos TAV ir TEP savybės charakteristikų aibių pavidalu tyrinėtos [5]. Šiame straipsnyje tyrimai tęsiami, nagrinėjant kitas TAV charakteristikas.

2 pav. pateiktos TAV mechaninių charakteristikų tiesiškumo parametrų aibės, esant skirtingiems konstrukciniams parametrui, kurie yra nurodyti 3 lentelėje.

**3 lentelė.** TAV, kurių mechaninių charakteristikų tiesiškumo parametrai pavaizduoti 2 pav., konstrukcinių parametrų kitimo ribos

2 pav., a, atvejis	$\epsilon_0$			$R_1, \Omega$		
	Pradinė vertė	Galutinė vertė	Kitimo žingsnis	Pradinė vertė	Galutinė vertė	Kitimo žingsnis
a)	0,6	7	6,4	2	2	0
b)	5	5	0	2	5	0,3
c)	5	5	0	2	2	0
d)	5	5	0	2	2	0
2 pav., b, atvejis	$X_{\sigma 1}, \Omega$			$X_{p1}, \Omega$		
	Pradinė vertė	Galutinė vertė	Kitimo žingsnis	Pradinė vertė	Galutinė vertė	Kitimo žingsnis
a)	2	2	0	5	5	0
b)	2	2	0	5	5	0
c)	2	2	0	5	20	0,5
d)	2	10	0,5	5	5	0

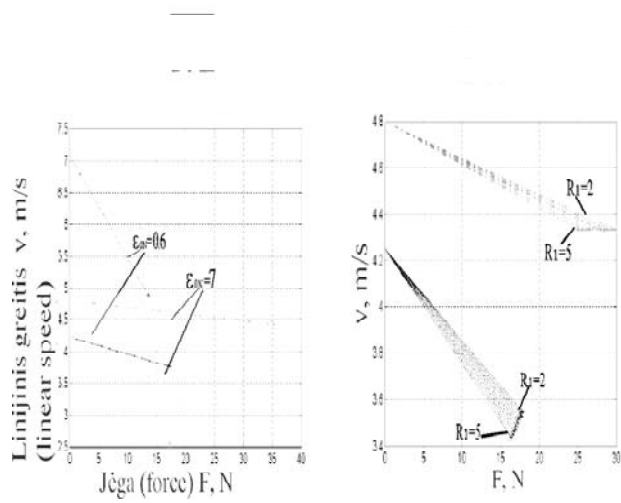
Projektuotojas iš 2 pav. pateiktų diagramų gali nustatyti, kokios turi būti TAV ekvivalentinės schemos varžos ir magnetinis Reinoldso skaičius, garantuojantys reikiamus TAV mechaninių charakteristikų darbinės dalies parametrus. Be to, pateiktos diagramos įgalina įvertinti galų efekto įtaką TAV mechaninėms charakteristikoms.

### TAV dinaminė charakteristikų aibės

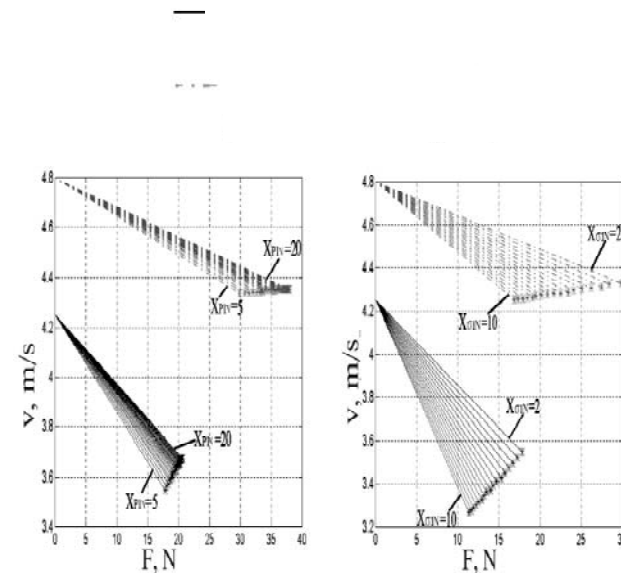
Projektuojant įvairių mechanizmų pavaras, keliami reikalavimai ir pavaros dinaminėms charakteristikoms,

pavyzdžiui, yra normuojamos dinaminės jėgos, pereinamojo proceso laikas ir kt.

