

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКИМИ ІНДУКТОРОМ І ВТОРИННИМ ЕЛЕМЕНТОМ

В.І. Теряєв^{1*}, канд. техн. наук, А.Ю. Довбик^{1**}, О.А. Зайченко^{2***}, канд. техн. наук

¹ НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,

пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: kpivit@gmail.com; anton.dovbyk@gmail.com.

² Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: tems@ukr.net.

На основі уточненої математичної моделі лінійного асинхронного двигуна, яка враховує кінцеві ефекти, насичення магнітопроводу та неповне перекриття індуктора вторинним елементом побудовано імітаційну модель електроприводу в пакеті Matlab. Проведено моделювання роботи лінійного електроприводу, що враховує ефект входу-виходу вторинного елемента з магнітного поля індуктора. Отримані результати досліджень свідчать про працездатність розробленої моделі та її придатність для проведення уточненого моделювання її синтезу законів керування лінійного електроприводу. Бібл. 12, рис. 13, табл. 1.

Ключові слова: лінійний асинхронний електропривод, моделювання, кінцеві ефекти, насичення магнітопроводу, неповне перекриття індуктора, дослідження, статика, динаміка.

Вступ. На сьогоднішній день електродвигуни обертового руху займають переважне становище в електроприводі. Це пояснюється їхньою універсальністю, високими енергетичними показниками, надійністю, уніфікованістю. В той же час існує багато механізмів, де виконавчий орган здійснює поступальний рух. Задля перетворення обертового руху ротора двигуна на поступальний рух виконавчого органу використовуються кінематичні пари: ходовий гвинт-гайка, колесо-рейка, шестерня або черв'як-зубчаста рейка, кривошипно-шатунна та інші види передач. При цьому механічним передачам притаманні такі недоліки як люфти, пружності, різні види тертя (сухе, в'язке та інші), додаткові втрати, а також можливість проковзування (для фрикційних передач).

Лінійні електродвигуни (ЛД) призначені для перетворення електричної енергії у поступальний рух виконавчого органу робочої машини і представляють собою модифікацію електричних машин з розімкненою магнітною системою. Як правило, така магнітна система включає магнітопровід і розгорнуту обмотку, що створює біжуче магнітне поле. Внаслідок взаємодії цього поля із вторинним елементом виникає лінійне тягове зусилля [1].

Головною перевагою ЛД є можливість передачі силової дії на об'єкт керування без механічного контакту з ним. Тому лінійні електроприводи використовуються саме там, де застосування двигунів обертового типу неефективне або неможливе.

Галузями перспективного використання електроприводів з ЛД є електричний транспорт (по-тяги, електромобілі, ліфти, траволатори, ескалатори), машинобудування (приводи металообробних верстатів, роботів і маніпуляторів), промисловість (підйомно-транспортні машини, системи технологічного і неперервного транспорту), металургія, принтери, човникові механізми, будівельна техніка ударної дії, поршневі машини, штовхачі та актуатори різного призначення, військова техніка та інші. Прикладами використання, де ЛД є єдиним можливим технічним рішенням, є безконтактний високошвидкісний наземний транспорт з лінійним електроприводом і магнітним або аеродинамічним підвішуванням (Maglev, Hyperloop), обладнання для перекачування розплавленого металу (МГД-насоси), електромагнітні сепаратори.

Основними перевагами електроприводів з ЛД є: простота конструкції, можливість прикладання зусилля до об'єкту керування без механічного контакту з ним та проковзування; підвищена

надійність; відсутність втрат, пружностей та люфтів, існуючих в механічних передачах; можливість одержання великих значень прискорення й уповільнення. До недоліків можна віднести: обмежені регульовальні властивості, складність отримання низьких швидкостей руху; відсутність можливості механічної редукації швидкості та відповідного збільшення тягового зусилля; низькі масогабаритні та енергетичні показники (ККД і коефіцієнта потужності). Останні два недоліки пов'язані зі збільшеною величиною повітряного робочого зазору у порівнянні з обертальними електричними машинами. Це пояснюється технологічними причинами: у разі встановлення ротора обертальної машини у підшипниках зазор між статором і ротором може бути витриманий у межах десятих частинок міліметра, тоді як за лінійного виконання електричної машини задля уникнення безпосереднього контакту між первинним і вторинним елементами протягом всього шляху переміщення цей зазор може складати від одиниць до десятків міліметрів.

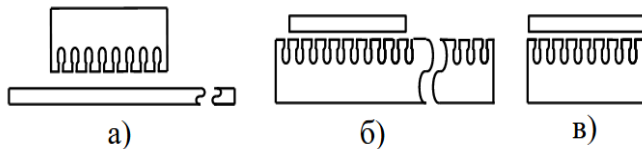


Рис. 1

Особливістю ЛД є те, що довжина первинного і вторинного елементів можуть не співпадати. В залежності від цього розрізняють наступні їхні різновиди (рис. 1): з коротким індуктором та довгим вторинним елементом (а); з коротким вторинним елементом та довгим індуктором (б); з короткими індуктором і вторинним

елементом (в).

ЛД можуть також мати звернену конструкцію, за якою рухомих може бути як ротор (вторинний елемент), так і статор (індуктор).

Практично всі електричні машини обертального руху мають свої лінійні аналоги, але найбільш простими з точки зору технічної реалізації є лінійні асинхронні двигуни (ЛАД), що забезпечило їхнє переважне розповсюдження.

Варіанти конструктивного виконання ЛАД показано на рис. 2: а – односторонній; б – двосторонній з двома обмотками; в – двосторонній з однією обмоткою; г – односторонній зі зворотним магнітопроводом, суміщеним з реактивною смугою; д – односторонній з відокремленим зворотним магнітопроводом; е – коаксіальний; є – дисковий; ж – дугостаторний. Незважаючи на те, що дискові та дугостаторні двигуни реалізують обертальний рух, їх відносять до класу ЛАД. Вони дають змогу отримати значний крутний момент за відносно невеликої швидкості обертання ротора за рахунок збільшення плеча прикладання зусилля без використання механічної редукації. Ці двигуни, як правило, мають розімкнений магнітопровід і тому розглядаються як ЛАД з коротким індуктором і довгим вторинним елементом. Приклад використання дугостаторного двигуна в електроприводі антени радіолокаційної станції наведено в [2].

