

В. І. Теряєв, к. т. н., доц.; А. Ю. Довбик

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ БАГАТОСЕКЦІЙНИМ ЛІНІЙНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

В різноманітних галузях промисловості і транспорту існує необхідність безпосереднього здійснення поступального руху виконуючих органів робочих машин. Для цієї мети доцільним є застосування лінійних асинхронних двигунів (ЛАД), основними перевагами яких є висока надійність, простота конструкції, зниження габаритів, маси і вартості установки, а також можливість одержання поступального руху з необмеженими величинами прискорення й уповільнення без будь-яких механічних передач. Проте ЛАД характеризуються рядом особливостей, які потрібно враховувати при їх розробці та впровадженні, а саме: збільшеним робочим повітряним зазором та підвищеними, внаслідок цього, потоками розсіювання, насиченням та розімкненістю магнітопроводу, що призводять до виникнення поздовжніх кінцевих ефектів, зниження ККД та коефіцієнта потужності.

Метою дослідження є аналіз впливу особливостей конструктивного виконання ЛАД на його статичні та динамічні характеристики. Основна увага приділена ЛАД з обмеженою довжиною індуктора або ротора, які можуть перебувати в стані, коли первинний і вторинний елементи взаємодіють лише частково, тобто не мають повного перекриття одного іншим. В основу уточненої моделі ЛАД покладена стандартна модель обертового асинхронного електродвигуна пакету Matlab/Simulink з використанням модифікованої Т-подібної схеми заміщення ЛАД, яка враховує поперечний і поздовжній крайовий та кінцевий ефекти, а також не повне перекриття індуктора.

В результаті проведених досліджень показано, що неповне перекриття індуктора впливає як на процес пуску, так і усталеного руху ЛАД і призводить до погіршення якості перехідних процесів, зменшення тягового зусилля і прискорення.

В статті також розглянуті особливості керування ЛАД з багатосекційним індуктором в режимах пуску, усталеного руху та гальмування.

Результати проведених досліджень дають можливість сформулювати рекомендації по оптимізації конструкції та удосконаленню методів керування ЛАД.

Ключові слова: електродвигун, лінійний, асинхронний, індуктор, ротор, короткий, перекриття, неповне, вплив, динаміка, керування.

Вступ

Застосування лінійних асинхронних двигунів (ЛАД) дозволяє спростити конструкцію, підвищити продуктивність промислових і транспортних установок за рахунок отримання тягового зусилля без механічного контакту між рухомою і нерухомою частинами механізму та використання передаточних пристроїв.

Принцип дії лінійних двигунів з вторинним елементом у вигляді смуги відповідає обертовому асинхронному двигуну з масивним феромагнітним або порожнистим немагнітним ротором. Обмотки індуктора ЛАД мають ті ж схеми з'єднання, що і звичайні асинхронні двигуни, і підключаються зазвичай до мережі трифазного змінного струму. Відповідно аналогічними є і методи пуску та регулювання швидкості обертових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором і ЛАД.

Зупинимось на деяких відмінних особливостях ЛАД. Індуктор лінійного двигуна має кінцеву довжину в напрямку магнітного поля, що біжить, яке виникає на одному і зникає на іншому кінці сердечника індуктора. Цю особливість характеризують як «розімкнення» магнітної системи лінійного двигуна, що призводить до виникнення кінцевого ефекту. Цей ефект, зокрема, викликає асиметрію струмів в обмотках індуктора і створює пульсуючу

складову магнітного поля індуктора.

Величина повітряного робочого зазору у лінійних двигунах, як правило, на порядок більша, ніж у машин обертальної дії. Це призводить до зниження коефіцієнтів корисної дії та потужності ЛАД. Значна величина зазорів ЛАД викликає також необхідність підвищення індукції у первинній частині двигуна, що призводить до її насичення. За цією ж причиною величина індукції у вторинному елементі виявляється зниженою.

Фізичні процеси, особливості математичного моделювання та керування ЛАД вивчалися рядом авторів. Так, питання впливу кінцевих ефектів ЛАД на його статичні і динамічні характеристики докладно розглянуті в роботах [1–4], де підтверджена необхідність урахування впливу розімкненості магнітопроводу. В роботах [4, 5] розглянуті шляхи компенсації впливу крайових ефектів ЛАД конструктивними засобами та методами керування. В той же час в сучасних роботах недостатньо уваги приділено вивченню впливу явища неповного перекриття індуктора ротором ЛАД.