3 pav. pateiktos TAV dinaminės jėgos pirmojo švytavimo maksimumo priklausomybės nuo antrinio elemento aktyviosios varžos ir nuo judančių dalių masės.



a



b

2 pav. TAV mechaninių charakteristikų tiesiškumo parametru aibės, esant skirtingiems konstrukciniams parametrams.

**Išvados**

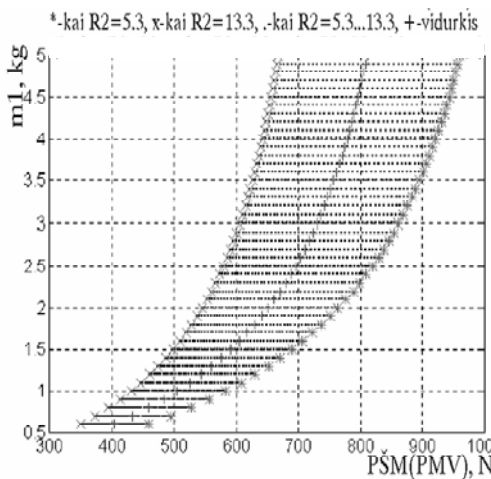
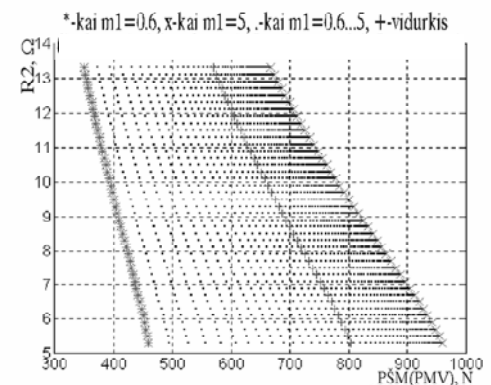
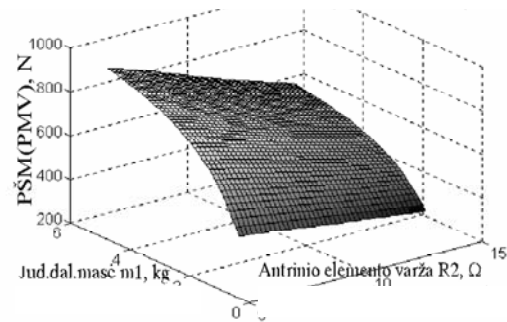
1. TAV nėra standartizuoti, todėl projektuojant tiesiaieges elektros pavaras konkreitiems mechanizams, tenka nagrinėti galimų TAV statinių ir dinaminų charakteristikų aibes.

2. Pasiūlytos aproksimacinės TAV atstojamosios schemas varžų išraiškos, leidžiančios paspartinti TEP charakteristikų skaičiavimą.

3. Siūlomi trumpalaikiu režimu veikiančių CTAV paleidimo jėgos parinkimo būdai įgalina ją keisti nuo -48,2 iki +12,7%.

— - kai įvertintas kraštų efektas  
 - - - - kai neįvertintas kraštų efektas

TAV dinaminės jėgos pirmojo švytavimo maksimumas (PŠM)



3 pav. TAV dinaminės jėgos pirmojo švytavimo maksimumo priklausomybės nuo antrinio elemento aktyviosios varžos ir nuo judančių dalių masės

**Literatūra**

- kai įvertintas kraštų efektas  
 - kai neįvertintas kraštų efektas

1. ...their control: a review // Proceedings of the 10th International Conference European Power and Drives Association PEMC 2002, 9 - 11 September 2002, Cavtat&Dubrovnik, Croatia. ISBN: 953 - 184 - 047 - 4.-P. 12 - 19.