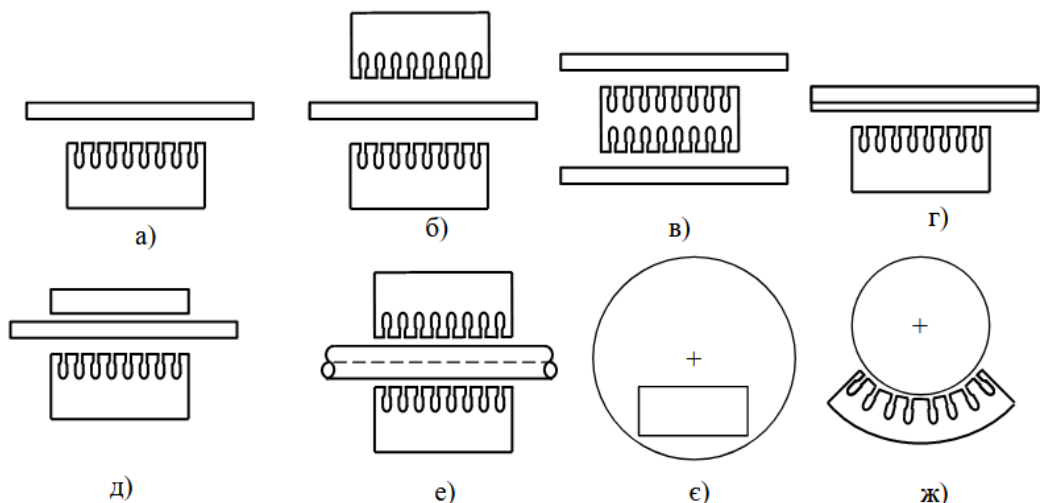


Рис. 2

Вторинний елемент (реактивна полоса) ЛАД не завжди оснащується обмоткою. Часто, і в цьому одна з переваг ЛАД, як вторинний елемент використовується електропровідна смуга з алюмінію чи міді або комбінована смуга з прилеглими один до одного електропровідним і феромагнітним

матеріалами, в якій останній виконує роль зворотного магнітопроводу. Зворотний магнітопровід може бути суцільним або шихтованим.

Невід'ємною особливістю ЛАД є кінцеві ефекти, які виникають через розімкненість магнітопроводу індуктора, а також ефекти «входу-виходу» контурів струму вторинного елемента із пасивної зони в активну. Наявність кінцевих ефектів призводить до зміни форми потоку й індукції в повітряному зазорі по всій активній довжині індуктора, в результаті чого виникають додаткові ЕРС в котушках обмотки. Останнє викликає несиметричність фазних струмів, наявність гармонік МРС і небажані втрати.

Розрізняють поперечний крайовий та поздовжні кінцеві ефекти. Поздовжні кінцеві ефекти можуть бути первинними і вторинними [3, 4]. Первинний поздовжній крайовий ефект виникає через асиметрію електромагнітних параметрів, навіть коли вторинний елемент нерухомий. Вторинний кінцевий ефект (ефект входу-виходу) – це явище, яке повторюється систематично у разі входу і виходу вторинних контурів струму в електромагнітне поле статора в процесі відносного руху вторинного елемента.

Поперечний крайовий ефект зумовлений тим, що індуквані струми містять поздовжні складові, які не формують тягове зусилля, але викликають у вторинному елементі поперечні зусилля.

Серед особливостей ЛД також слід відмітити насичення магнітної системи та стан неповного перекриття індуктора вторинним елементом, які впливають на статичні та динамічні характеристики електроприводу.

Відсутність можливості механічної редукції призводить до складності отримання низьких швидкостей руху і необхідності пошуку методів глибокого регулювання швидкості у випадку використання регульованого електроприводу.

Розглянуті особливості ЛАД призводять до погіршення технічних характеристик лінійного електроприводу, що свідчить про актуальність теми даного дослідження, спрямованого на розвиток питань удосконалення електроприводів з ЛАД, пошук нових рішень щодо їхнього проектування, методів керування та дослідження.

Метою роботи є розробка методології врахування особливостей ЛАД під час проведення досліджень статичних і динамічних режимів лінійного електроприводу на основі використання уточненої математичної моделі, яка враховує кінцеві ефекти, насичення магнітопроводу та неповне перекриття індуктора.

Розглянемо більш докладно фактори, які потребують уточнення під час моделювання ЛАД з короткими індуктором і вторинним елементом.

Кінцеві ефекти ЛАД. За загальноприйнятою методологією, запропонованою Данканом [5], кінцеві ефекти ЛАД можуть бути враховані спеціальною функцією, яка залежить від швидкості руху і параметрів індуктора. У даному дослідженні задля врахування впливу кінцевих ефектів функцію Данкана введено у коло намагнічувального струму.

Насичення магнітної системи ЛАД. Існує думка, що внаслідок збільшеної величини робочого повітряного зазору магнітна система ЛАД є ненасиченою. Дане припущення ґрунтується на тому, що через збільшення робочого зазору асинхронної машини індукція магнітного поля в зазорі i , відповідно, магнітопроводі, зменшується. Із даним твердженням можна було би погодитися, якщо б мова йшла про збільшення зазору вже існуючої асинхронної машини. Інакша справа у разі проектуванні нового ЛАД. Великий робочий повітряний зазор, обумовлений конструктивними особливостями лінійного двигуна, викликає збільшення потоків розсіювання, а також послаблює робочий магнітний потік, що призводить, з метою його відновлення, до необхідності збільшення струму статора та струму намагнічування i , як результат, насичення магнітопроводу індуктора. У прагненні отримати прийнятні масогабаритні характеристики проектувальникам доводиться задаватися гранично допустимими значеннями таких показників як густина струму в обмотці, лінійне струмове навантаження, індукція магнітного поля в магнітопроводі. Наслідком цього є те, що вже у номінальному режимі роботи ЛАД магнітопровід індуктора знаходиться у стані, близькому до насичення.

На рис. 3 показана типова картина поля ЛАД з коротким індуктором, побудована за допомогою програмного комплексу ELCUT для трьох положень вторинного елемента: a – повне перекриття; b – часткове перекриття; v – відсутність перекриття.

З аналізу картини поля ЛАД, представленої на рис. 3, впливає наступне:

- за усіх положеннях вторинного елемента магнітопровід індуктора має зони насичення;
- в зоні відсутності перекриття індуктора вторинним елементом робочий магнітний потік переходить у потік розсіювання;
- зворотний магнітопровід за усіх положеннях є ненасиченим.

Викладене свідчить про те, що математична модель ЛАД, призначена для уточненого дослідження його статичних і динамічних характеристик, повинна враховувати вплив насичення магнітопроводу індуктора, а також про обмежені можливості застосування типових методів керування асинхронними двигунами, які потребують вільного оперування магнітним потоком або його складовими, в тому числі і за принципом векторного керування.