Мета дослідження

Метою статті є вивчення електромеханічних властивостей ЛАД з коротким ротором, а також перевірка алгоритмів частотного керування на основі використання уточненої математичної моделі.

Результати досліджень

На відміну від традиційного обертального асинхронного двигуна, первинна і вторинна частини ЛАД, отримані «розгортанням» обмоток статора і ротора в площину, можуть мати різну довжину. Існує велика кількість конструктивних модифікацій ЛАД, наприклад з коротким індуктором і довгим ротором або навпаки (рис. 1, а, в, відповідно), а також з коротким індуктором і коротким ротором (рис. 1, б). При цьому, для кожного з цих різновидів, нерухомим може бути як індуктор, так і ротор.

ЛАД з обмеженою довжиною індуктора або ротора може перебувати в стані, коли первинний і вторинний елементи взаємодіють лише частково, тобто не мають повного перекриття одного іншим, як це показано, наприклад, на рис. 1, б. Ця особливість призводить до того, що ряд індуктивних опорів ЛАД в процесі переміщення його рухомої частини не є сталими і залежать від ступеня взаємного перекриття первинного і вторинного елементів, що повинно враховуватися при створенні математичних моделей і проектуванні систем лінійного електроприводу [6]. Зазначимо, що для ЛАД з довгим ротором (рис. 1, а) або довгим суцільним індуктором (рис. 1, в) цим явищем в більшості випадків можна знехтувати, оскільки воно має місце лише на початковій та кінцевій ділянках взаємодії первинного і вторинного елемента.

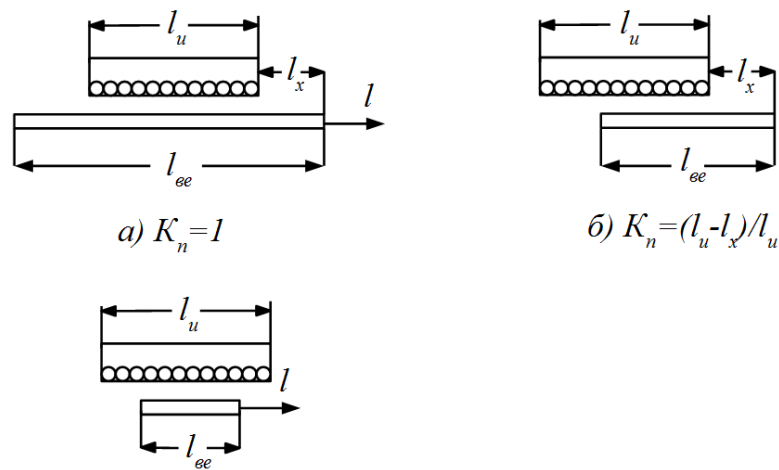


Рис. 1. Варіанти конструктивного виконання ЛАД з довгим та коротким індуктором

На рис. 1 позначені: l_u – довжина індуктора; l_{ee} – довжина вторинного елемента; l_x – довжина ділянки взаємного перекриття індуктора вторинним елементом; k_n – коефіцієнт, що враховує перекриття індуктора вторинним елементом. Як видно з рис. 1, для ЛАД з довгим вторинним елементом (рис. 1, а) $k_n = 1$, а для випадків короткого вторинного елемента (рис. 1, б, в) величина k_n визначається співвідношенням довжини індуктора l_u і довжини вторинного елемента l_{ee} , а також їхнім взаємним перекриттям l_x . Відповідно, для варіанту конструктивного виконання на рис. 1, б $k_n = (l_u - l_x) / l_u$, для варіанту на рис. 1, в $k_n = l_{ee} / l_u$.

Оцінка впливу ефекту неповного перекриття

Зупинимось докладніше на вивченні електромеханічних процесів в ЛАД з короткими індуктором і ротором з метою оцінки впливу ефекту неповного перекриття.

Для математичного опису ЛАД широке застосування знайшли математичні моделі на основі схем заміщення (метод Е-Н чотириполіусників, моделі з розподіленими параметрами, деталізовані магнітні схеми заміщення, Т-подібні схеми заміщення), які дають можливість будувати моделі з різною деталізацією окремих елементів машини [1 – 3]. Застосування Т-подібної схеми заміщення дає можливість розглядати модель лінійного двигуна як динамічну. При цьому вплив крайових ефектів враховується введенням додаткових опорів в контур намагнічування і коло ротора, значення яких визначається на основі розв'язку рівнянь електромагнітного поля або експериментальних тестів.