2. ...approach to a vector control for a linear induction motor considering end effect, IEEE IAS

- annual meeting, 3 – 7 Oct., in Phoenix, Arizona, 1999.– P. 2284-2289.
3. **Hyung–Min Ryu, Jung-Ik Ha, Seung-Ki Sul.** A New Sensorless Thrust Control of Linear Induction Motor. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Volume: 3, 2000.– P. 1655 - 1661.
  4. **Sakae Yamamura.** Theory of linear induction motors. – University of Tokyo press, 1978. – 180 p.
  5. **Poška A., Rinkevičienė R., Meilūnas M.** Mažų greičių tiesiaiegių asinchroninių elektros pavarų klasės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 1999. -Nr. 1 (19). – P. 63-65.
  6. **Poška A. J., Teišerskas Č.** Automatinės sistemos su tiesiaieigėmis elektros pavaromis. –Vilnius: Technika, 1993. – 174 p.
  7. **Poška A. J., Savickienė Z., Ilgevičius A.** Tiesiaiegių asinchroninių variklių charakteristikų aibių apskaičiavimo problemos // Elektrotechnika 23(32): Mokslo darbai.– Kaunas: Technologija, 2000. – P. 97-102.
  8. **Boldea I., Nasar A.** Linear electric actuators and generators. IEEE International Conference on Electric Machines and drives. Conference record.1997. P. MA1/1.1-MA1/1.5.
  9. **Gieras J. F.** Linear induction Drives – Clarendon Press // Oxford University Press, Nova York, 1994. – P.297.
  10. **Budig P.-K.** The Application of Linear motors. //The third International Power Electronics and motion Control conference – 2000. – Vol.3.– P. 1336-1341.
  11. **Vadher V.V., Smith J. R., Wilson R. W.** Linear induction actuators: design and performance // Sixth International Conference on Electrical machines and drives. 1993. – P.518-522.

Pateikta spaudai 2004 02 14

**R. Rinkevičienė, A.J. Poška, O. Darulienė. Mažų greičių tiesiaiegių asinchroninių elektros pavarų charakteristikų aibės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika.– Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 4(53). – P. 55-58.**

Straipsnyje nagrinėjama mažų greičių tiesiaiegių asinchroninių variklių charakteristikų aibių skaičiavimo metodika. Pasiūlytos TAV nuosekliosios atstojamosios schemas varžų supaprastintos išraiškos, paspartinančios TAV ir TEP statinių ir dinaminių charakteristikų aibių skaičiavimą. Eksperimentiškai ištirtos trumpalaikiu režimu veikiančio CTAV paleidimo jėgos priklausomybės nuo apvijų jungimo būdo. Sudarytos ir ištirtos TAV statinių ir dinaminių charakteristikų parametrų aibės, kurias galima taikyti tiesiaieigėms elektros pavaroms projektuoti. Il. 3, bibl. 11 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k).

**R. Rinkevičienė, A.J. Poška, O. Darulienė. Analyses of Characteristics' Sets of Low Speed Linear Electric Drives // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 4(53) – P. 55-58.**

This article analyses calculation method of characteristics' sets of low speed linear induction motors (LIM). Proposed more simple resistance formula of LIM sequential equivalent scheme accelerates static and dynamic characteristics' sets calculation of LIM and linear electric drives. It was tested experimentally starting force of short-time duty cylindrical LIM dependence on a windings connection method. Tested parameters sets of LIM static and dynamic characteristics can be applied in designing of linear electric drivers. Ill.3, bibl. 11 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

**P. Ринкявичене, А.Ю. Пошка, О. Дарулене. Исследование множества характеристик маломощных линейных электроприводов // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 4(53) – С. 55-58.**

В статье рассматриваются методы расчёта характеристик маломощных линейных асинхронных двигателей (ЛАД). Предложены упрощённые формулы сопротивлений для последовательной схемы замещения ЛАД, которые позволяют ускорить расчёт множеств статических и динамических характеристик для ЛАД и линейных электроприводов. Экспериментально исследована зависимость силы запуска цилиндрического ЛАД, работающего в кратковременном режиме, от соединения схемы обмотки. Также исследованы параметры множеств статических и динамических характеристик ЛАД, которые предлагается использовать для проектирования линейных электроприводов. Ил. 3, библи. 11 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).