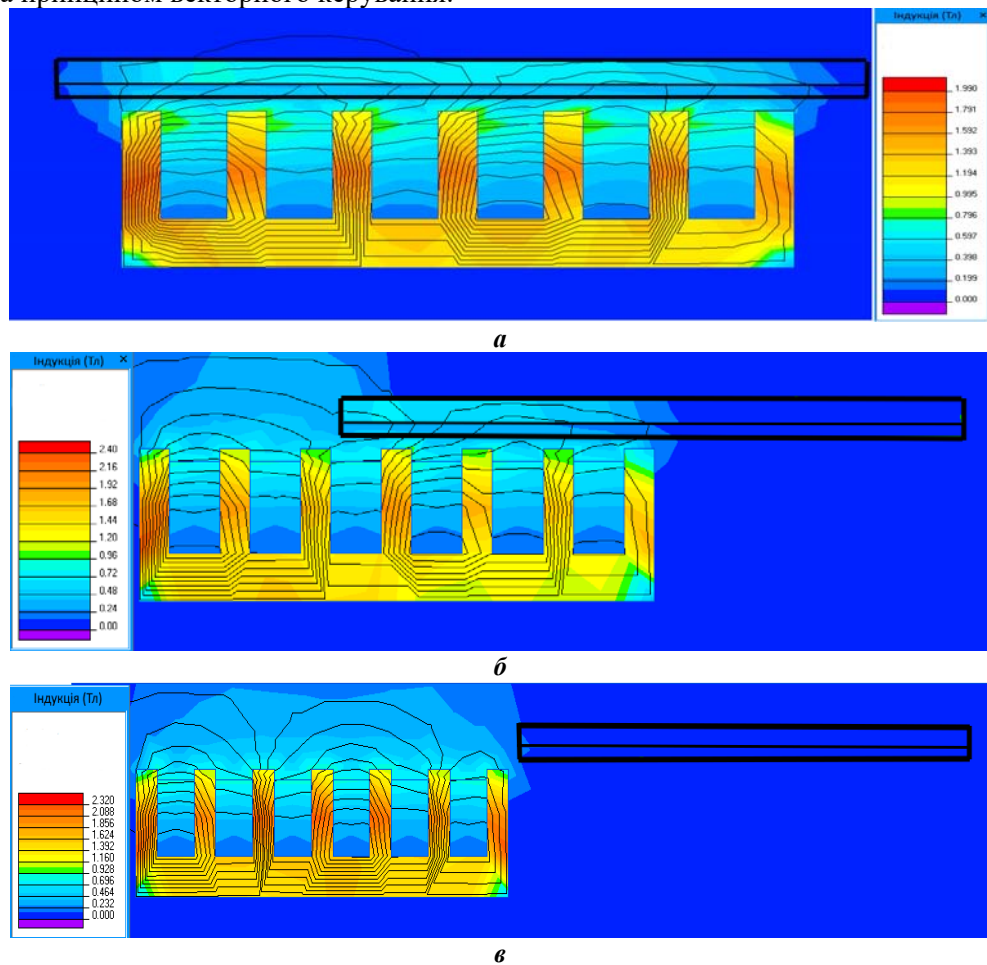


Рис. 3

В моделі, що розглядається, насичення магнітопроводу індуктора враховане прямим використанням характеристики намагнічування сталі індуктора шляхом введення коефіцієнта насичення, який впливає на індуктивні опори розсіювання та намагнічування.

Неповне перекриття індуктора вторинним елементом. Однією з унікальних особливостей ЛАД з короткими індуктором і вторинним елементом, яка не зустрічається і тому не досліджується у традиційних обертових машинах, є так званий ефект неповного перекриття [1]. Цей ефект може мати місце у всіх різновидах ЛАД (одно- та двосторонні, плоскі, дугостаторні та коаксіальні) з так званими короткими первинним і вторинним елементами. Під короткими в даному контексті розуміється індуктор і вторинний елемент обмеженої співвимірної довжини. Дана конструкція двигунів використовується в приводах подачі металорізальних верстатів з обмеженим ходом робочого органу, на транспортних засобах із сегментованою шляховою структурою, яка складається з окремих індукторів або відрізків реактивних полос та інші.

Суть даного явища пояснюється на рис. 4 і полягає у тому, що в процесі руху ЛАД мають місце періоди часу, коли індуктор і вторинний елемент взаємодіють по всій довжині (3 – повне перекриття), взаємодіють частково (2, 4 – неповне перекриття) або не взаємодіють взагалі (1, 5 – відсутність перекриття).

Площа перекриття індуктора вторинним елементом лінійно залежить від їхнього взаємного розташування і визначається коефіцієнтом перекриття k_o , який розраховується за формулою

$$k_o = l_o / l_i, \quad (1)$$

де l_o – довжина активної зони взаємодії індуктора і вторинного елемента; l_i – довжина індуктора.

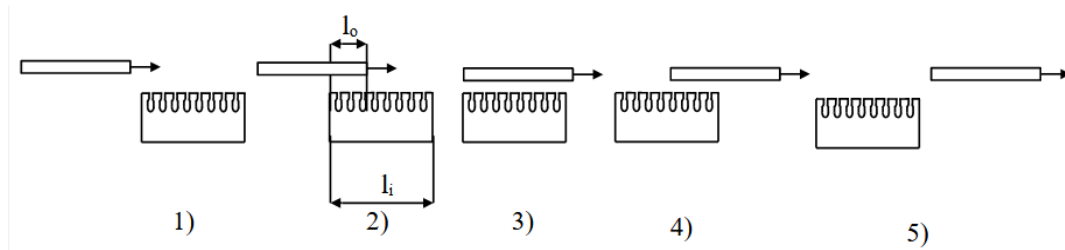


Рис. 4

Зміну коефіцієнту перекриття відповідно до положення вторинного елемента на рис. 4 показано на рис. 5.

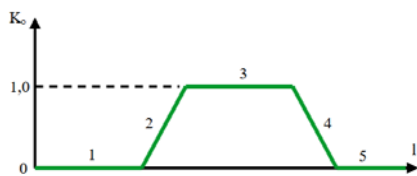


Рис. 5

Фізичні процеси, які виникають в двигуні за неповного перекриття, полягають у перерозподілі магнітних потоків і зменшенні активної площі взаємодії індуктора та вторинного елемента, що, в свою чергу, призводить до зміни більшості параметрів і характеристик двигуна (див. картину поля на рис. 3).

Наслідком цього явища є залежність вторинного та індуктивних опорів від взаємного розташування статора і ротора, що враховується введенням коефіцієнта перекриття k_o в ланки схеми заміщення.

Уточнена математична модель ЛАД. Математичні моделі використовуються для теоретичного дослідження поведінки ЛАД в статичних і динамічних режимах, отримання значень його параметрів розрахунковим шляхом, здійснення проектування конструктивних елементів, проведення синтезу законів керування лінійним електроприводом. Історично склалося, що перші математичні моделі лінійних електродвигунів були отримані на основі теорії поля. На даний час аналіз електромагнітного поля використовується, в основному, задля отримання параметрів еквівалентної схеми [3].

Враховуючі такі особливості як наявність кінцевих ефектів, насичення магнітопроводу, ефект неповного перекриття індуктора вторинним елементом, найбільш наочними і зручними для відображення властивостей та дослідження ЛАД є моделі на основі уточненої еквівалентної схеми заміщення. Вибір моделі на основі схеми заміщення є загальноприйнятим [5 – 7, 10 – 12] і пояснюється складністю фізичних процесів у лінійній машині навіть у порівнянні з асинхронною машиною оберտальної дії.

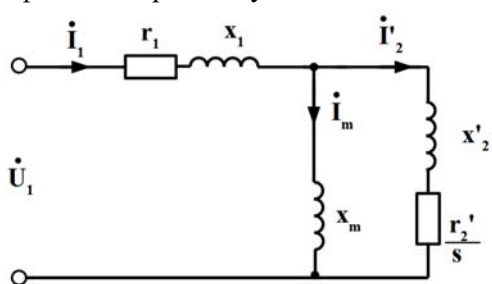


Рис. 6

Для опису електромеханічних процесів ЛАД скористаємося методологією [8] та універсальною однофазною схемою заміщення асинхронної машини, представленою на рис. 6, де позначені комплексні величини: \dot{U}_1 – діюче значення первинної фазної напруги живлення; \dot{i}_1, \dot{i}_2' – первинний та приведений вторинний фазні струми; \dot{i}_m – намагнічувальний струм; r_1, x_1 – активний та реактивний опори розсіювання обмотки індуктора; x_m – реактивний опір взаємодукції; r_2', x_2' – активний та реактивний приведені опори вторинного елемента; s – ковзання.

