

## Dinaminiai tiesiaeigių pavarų stabdymo režimai

R. Rinkevičienė, S. Lisauskas

Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

Naugarduko g. 41, LT-03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2744763, el.p. saulius.lisauskas @el.vtu.lt

### Įvadas

Naudojant tiesiaeigius asinchroninius variklius (TAV), kurie tiesiogiai perduoda judesį vykdymo mechanizmui, galima sumažinti judančių elektromechaninės sistemos dalių masę, padidinti darbo greitį [1, 2]. Daugelyje pramonės įrenginių sistemos su tiesiaeigiais asinchroniniais varikliais veikia ekonomiškiau negu hidraulinės arba elektromechaninės.

Šiuo metu tiesiaeigiai varikliai vis plačiau naudojami automatinėse konteinerių transportavimo sistemose [3], pašto rūšiavimo įrenginiuose [4], tekstilės pramonės mechanizmuose, staklių pavarose, jungtuvų, sklendžių, stūmiklių pavarose [5], liftų kėlimo ir durų pavarose [6].

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 rolę turi viso įrenginio energiniai bei ekonominiai rodikliai. Kitais atvejais svarbu gauti maksimalią jėgą, kai antrinis elementas nejuda arba judėjimo greitis yra mažas ir ribotas. Būdingas darbo režimas – trumpalaikis, trumpalaikis kartotinis. Šios grupės varikliams energiniai rodikliai ne tokie svarbūs, kaip santykiniai rodikliai, pavyzdžiui, jėga, tenkanti imamos galios, masės, induktoriaus paviršiaus ploto vienetui. Yra specifinės paskirties mechanizmų ir įrenginių, kuriems svarbiausia sukurti 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 [7].

Todėl TAV plačiausiai naudojami mechanizmuose, veikiančiuose trumpalaikiu ar trumpalaikiu kartotiniu režimu. Tai įvairių komutacinių aparatų, technologinių bei greitaveikių sklendžių, transporto įrenginių, stūmiklių pavaros.

Veikiant pavarai trumpalaikiu ar trumpalaikiu kartotiniu režimu, judamosios dalies greitis paprastai nepasiekia nusistovėjusios vertės, todėl ir statoriaus apvijų srovės nepasiekia nusistovėjusių verčių. Pavara veikia dinaminio režimu. Tiriant tokių elektros pavarų charakteristikas, būtina įvertinti elektromagnetinius pereinamuosius procesus elektros variklyje.

Technologinių įrenginių variklis turi būti ne tik dažnai paleidžiamas, bet ir stabdomas. Skirtingai nuo sukusių variklių, stabdymo režimai yra būtini netgi paprastoms tiesiaeigėms pavaroms [8].

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinis stabdymas sudaro atskirą mokslinę ir techninę problemą. Iki šiol visi teoriniai šių mašinų klausimai nagrinėjami elektromag-netinio lauko teorijos metodais [7, 8].

Tiesiaeigių asinchroninių variklių elektrinio stabdymo mokslinė bei techninė problema sprendžiama sudarant TAV matematinį modelį stabdymo režimams skaičiuoti, aprašant elektromagnetinį lauką bei skaičiuojant stabdymo jėgą esant įvairiai tiesiaeigio variklio konstrukcijai ir skirtingoms magnetinio Reynoldso skaičiaus vertėms. Atliktų tyrimų rezultatai leido nustatyti įvairių stabdymo būdų efektyvumą bei sukurti naujus stabdymo būdus ir schemas [8].

Pavarai veikiant dinaminio režimu, reikia atsižvelgti į elektromagnetinio lauko dedamąsias ne tik pagal koordinates, bet įvertinti ir jų laikinį kitimą. Todėl statinės stabdymo charakteristikos skiriasi nuo dinaminė [7].

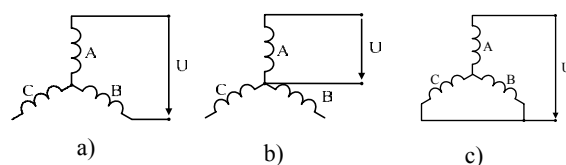
Nestacionaraus stabdymo režimo, atsižvelgiant į pagreičio įtaką variklio charakteristikoms, tyrimai atlikti [9], kai aktyviųjų zonų skaičius yra lyginis.

Tais atvejais, kai technologinis procesas reikalauja stabdymo metu riboti pagreitį ar keisti stabdymo proceso trukmę, reikia nagrinėti ne tik statinius, bet ir dinaminius elektrinio stabdymo režimus.