Тому для дослідження впливу вказаних вище особливостей ЛАД скористаємось математичною моделлю, в основу якої покладена Т-подібна схема заміщення, отримана шляхом синтезу схем, що враховують поперечний і поздовжній крайовий та кінцевий ефекти, а також конструктивне виконання ЛАД з довгим і коротким вторинним елементом [6]. Будемо вважати, що обмотки індуктора симетричні і створюють у зазорі гармонійну хвилю магніторушійної сили, а складові електромагнітних полів, обумовлені крайовими ефектами, не взаємодіють.

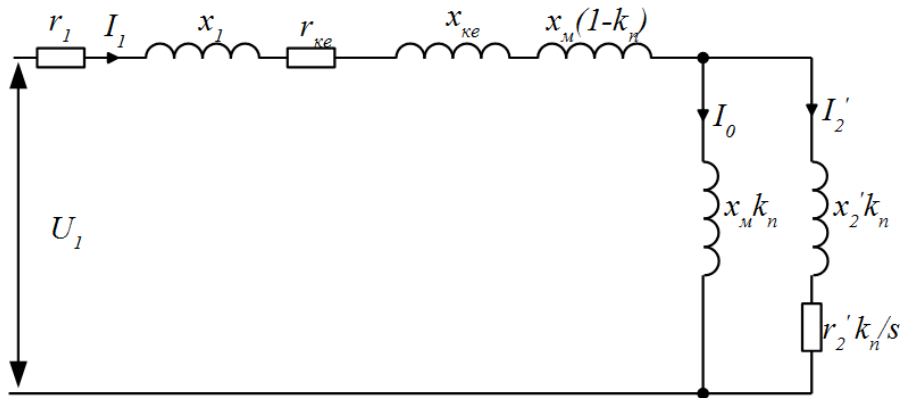


Рис. 2. Модифікована Т-подібна схема заміщення ЛАД

На схемі заміщення позначені: r_1 – активний опір обмотки індуктора, x_1 – реактивний опір розсіювання обмотки індуктора; $r_{ке}$, $x_{ке}$ – дійсна і мніма частини комплексного опору, що враховує вплив поздовжнього крайового ефекту; x_m – реактивний опір взаємодукції; x_2' – вторинний приведений реактивний опір; r_2' – активний опір вторинного елемента, що розраховується з урахуванням поперечного крайового ефекту; U_1 – первинна фазна напруга; I_1 – струм обмотки індуктора; I_0 – струм намагнічування; I_2' – приведений струм вторинного елемента; s – ковзання.

Для оцінки впливу особливостей ЛАД з короткими індуктором та ротором (рис. 1, б) на статичні і динамічні характеристики електроприводу проведено порівняльне моделювання перехідних процесів пуску лінійного асинхронного двигуна з урахуванням та без урахування зміни коефіцієнту перекриття індуктора в процесі руху ротора. Результати моделювання представлені на рис. 3 та рис. 4. Числові значення параметрів ЛАД наступні: довжина індуктора $l_u = 3\text{ м}$, довжина вторинного елемента $l_{ee} = 3\text{ м}$, число пар полюсів 15, маса рухомої частини 720 кг, $r_1 = 0.115\text{ Ом}$, $r_2' = 0.072\text{ Ом}$, $L_1 = 0.01\text{ Гн}$, $L_2' = 0.002\text{ Гн}$, $L_M = 0.002\text{ Гн}$.

Цифрами на рис. 3, 4 позначені графіки перехідних процесів: 1 – без урахування коефіцієнту перекриття; 2 – з урахуванням коефіцієнту перекриття.

Порівняльний аналіз перехідних процесів вказує на те, що врахування явища неповного перекриття індуктора ЛАД вторинним елементом призводить до погіршення якості перехідного процесу. В результаті зменшується прискорення та зростає час розгону лінійного електроприводу. В цьому дослідженні, враховуючи обмежену довжину індуктора ЛАД, ротор не виходить на задану швидкість.