Вираз для електромагнітного моменту M оберտальної машини

$$M = P_m / \Omega, \quad (2)$$

де P_m – механічна потужність на валу; Ω – кутова швидкість ротора.

Механічна кутова швидкість оберտання магнітного поля машини

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 / p = \omega_1 / p, \quad (3)$$

де f_1 – частота мережі живлення; p – число пар полюсів обмотки; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кругова частота мережі.

Механічна кутова швидкість оберտання ротора з урахуванням ковзання дорівнює

$$\Omega = \Omega_1 (1 - s) = (1 - s) \omega_1 / p, \quad (4)$$

де ковзання $s = (\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1$.

Механічна потужність на валу ротора [8]

$$P_m = m_1 I_2'^2 r_2' (1 - s) / s, \quad (5)$$

де m_1 – число фаз обмотки; I_2' – модуль діючого значення приведеного вторинного фазного струму.

Здійснимо перехід від величин, що використовуються для опису оберտального руху до величин, характерних для лінійного руху.

Електромагнітне тягове зусилля, по аналогії з (2), може бути виражено як

$$F = P_m / v, \quad (6)$$

де v – швидкість рухомого елемента.

Враховуючі, що механічна потужність не залежить від характеру руху електричної машини, згідно (5) отримуємо вираз для тягового зусилля лінійного двигуна у вигляді

$$F = \frac{P_m}{v} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{(1-s)}{vs} = \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} I_2'^2. \quad (7)$$

Під час виведення (7) враховано наступні співвідношення для лінійної швидкості поля v_1 і швидкості рухомого елемента v

$$v_1 = 2p\tau f_1 / p = 2\tau f_1; v = v_1(1-s) = 2\tau f_1(1-s). \quad (8)$$

де τ – полюсний поділок; $s = (v_1 - v) / v_1$ – ковзання.

Звідси рівняння, що описують електромеханічну частину ЛАД, можуть бути записані у вигляді

$$F = \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} I_2'^2; F - F_0 = M_\Sigma \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (9)$$

де F_0 – зусилля опору руху; M_Σ – маса рухомої частини та корисного навантаження.

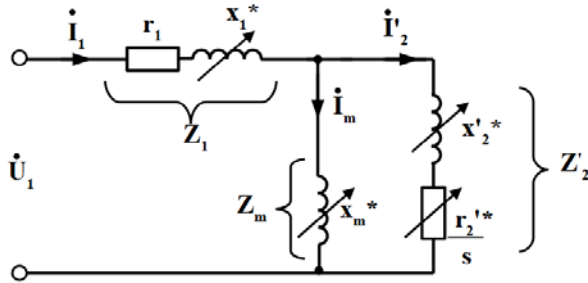


Рис. 7

Для подальших досліджень скористаємося узагальненим підходом до математичного моделювання лінійного електроприводу, запропонованим авторами в [7].

Покладемо в основу моделі ЛАД модифіковану схему заміщення лінійної асинхронної машини (рис. 7), активні та індуктивні опори якої є залежними від впливу кінцевих ефектів, насичення та явища неповного перекриття індуктора.

Задля врахування кінцевих ефектів та додаткових втрат від вихрових струмів скористаємося

моделлю Данкана для керованого за швидкістю лінійного електроприводу, яка передбачає залежність індуктивності опору кола намагнічування від швидкості руху [5]

$$X_m = X_{m0}(1 - f(Q)), \quad (10)$$

де x_{m0} – реактивний опір взаємоіндукції за нерухомого індуктора; $f(Q)$ – функція змінної Q , яка залежить від параметрів індуктора ЛАД і відносної швидкості вторинного елемента та індуктора

$$f(Q) = (1 - e^{-Q}) / Q. \quad (11)$$

Змінна Q вводиться в математичну модель у вигляді залежності

$$Q = l_i r_2' / v L_2', \quad (12)$$

де l_i – довжина індуктора; v – швидкість руху; L_2' – приведена індуктивність вторинного елемента.

Як вже вказувалось вище, індуктор ЛАД переважно працює в режимі насичення. Насичення магнітопроводу призводить до перерозподілу магнітного потоку, викликає зменшення індуктивних опорів розсіювання і взаємоіндукції та відповідне збільшення струмів індуктора та намагнічування. Тому під час побудови адекватної математичної моделі ЛАД необхідно враховувати нелінійність характеристики намагнічування та насичення індуктора. Моделювання цієї характеристики зазвичай здійснюється за допомогою апроксимації кривої намагнічування аналітичною залежністю [9]. В даній роботі нелінійність характеристики намагнічування врахована безпосередньо шляхом введення в індуктивні опори розсіювання та взаємоіндукції коефіцієнта насичення k_s , який визначається для миттєвого значення струму індуктора за залежністю магнітної проникності сталі від намагнічувальної сили.

Задля врахування режиму неповного перекриття в індуктивні опори взаємоіндукції і вторинного елемента введено коефіцієнт перекриття k_o , який розраховується за формулою (1).

Враховуючи викладене, застосуємо модифіковані параметри для Т-подібної схеми заміщення

$$x_1^* = x_1 \cdot k_s; x_m^* = x_m \cdot (1 - f(Q)) \cdot k_o \cdot k_s; x_2'^* = x_2' \cdot k_o; r_2'^* = \frac{r_2'}{s \cdot k_o}. \quad (13)$$

Як видно з модифікованої схеми рис. 7, більшість її параметрів не є сталими і залежать від струму індуктора, швидкості та положення ротора. Тому можна зробити висновок, що ЛАД представляється більш складною, у порівнянні з обертальною машиною, нелінійною електромеханічною системою, аналіз якої може бути виконаний лише методами числового математичного моделювання. Тому метою подальшого дослідження є оцінка факторів, що враховують особливості ЛАД, на предмет можливості нехтування їхнім впливом або спрощеного представлення під час математичного моделювання.

Складемо рівняння задля визначення струмів Т-подібної схеми заміщення (рис. 7). При цьому, для більшої компактності записів, скористаємося повними комплексними опорами

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_e}; \quad \dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1}{Z_2'}; \quad \dot{I}_m = \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1}{Z_m}, \quad (14)$$

де $Z_e = Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_2'}{Z_m + Z_2'}$ – еквівалентний комплексний опір; $Z_1 = r_1 + jx_1^*$; $Z_m = jx_m^*$; $Z_2' = \frac{r_2'^*}{s} + jx_2'^*$ – повні

комплексні опори схеми заміщення.

Структурну схему ЛАД, складену у відповідності до рівнянь (7) – (14), показано на рис. 8. Керування двигуном здійснюється одночасно по двом каналам: частоті та напрузі статора. З цією метою в моделі передбачено два входи завдання – по напрузі та частоті відповідно.