Čia nagrinėjami mažos galios tiesiaeigių variklių dinaminiai stabdymo režimai, kai galima neatsižvelgti į kraštų efektus. Ištirta variklio apvijų sujungimo būdo bei maitinimo įtampos įtaka dinaminėms stabdymo nuolatine srove charakteristikoms.

### Dinaminio stabdymo apvijų sujungimo schemas

Dinaminio stabdymo metu prie statoriaus apvijų prijungiama nuolatine įtampa. Ji gali būti prijungiama 3 būdais (1 pav.) [7].



1 pav. Variklio apvijų jungimo būdai dinaminio stabdymo metu

## Tiesiaieigio variklio modelis

Dinaminiam režimams modeliuoti naudojamas tiesiaieigio asinchroninio variklio (TAV) modelis, sudarytas  $x$ ,  $y$  koordinačių sistemoje, judančioje sinchroniniu greičiu [9]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{x1}}{dt} = U_{1m} \cos \gamma - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{y1}; \\ \frac{d\Psi_{y1}}{dt} = U_{1m} \sin \gamma - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{y1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \Psi_{y2} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{x1}; \\ \frac{d\Psi_{x2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \Psi_{x1} - \frac{\pi}{\tau} (v_0 - v) \Psi_{y2}; \\ \frac{d\Psi_{y2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \Psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_r \Psi_{y1} - \frac{\pi}{\tau} (v_0 - v) \Psi_{x2}; \\ F = \frac{3}{2} \frac{\pi \omega_s K_r}{\tau \alpha_s} (\Psi_{x2} \Psi_{y1} - \Psi_{x1} \Psi_{y2}) \end{cases} \quad (1)$$

Pagrindinė pavaros judesio lygtis

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (F - F_s), \quad (2)$$

o lygtis nueitam keliui rasti

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad (3)$$

čia  $\Psi_{x1}, \Psi_{y1}$  – pilnutinio statoriaus srauto projekcijos į  $x$ ,  $y$  ašis;  $\Psi_{x2}, \Psi_{y2}$  – pilnutinio rotoriaus srauto projekcijos į  $x$ ,  $y$  ašis;  $U_{1m}$  – tinklo fazinės įtampos amplitudinė vertė;  $\gamma$  – tinklo įtampos fazė įjungimo metu;  $\tau$  – polių žingsnis;  $v_0$  – variklio tuščiosios veikos greitis;  $v$  – variklio greitis;  $F$  – variklio sukuriama jėga;  $F_s$  – statinė pasipriešinimo jėga; koeficientai:  $\alpha_s = \frac{r_1}{x_s}$ ;  $\alpha_r = \frac{r_2}{x_s}$ ;  $\sigma = 1 - \frac{x_p^2}{x_r x_p}$ ;

$$K_s = \frac{x_p}{x_s}; \quad K_r = \frac{x_p}{x_r}; \quad \alpha'_s = \frac{\alpha_r}{\sigma}; \quad \alpha'_r = \frac{\alpha_s}{\sigma}.$$

Kiti vartojami žymėjimai:  $x_p$  – pagrindinė įmagnetinimo kontūro induktyvioji varža;  $x_s = x_p + x_1$  – statoriaus apvijos pilnutinė induktyvioji varža;  $x_r = x_p + x_2$  – rotoriaus apvijos pilnutinė induktyvioji varža;  $r_1$  – aktyvioji statoriaus varža;  $r_2$  – rotoriaus (judamojo elemento) apvijos redukuota aktyvioji varža;  $x_1, x_2$  – statoriaus ir rotoriaus (judamojo elemento) induktyviosios sklaidos varžos.

Lygčių sistema (1) išvesta transformuojant trifazę sistemą, kurioje variklio apvijos yra prijungtos prie fazinės įtampos (tarp fazės ir nulio), į ekvivalentinę dvifazę, o po to – į judančią sinchroniniu greičiu.

Jei variklis yra maitinamas simetrine įtampa ir jo visos fazinės varžos yra vienodos, tai jo modelis sudaromas pagal (1) lygčių sistemą [10, 11, 12]. Naudojant šį modelį galima tirti variklinį režimą. Tiriant stabdymo režimą, reikia atsižvelgti į variklio apvijų jungimo būdą (1 pav).