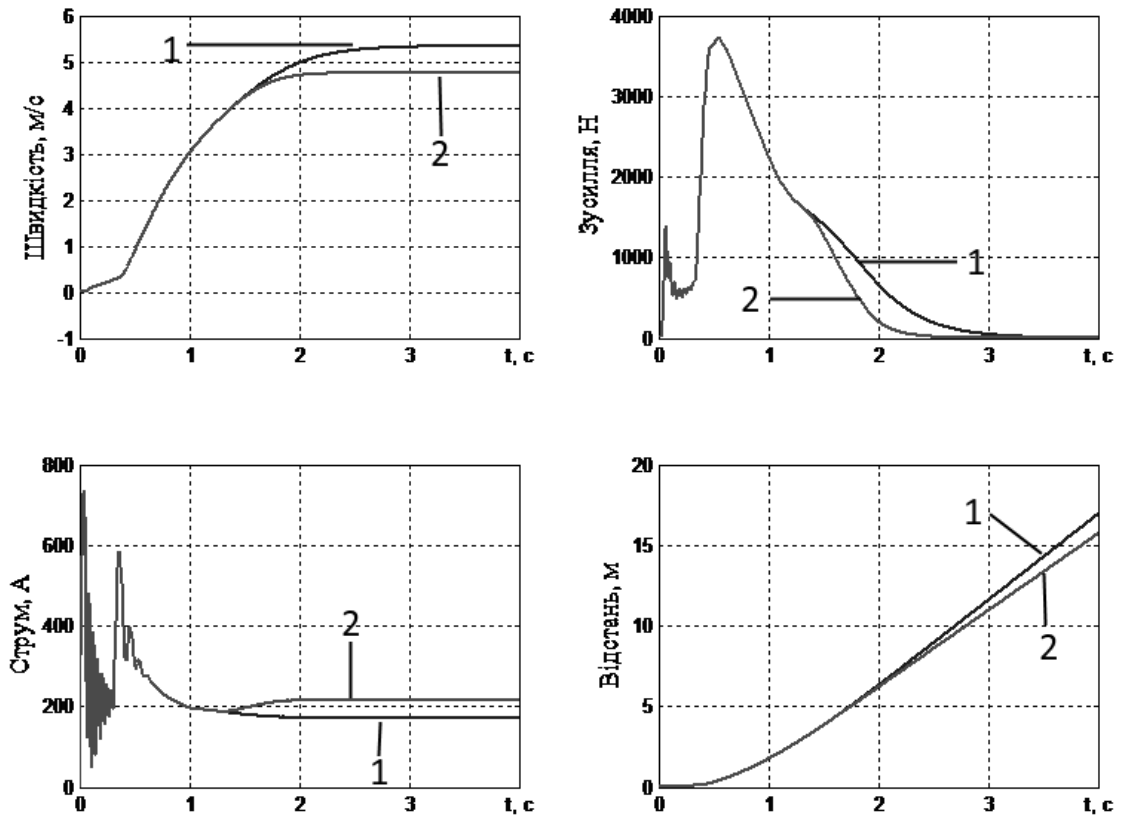


Рис. 3. Динамічні процеси зміни силових характеристик ЛАД з і без врахування коефіцієнта перекриття