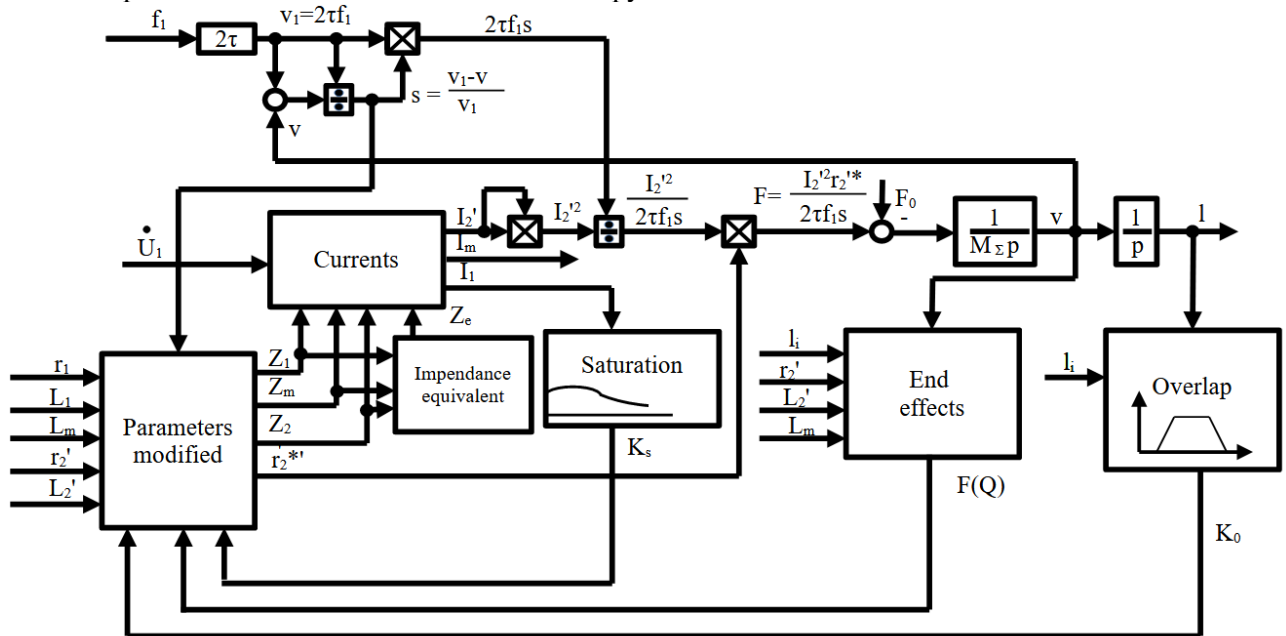


Рис. 8

Блоки для визначення струмів (Currents) та повного еквівалентного опору (Impedance equivalent) побудовано у відповідності до рівнянь (14).

Структурну схему блоку для визначення модулів модифікованих параметрів схеми заміщення (Parameters modified) показано на рис. 9. Оскільки розсіювання статора складається з пазового, диференціального та лобового, будемо вважати, що насичення впливає лише на перші дві складові, які залежать від індукції в магнітопроводі і включають орієнтовно 2/3 загального потоку розсіювання статора [8]. В схемі рис. 9 цей розподіл здійснено у вузлі розрахунку модифікованого значення x_1^* .

Схему вузла для врахування впливу насичення (Saturation) на індуктивності розсіювання і намагнічування наведено на рис. 10, а. В схемі використано блок Lookur Table, в якому закладено залежність магнітної проникності від намагнічувальної сили для типової високоякісної листової електротехнічної сталі марки 3413 з індукцією насичення 1,85 Тл. Дана залежність представлена кривою $k_s = f(I_1^*)$ у відносних одиницях. За базу прийнято точку номінального режиму, для якої номінальному струму у відносних одиницях $I_1^* = I_1 / I_{1N} = 1$ відповідає коефіцієнт насичення $k_s = \mu / \mu_N = 1$, де $\mu_N = 5000$ – номінальне значення відносної магнітної проникності за напруженості магнітного поля 100 А/м і індукції в сталі 1,4 Тл. На рис. 10, б показано реалізацію блоку для урахування кінцевих ефектів (End Effect).

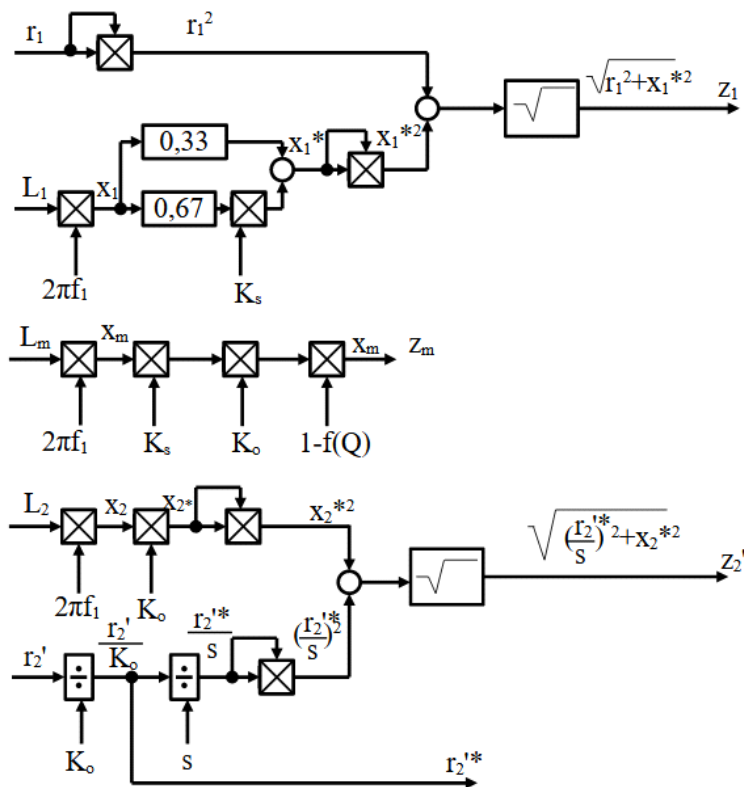
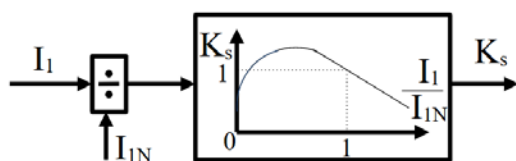
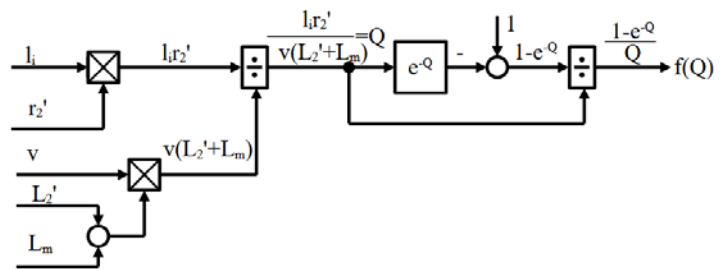


Рис. 9



а



б

Рис. 10

Моделювання динамічних режимів включало два етапи. На першому етапі досліджувався вплив кінцевих ефектів і насичення магнітопроводу на статичні та динамічні характеристики ЛАД. На другому етапі розглядався вплив неповного перекриття індуктора вторинним елементом з та без урахування вищезазначених факторів.