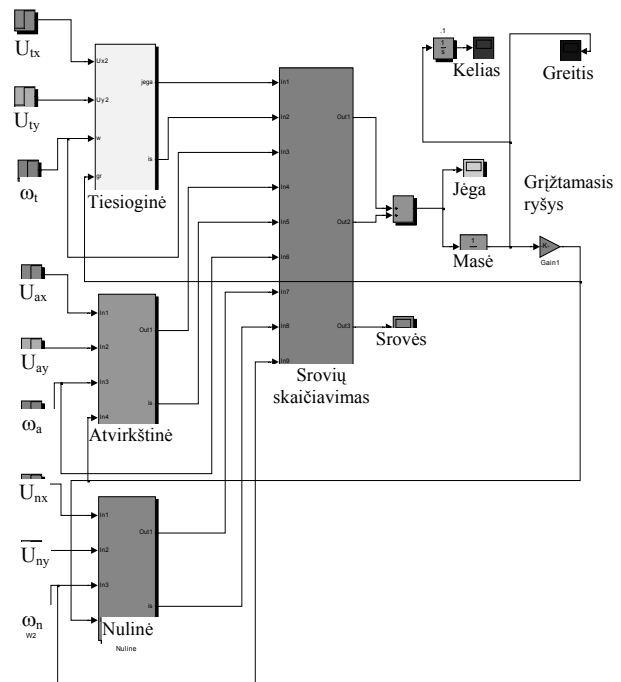
## Simetrinių dedamųjų metodas

1 pav. pateiktos TAV apvijų maitinimo schemas yra nesimetrinės. Variklio dinaminio režimų modelis

sudaromas taikant simetrinių dedamųjų metodą, kuris yra pagrįstas bet kokios nesimetrinės sistemos išskaidymu į tris simetrines dedamąsias.

## Stabdymo režimo modeliavimas

Dinaminio stabdymo režimo modelį sudaro trys TAV modeliai, kurie atitinka simetrines tiesioginę, atvirkštinę ir nulinę variklio dedamąsias. Modelio, sudaryto tiesioginei dedamajai, rezultatas yra variklio sukuriama jėga ir greitis. Modelis, sudarytas atvirkštinei dedamajai, duoda priešingos krypties jėgą. Abiejų modelių sukurtos jėgos algebriskai sumuojamos ir ši suminė jėga veikia antrinį elementą. Antrinis elementas juda greičiu  $v$ . Nulinė dedamoji jėgos nekuria.

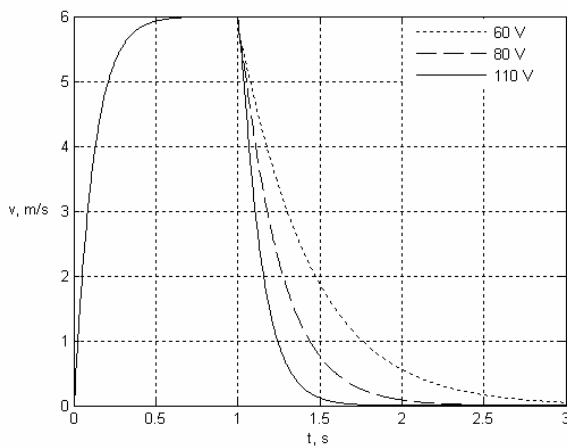


2 pav. TAV modelis

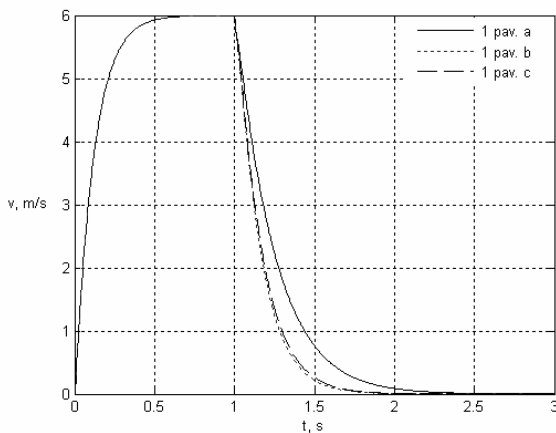
2 pav. pateiktas simetrine įtampa maitinamas TAV paleidimo modelis. Pasibaigus pereinamajam procesui, atsižvelgiant į atvirkštinę ir nulinę įtampos dedamąsias, prijungiamas antrasis ir trečiasis modeliai. Nustačius įtampos dažnį  $\omega = 0$ , modeliuojamas dinaminis stabdymas. Įtampos tiesioginės ir atvirkštinės dedamųjų vertės priklauso nuo TAV apvijų sujungimo būdo dinaminio stabdymo metu.