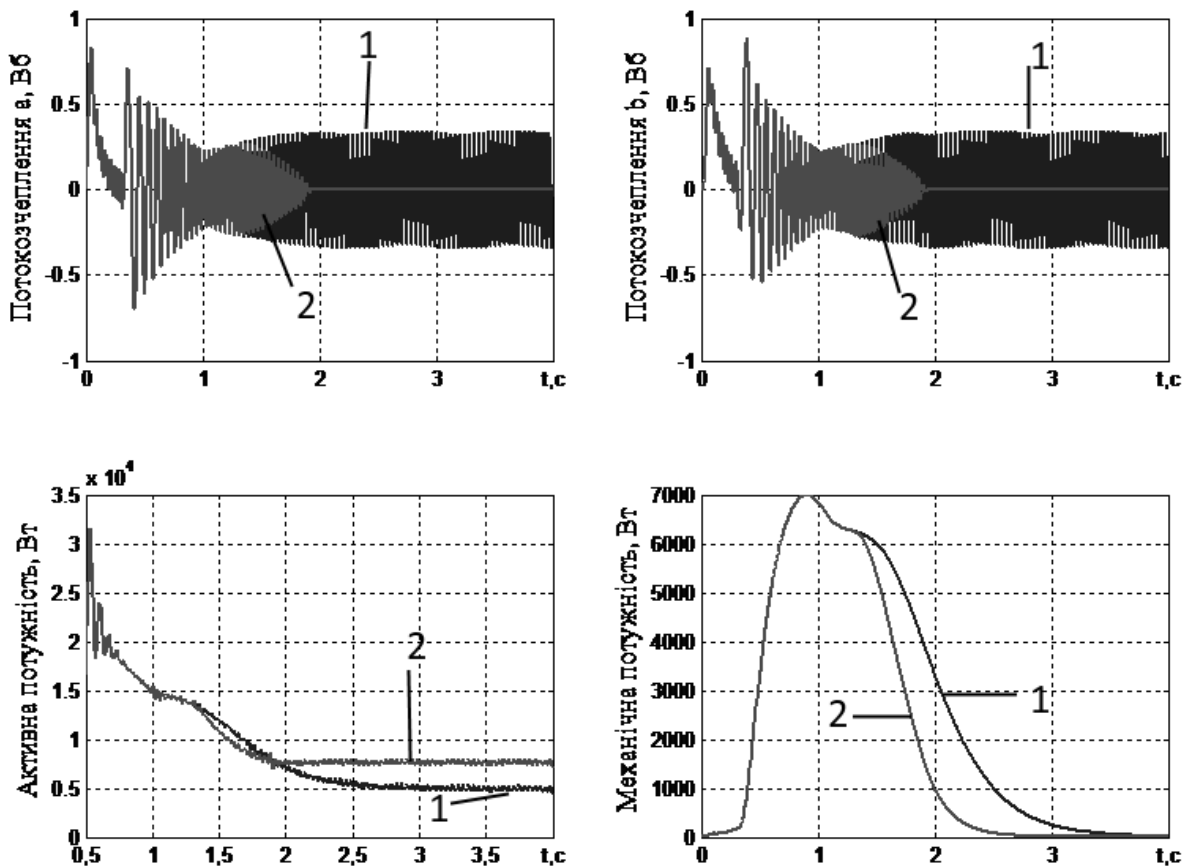


Рис. 4. Динамічні процеси зміни енергетичних характеристик ЛАД з і без врахування коефіцієнта перекриття

Отримані результати можуть бути розповсюджені і на ЛАД з довгим індуктором, в яких з метою економії електроенергії обмотка індуктора виконується секціонованою. Секції індуктора таких ЛАД підключаються до мережі паралельно лише на час їх безпосередньої взаємодії з ротором, а інші, неактивні секції, відключаються.

Прикладами практичного застосування ЛАД з довгим секціонованим індуктором є системи високошвидкісного наземного транспорту, системи запуску літаків на авіаносцях, безканатні ліфтові установки для висотних будинків та підйомно-транспортні машини з лінійним приводом. Важливою перевагою таких ЛАД є відсутність рухомого струмопідводу. Ця перевага може бути вирішальною, наприклад для високошвидкісного наземного транспорту на магнітній подушці, який рухається зі швидкостями до 500 км/год, або в ліфтових установках з лінійним приводом.

Особливості керування багатосекційним ЛАД

При незалежному живленні секцій, довжина яких співвимірна з довжиною вторинного елемента, виникають ті ж самі ефекти неповного перекриття індуктора ротором, які розглядалися вище для ЛАД з короткими індуктором і ротором (рис. 1, б).

Схема електроприводу з багатосекційним ЛАД представлена на рис. 5.