Параметри	Значення
Кількість фаз, m_1	3
Кількість пар полюсів, $2p$	8
Полюсний поділок, τ	292 мм
Довжина індуктора, l_i	2,3 м
Довжина вторинного елемента, l_s	4,5 м
Номинальний струм індуктора, I_{1N}	162 А
Номинальна частота, f_{1N}	35 Гц
Активний опір обмотки індуктора, r_1	0,2 Ом
Індуктивність обмотки індуктора, L_1	0.00434 Гн
Приведений активний опір вторинного елемента, r_2'	0.302 Ом
Індуктивність вторинного елемента, L_2'	0.00022 Гн
Індуктивність намагнічування, L_m	0.0307 Гн

Особливостями структурної схеми двигуна, побудованої на основі схеми заміщення, є те, що в ній закладена фактична механічна характеристика двигуна, однак електромагнітна інерція не враховується. У більшості випадків це припустиме, оскільки електромагнітні перехідні процеси у колах змінного струму закінчуються протягом одного-двох періодів напруги живлення. Тому можна вважати, що дана математична модель ЛАД на основі схеми заміщення з достатньою адекватністю може використовуватися для опису квазідинамічних процесів, тривалість яких на один-два порядки більша тривалості періоду напруги живлення.

Результати моделювання. В процесі моделювання досліджувалися статичні (механічні) характеристики ЛАД та графіки перехідних процесів в лінійному електроприводі, що дало можливість оцінити вплив уточнюючих факторів моделі на величину пускового та критичного моментів, а також жорсткість механічних характеристик.

Як прототип для проведення досліджень було використано дослідний зразок ЛАД з коротким рухомих індуктором, розроблений для тягового електроприводу вагону метрополітену [10]. Його параметри і характеристики наведено у таблиці.

Моделювання статичних і динамічних режимів ЛАД в умовах повного перекриття. На наведених нижче рис. 11 та рис. 12 графіки позначені кольором: жовтим – без крайових ефектів, без насичення; червоним – з крайовими ефектами, без насичення; синім – з крайовими ефектами та насиченням.

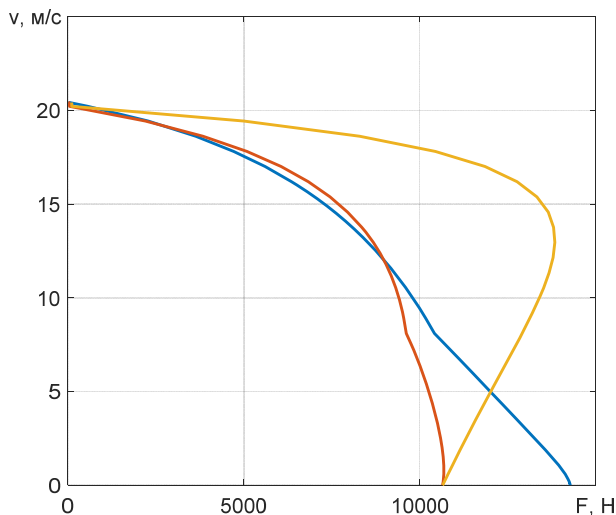


Рис. 11

Під час роботи на холостому ході різниця в характеристиках проявляється тільки в динаміці. При цьому наявність кінцевих ефектів і насичення має форсувальну дію за рахунок збільшення струмів індуктора. Після навантаження двигуна має місце статична похибка, величина якої визначається жорсткістю механічних характеристик. Насичення і кінцеві ефекти збільшують статичну похибку. Так з їх врахуванням статична похибка складає 3 м/с, а без врахування – 2 м/с. Крайові ефекти впливають на струми індуктора, вторинного елемента і намагнічення. З урахуванням крайових ефектів усталений струм під навантаженням складає 180 А, а без урахування – 140 А. Насичення також впливає на струм індуктора, але в межах 5 А в усталеному режимі. ККД ЛАД з урахуванням насичення, кінцевих ефектів і втрат у сталі в усталеному режимі знижується на 11%.

Величина ККД, яка інтегрально враховує всі параметри схеми заміщення, за результатами випробувань дослідного зразка ЛАД становить 0,68 [10], а розрахункове значення ККД, отримане шляхом моделювання з урахуванням кінцевих ефектів і насичення, також складає 0,68. Це дає підставу вважати, що результати моделювання відповідають фізичному експерименту.

Моделювання динамічних режимів ЛАД в умовах неповного перекриття індуктора. В деяких технічних рішеннях (наприклад, у транспортній системі Hyperloop) з метою виключення силового струмопідводу до рухомого транспортного засобу можливе використання довгого нерухомого секційованого індуктора, в якому активуються лише ті секції, які знаходяться в даний момент в роботі. В такому випадку окремі секції індуктора повинні розглядатися за тими ж принципами, що і ЛАД з короткими первинним і вторинним елементами.

Результати моделювання перехідних процесів в лінійному електроприводі під час проходження реактивною смугою, закріпленою на транспортному засобі, секцій індуктора з урахуванням явища неповного перекриття наведено на рис. 13. Відстань між секціями індуктора складала 3 м, довжина секції індуктора – 2,3 м, довжина реактивної смуги – 4,5 м.

На графіках показано процес послідовного проходження вторинним елементом чотирьох індукторів (рис. 4) під час руху з середньою усталеною швидкістю 20,2 м/с під навантаженням 1000 Н для випадків використання спрощеної та уточненої (з урахуванням крайових ефектів і насичення) моделей ЛАД, позначених відповідно червоним і синім кольором. Графіки швидкостей і зусиль показано у збільшеному масштабі. Різниця у швидкостях і зусиллях несуттєва, натомість різниця струмів індуктора з та без врахування крайових ефектів і насичення складає біля 100 А, що пояснюється збільшенням струму намагнічення внаслідок наявності ділянок неповного перекриття, а також дією кінцевих ефектів і насичення.

Механічні характеристики ЛАД для різних факторів уточнення моделі та їх сполучень показано на рис. 11.

Аналіз механічних характеристик свідчить про наступне:

- крайові ефекти перш за все впливають на величину критичного ковзання і жорсткість характеристик, але не впливають на величину пускового моменту. Так, у разі врахування крайових ефектів, критичний момент досягається за ковзання $s=1$;

- насичення магнітопроводу впливає як на величину пускового моменту, так і критичного ковзання.

Графіки перехідних процесів лінійного електроприводу за прямого пуску на холостому ході з наступним накиданням на 4 с номінального навантаження 4500 Н в умовах повного перекриття індуктора вторинним елементом показано на рис. 12.