3 pav. pateikti variklio, kurio apvijos sujungtos 1 pav., a, parodytu būdu, greičio grafikai paleidimo ir dinaminio stabdymo metu, esant skirtingoms įjungiamos nuolatinės įtampos vertėms. Didesnė stabdymo įtampa sąlygoja didesnę srovę, didesnę dinaminio stabdymo jėgą ir trumpesnę variklio stabdymo trukmę (3 pav.). 4 pav. lyginami greičio pereinamieji procesai įjungiant 80 V stabdymo įtampą, kai apvijos jungiamos visais trimis būdais, o 5 pav. analogiškai lyginamos jėgos. Sujungus apviją 1 pav., a, būdu stabdymas trunka ilgiau, nes sukuriama mažesnė dinaminio stabdymo jėga. Modeliuojant variklį, kurio apvijos sujungtos pagal 1 pav.,

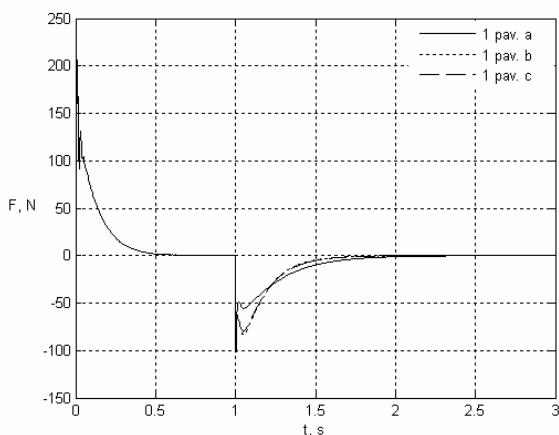
b, gauti rezultatai yra labai panašūs kaip 1 pav., c, parodytu apvijų sujungimo atveju.



**3 pav.** Variklio greičio kitimas paleidimo ir stabdymo metu, kai apvijos sujungtos 1 pav., a, parodytu būdu, esant skirtingoms įtampoms



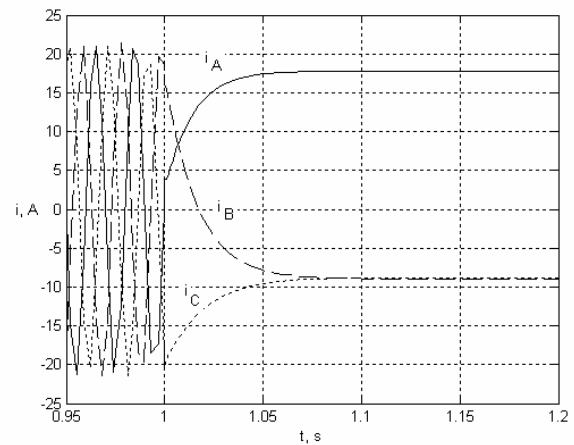
**4 pav.** Variklio greičio kitimas paleidimo ir stabdymo metu, visais trimis apvijų jungimo atvejais, prijungus 80 V nuolatinę įtampą



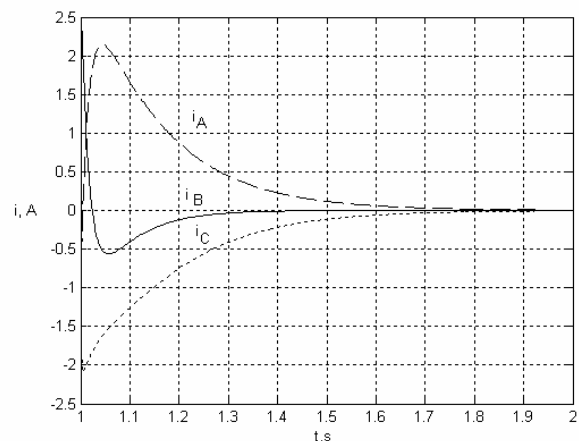
**5 pav.** Jėgos kitimas paleidimo ir stabdymo metu visais trimis apvijų jungimo atvejais, prijungus 80 V nuolatinę įtampą

Sujungus apviją 1 pav., a, parodytu būdu ta pati srovė teka per A ir B fazes. Taikant 1 pav., c, parodytą

apvijų sujungimo būdą srovė teka visomis trimis apvijomis, kaip parodyta 6 pav. Antriniame elemente indukuojamos srovės parodytos 7 pav. Variklio greičiui mažėjant, jos artėja prie nulio.



**6 pav.** Statoriaus srovės variklio paleidimo ir stabdymo metu laikinės priklausomybės, kai apvijos sujungtos 1 pav., c, parodytu būdu



**7 pav.** Antrinio elemento srovių kitimas, variklio paleidimo ir stabdymo metu, kai apvijos sujungtos 1 pav., c, parodytu būdu

## Išvados

1. Ištirti dinaminiai stabdymo režimai leidžia parinkti variklio apvijų sujungimo schemą darbui stabdymo režimu ir formuoti reikiamas dinamines stabdymo charakteristikas.
2. Prijungus nuolatinę įtampą prie dviejų fazių, stabdymo srovė ir jėga yra mažesnės, o stabdymo trukmė ilgesnė negu kitais dviem nagrinėtais atvejais.
3. Prijungus to paties dydžio nuolatinę stabdymo įtampą kaip ir kintamoji, stabdymo jėga padidėja tris kartus.