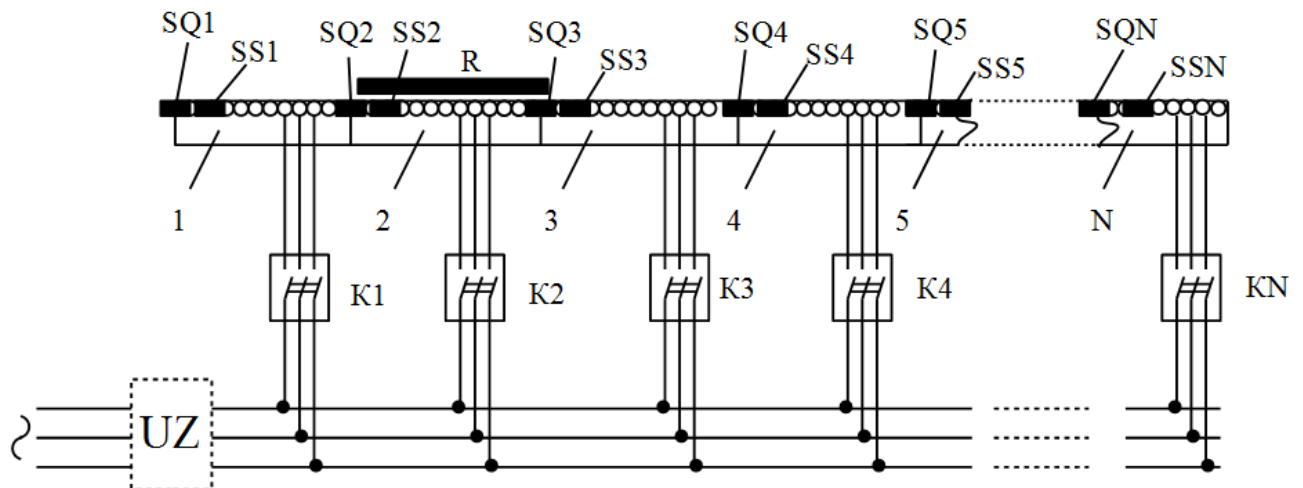


Рис. 5. Схема керування багатосекційним ЛАД

На схемі рис. 5 позначені: 1 ... N – секції індуктора; K1 ... KN – комутатори (контактні або безконтактні); R – ротор (вторинний елемент); SS1 ... SSN, SQ1 ... SQN – датчики, які розташовані відповідно на початку та в кінці кожної секції індуктора і використовуються для визначення положення та напрямку руху ротора; UZ – перетворювач (використовується при необхідності плавного пуску або регулювання швидкості ЛАД).

Включення та відключення секцій індуктора відбувається комутаторами, які керуються командами датчиків положення. При підході ротора до наступної секції індуктора спрацьовує датчик положення, розташований на початку секції і вмикає відповідний комутатор, який подає живлення на активну секцію. Одночасно датчик відключає живлення попередньої секції індуктора.

За рахунок налаштування місця установки або часу спрацьовування датчиків положення, комутація секцій індуктора ЛАД може відбуватись синхронно або з відставанням по відношенню до ротора, що рухається. Останній режим може використовуватись для побічного регулювання прискорення та швидкості ЛАД. Для здійснення режиму електричного гальмування окремі секції індуктора можуть підключатись до джерела живлення зі зворотним порядком чергування фаз.

Результати проведених досліджень свідчать про необхідність врахування неповного перекриття індуктора ЛАД вторинним елементом, а також розробки заходів для компенсації впливу даного явища. Такі заходи можуть бути спрямовані на покращення конструкції ЛАД, а також методів керування ним.

Висновки

1. Математична модель ЛАД на основі модифікованої Т-подібної схеми заміщення дозволяє оцінити вплив зміни коефіцієнту перекриття індуктора на статичні та динамічні характеристики ЛАД, проводити уточнені дослідження статичних та динамічних режимів лінійного електроприводу.
2. Проведений порівняльний аналіз перехідних процесів під час пуску лінійного двигуна з врахуванням і без врахування коефіцієнту перекриття свідчить про те, що явище неповного перекриття індуктора впливає як на процес пуску, так і усталеного руху ЛАД і призводить до погіршення якості перехідних процесів, зменшення тягового зусилля і прискорення.
3. Результати досліджень дають можливість визначити особливості керування ЛАД з довгим секціонованим індуктором, сформулювати рекомендації по оптимізації його конструкції та методів керування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сарапулов Ф. Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения / Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 236 с.
2. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей / С. Ямамура ; пер. с англ. Т. Глазено. – Л. Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. – 180 с.
3. Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motor with Parameters Depending on Secondary Speed for Urban Transportation System [Electronic resource] / Yuichiro Nozaki, Terufumi Yamaguchi, Takafumi Koseki // The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan. – Access mode : <https://koseki.t.u-tokyo.ac.jp/static/4e027f73915bafa62af50d3fb83822cf/1195bWymd8Wphi3ALS1hGlpqYxIv-C-M.pdf>.
4. Kang G. Field-oriented control scheme for linear induction motor with end effect / G. Kang, K. Nam // IEE proceedings - Electric power applications. – 2005. – Vol. 152, № 6. – P. 1565 – 1572. – DOI: [10.1049/ip-epa:20045185](https://doi.org/10.1049/ip-epa:20045185).
5. Теряев В. І. Алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів / В. І. Теряев, М. О. Островерхов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Київ : «Техніка», 2011. – С. 32 – 34.
6. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський. – Київ : «Либідь», – 2005. – 680 с.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2020.

Стаття пройшла рецензування 13.12.2020.

Теряев Віталій Іванович – к. т. н., доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації та електроприводу, e-mail: kpivit@gmail.com.

Довбик Антон Юрійович – магістр кафедри електромеханічних систем автоматизації та електроприводу, e-mail: anton.dovbyk@gmail.com.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".