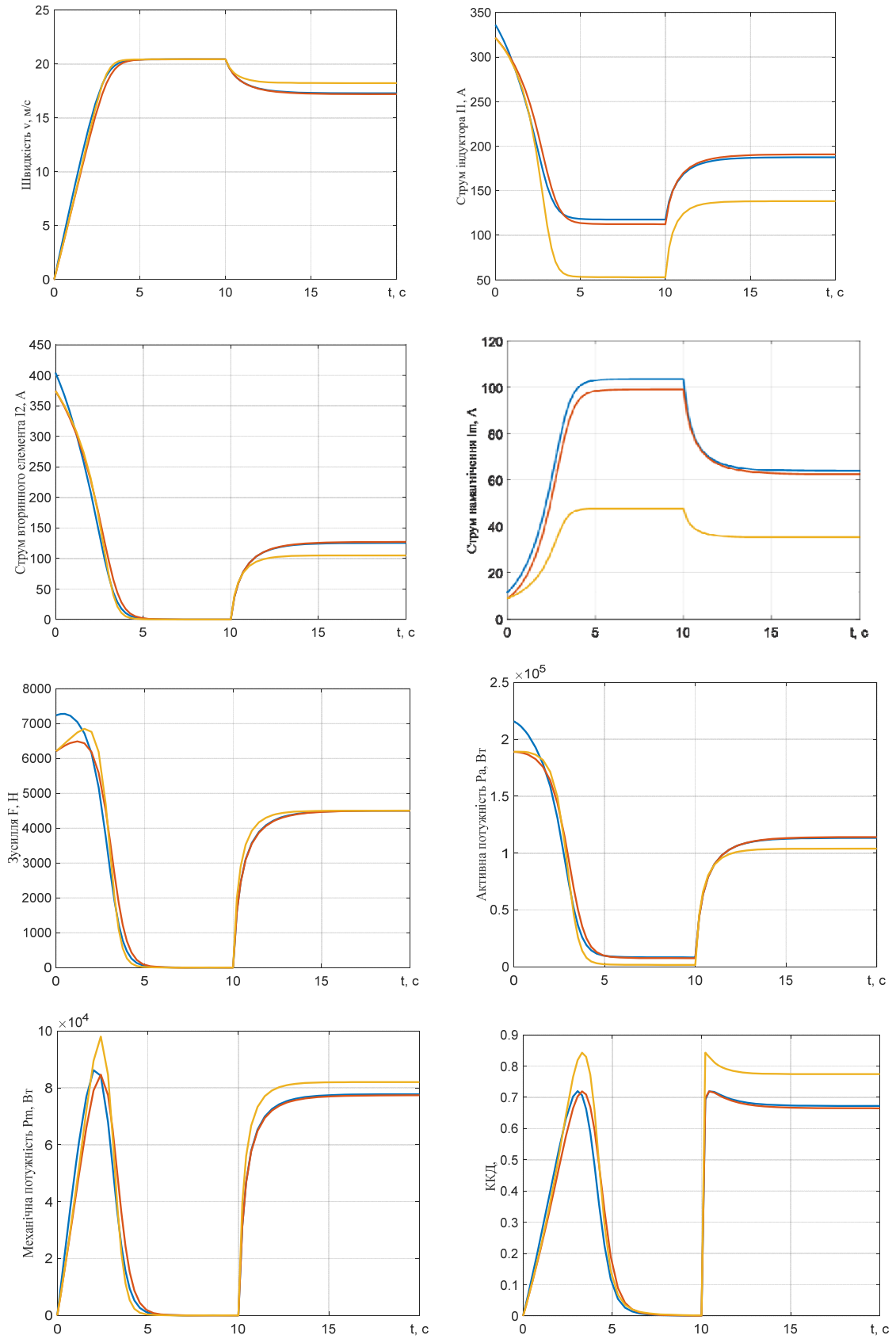


Рис. 12

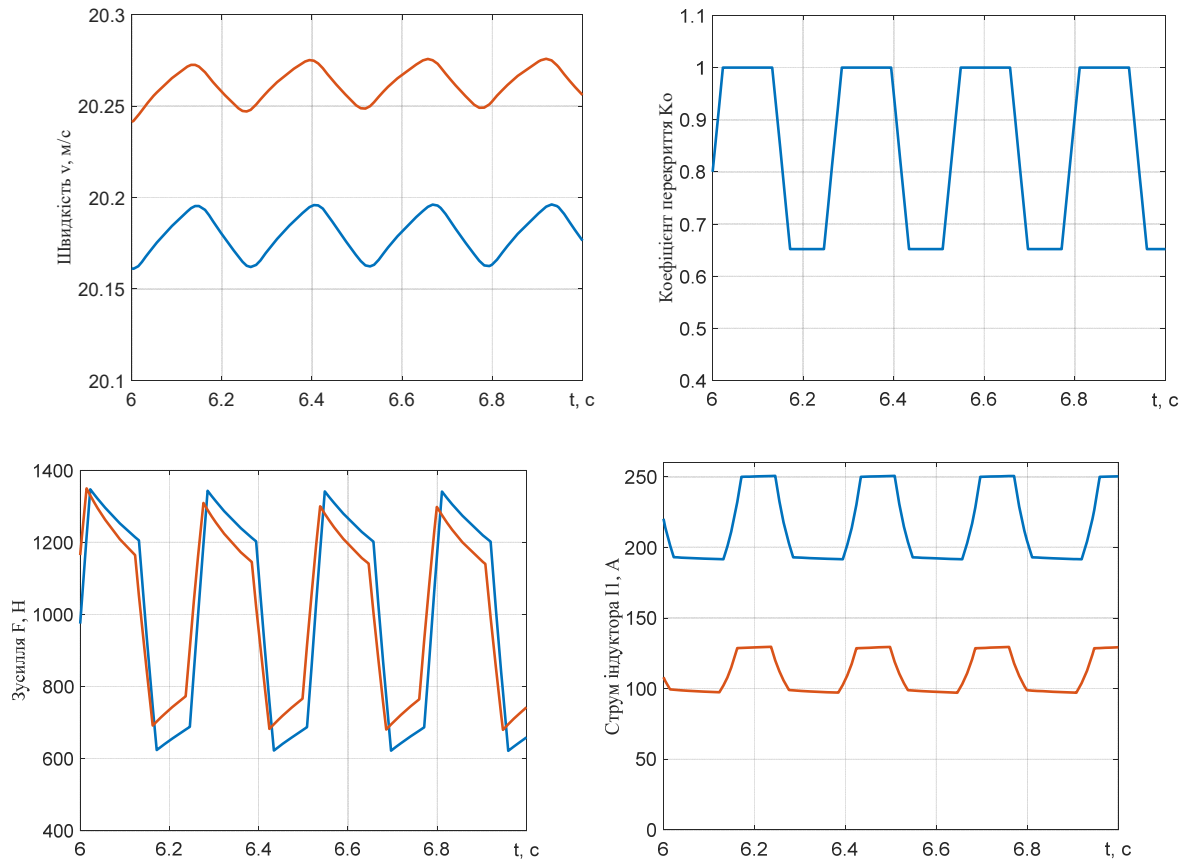


Рис. 13

Висновки.

1. Вдосконалено математичну модель лінійного асинхронного двигуна в напрямку врахування кінцевих ефектів, насичення магнітопроводу та неповного перекриття індуктора вторинним елементом та розроблено на її основі імітаційну модель електроприводу в пакеті Matlab.