## Literatūra

1. **Boldea I.** Linear electric actuators and 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. **Budig P.-K.** The Application of Linear motors // The third International Power Electronics and motion Control conference. – 2000. – Vol.3. – P. 1336 – 1341.
3. **Abdou G.H.** Application of LIM in flexible manufacturing systems // Programmable Control and Automation Technology Conference and Exhibition. Conference Proceedings., Fourth Annual Canadian. – 1988. – P. 1-5.
4. **Yuynue Y.** Application of the linear induction motors in the postal mechanical system // Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2001. ICEMS 2001. – Vol.23. – P. 964 – 967.
5. **Poška A.** Specialiosios automatinės sistemos. – Vilnius: Technika, 1995. – 204 p.
6. **Morizane T., Masada E.** Study on the feasibility of application of linear induction motor for vertical movement // IEEE transactions on magnetics. – 1993. – Vol.29, No 6. – P. 2938 – 2940.
7. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(57). – P. 42 – 47.
8. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymas. – V.: Technika, 1992. – 52 p.
9. **Каралюнас 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.
10. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Tiesiaeigių mechatroninių sistemų modeliai // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 69-73.
11. **Rinkevičienė R.** Mechatronic Systems with linear induction motors. Summary of the research report presented for habilitation. – Vilnius: Technika, 2003. – 28 p.
12. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Model of Linear Induction Drive // V Workshop for candidates for a doctor's degree OWD '2003 Conference Archives PTETiS. – Vol. 17. – 2003. – P. 336 – 340.

Pateikta spaudai 2005 03 17

**R. Rinkevičienė, S. Lisauskas. Dinaminiai tiesiaeigių pavarų stabdymo režimai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 4(60). – P. 37–40.**

Nagrinėjami dinaminiai tiesiaeigių pavarų stabdymo nuolatine srove režimai. Sudaryti dinaminiai stabdymo modeliai, esant trimis apvijų jungimo būdams. Stabdymo metu variklio apvijų maitinamos nesimetriškai įtampa. Sudaryti tiesiaeigės pavaros tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės dedamųjų modeliai. Ištirta stabdymo trukmės priklausomybė nuo apvijų jungimo būdų ir maitinamos įtampos dydžio. Išanalizuota variklio sukuriama jėga, statoriaus srovės ir antrinio elemento srovės laikinės priklausomybės esant skirtingiems apvijų jungimo būdams. Ištirti dinaminiai tiesiaeigių pavarų stabdymo nuolatine srove procesai, leidžia parinkti variklio apvijų sujungimo schemą ir formuoti reikiamas dinamines stabdymo charakteristikas. Il. 7, bibl. 12 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**R. Rinkevičienė, S. Lisauskas. Dynamic Braking Modes of Linear Induction Drive // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 4(60). – P. 37–40.**

The article presents investigation into dynamic modes of braking of linear induction drives when motors windings are supplied by direct current. Dynamic models of braking are developed for three different connection types of windings. During braking linear motor windings are supplied by asymmetrical voltage. Models of linear electric drives are developed for direct, inverse and zero components. Dependences of braking duration on winding connection type and supplied voltage is investigated. Dependences of linear motor developed force, inductor current and secondary element current against time are analyzed at different windings connection type. Discussed dynamic processes of braking linear motors by direct current allows to choose a scheme of linear induction motors connection and to form required dynamic characteristics of braking. Ill. 7, bibl. 12 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English and Russian).

**Р. Ринкявичене, С. Лисаускас. Динамические режимы торможения линейных электроприводов // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – №. 4(60). – С. 37–40.**

Исследуются динамические режимы торможения линейных электроприводов при питании обмоток двигателя постоянным током. Разработаны динамические модели торможения электропривода при трёх способах соединения его обмоток. При торможении обмотки двигателя питаются несимметрическим напряжением. Разработаны модели линейного электропривода для прямой, обратной и нулевой последовательности. Исследована зависимость времени торможения от способа соединения обмоток и величины напряжения питания. Проанализированы временные зависимости усилия развиваемого двигателем, тока индуктора и вторичного элемента при различном соединении его обмоток. Проанализированы динамические процессы торможения линейным электроприводом при торможении его постоянным током позволяют выбрать схему соединения его обмоток и формировать нужные характеристики динамического торможения. Ил. 7, библи. 12 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).