Встановлено наступне:

- в усіх режимах роботи мають місце ділянки насичення магнітопроводу індуктора, в той час як зворотний магнітопровід, як правило, залишається ненасиченим;
- вплив кінцевих ефектів проявляється на завершальному етапі розгону і може не враховуватися під час роботи регульованого лінійного електроприводу на низьких швидкостях;
- насичення магнітної системи впливає на величину прискорення за рахунок збільшення перевантаження за струмом. В усталеному режимі наявність кінцевих ефектів і насичення призводить до додаткового збільшення струму індуктора.

2. Розроблена уточнена модель дає змогу оцінити вплив ефекту неповного перекриття у сполученні з іншими особливостями ЛАД. Під час дослідження та проектування систем лінійного електроприводу пріоритет врахування його особливостей має наступний вигляд: 1) ефект неповного перекриття; 2) насичення магнітопроводу; 3) крайові ефекти.

3. Адекватність розробленої математичної моделі підтверджується збігом отриманих результатів з розрахунками у граничних випадках, а також порівнянням з наявними результатами експериментальних досліджень обраного прототипу лінійного двигуна.

4. Запропонована методологія врахування режиму неповного перекриття індуктора дає змогу здійснювати проектування лінійних електроприводів з розривною шляховою структурою, яка складається з ряду окремих індукторів або відокремлених ділянок реактивної смуги (наприклад, ткацькі верстати, зони стрілочних переводів та секційовані індуктори транспортних засобів).

5. Результати досліджень свідчать про те, що задля дослідження ЛАД можливе використання узагальнених підходів, добре опрацьованих для класичних обертових електричних машин, у сполученні з обов'язковими уточненнями, які враховують специфіку лінійних електричних машин.

Роботу виконано в рамках державної науково дослідної роботи “База-П9” («Розробити засоби та алгоритми керування напругою, струмом і частотою в гібридних системах живлення електротехнологічних установок при неповній визначеності параметрів навантаження»), державний реєстраційний номер 0122U001808.

1. Попович М.Г., Лозинський О.Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. К.: Либідь, 2005. 680 с.
2. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.І., Рижков О.М., Теряев В.І., Красношарпа Н.Д. Комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени суднової радіолокаційної станції з нечітким регулятором швидкості. *Техн. електродинаміка*. 2023. № 3. С. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.060>.
3. Selcuk A.H., Kurum H. Investigation of End Effects in Linear Induction Motors by Using the Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 5. Pp. 1791-1795. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.918277>.
4. Nabiev F.M. Mathematical modeling of two-phase linear induction motors taking into account the end effects. *Bulletin of the Mykhailo Ostrohradsky State Pedagogical University*. 2008. No 4. Part 1.
5. Duncan J. Linear induction motor-equivalent-circuit model. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. 1983. Vol. 130. No 1. Pp. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-b.1983.0008>.
6. Amiri E. A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50. No 3. Pp. 120-128. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2285222>.
7. Teriaiev V., Dovbyk A., Kornienko V., Pechenik M., Buryan S. Generalized mathematical model of a linear induction motor. IEEE 41st International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*, Kyiv, Ukraine, 10-14 October 2022. Pp. 741-745. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927095>.
8. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
9. Мазуренко Л.И., Стаценко А.В. Учет насыщения магнитной системы асинхронного двигателя и его влияние на процесс разгона. *Вісник КДПУ*. 2007. № 3. С. 56-71.
10. Gang Lv, Shaoqiang Yan, Dihui Zeng, Tong Zhou. An equivalent circuit of the single-sided linear induction motor considering the discontinuous secondary. *IET Electric Power Application*. 2019. Vol. 13. No 1. Pp. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5184>.
11. Zhang Y., Ma M., Ma W., Lu J., Xu J., Sun Z. Analysis of saturation characteristics of double-stator linear induction motors. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 2012. Vol. 32. Pp. 102-108.
12. Ooi B., White D. Traction and Normal Forces in the Linear Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1970. Vol. 89. No 4. Pp. 638-645. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpas.1970.292611>.

FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF A LINEAR INDUCTION MOTOR WITH SHORT INDUCTOR AND SECONDARY

V.I. Teriaiev¹, A.Y. Dovbyk¹, O.A. Zaichenko²

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: kpivit@gmail.com; anton.dovbyk@gmail.com.

²Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: tems@ukr.net.

Based on the refined mathematical model of the linear induction motor, which considers the end effects, the saturation of the magnetic field and the incomplete overlap of the inductor by the secondary element, a simulation model of the electric drive was created in the Matlab package. A simulation of the linear electric drive operation was carried out, which takes into account the effect of the input-output of the secondary element from the magnetic field of the inductor. The obtained results of the studies confirm the efficiency of the developed model and its suitability for carrying out refined modeling and synthesis of the control laws of the linear electric drive. References 12, figures 13, table 1.

Key words: linear induction electric drive, modeling, end effects, saturation of the magnetic field, incomplete overlap of the inductor, research, statics, dynamics.

1. Popovich M.G., Lozinskii O.Yu. Electromechanical automatic control systems and electric drives. Kyiv: Lybid, 2005. 680 p.

2. Stiazhkin V.P., Zaichenko O.A., Gavryluk S.I., Ryzhkov O.M., Teriaiev V.I., Krasnoshapka N.D. Combined control of gearless arc-core ship radar antenna electric drive with fuzzy logic regulator. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/teched2023.03.060>.
3. Selcuk A.H., Kurum H. Investigation of End Effects in Linear Induction Motors by Using the Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 5. Pp. 1791-1795. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.918277>.
4. Nabiev F.M. Mathematical modeling of two-phase linear induction motors taking into account the end effects. *Bulletin of the Mykhailo Ostrohradsky State Pedagogical University*. 2008. No 4. Part 1.
5. Duncan J. Linear induction motor-equivalent-circuit model. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. 1983. Vol. 130. No 1. Pp. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-b.1983.0008>.
6. Amiri E. A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50. No 3. Pp. 120-128. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2285222>.
7. Teriaiev V., Dovbyk A., Kornienko V., Pechenik M., Buryan S. Generalized mathematical model of a linear induction motor. IEEE 41st International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*, Kyiv, Ukraine, 10-14 October 2022. Pp. 741-745. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927095>.
8. Voldek A.I. *Electrical machines*. Leningrad: Energy, 1978. 832 p.
9. Mazurenko L.I., Statsenko A.V. Accounting of the saturation of the magnetic system of an induction motor and its influence on the acceleration process. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*. 2007. No 3. Pp. 56-71.
10. Gang Lv, Shaoqiang Yan, Dihui Zeng, Tong Zhou. An equivalent circuit of the single-sided linear induction motor considering the discontinuous secondary. *IET Electric Power Application*. 2019. Vol. 13. No 1. Pp. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5184>.
11. Zhang Y., Ma M., Ma W., Lu J., Xu J., Sun Z. Analysis of saturation characteristics of double-stator linear induction motors. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 2012. Vol. 32. Pp. 102-108.
12. Ooi B., White D. Traction and Normal Forces in the Linear Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1970. Vol. 89. No 4. Pp. 638-645. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpas.1970.292611>.

Надійшла 18.09.2023
Остаточний варіант 06.11.2023