
Особливість використання лінійних електродвигунів та методи розрахунку параметрів

Тетяна Павлівна Павленко

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0000-0002-2356-4066

Надія Ярославівна Габльовська

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0000-0001-6204-9713

Юрій Анатолійович Кубієвич

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0009-0002-9566-0345

Для цитування цієї статті:

Павленко Тетяна Павлівна, Габльовська Надія Ярославівна, Кубієвич Юрій Анатолійович. Особливість використання лінійних електродвигунів та методи розрахунку параметрів. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 4, 2023, pp. 58-70. doi:10.46299/j.isjea.20230204.07.

Надійшла до редакції: 29 травня 2023 р.; **Схвалено:** 24 червня 2023 р.;

Опубліковано: 01 серпня 2023 р.

Анотація: Одне з основних науково-пошукових напрямків по розробці більш досконалих елементів приводу є використання електричних машин лінійного переміщення. Актуальність даного напрямку обумовлена різноманітністю завдань для електропривідних систем та кінематичними ланцюгами, що призводить до невиправдано складних і громіздких їх конструкцій. Відсутність перетворювача та вид руху дозволяє електроприводу з лінійними електродвигунами успішно конкурувати з іншими типами приводів у ряді областей техніки (автоматики, приладобудування, робототехніці, медтехніці тощо). Одним з перспективних завдань є здійснення поступального переміщення робочого органу механізму, де застосовується лінійний електродвигун. На основі проведеного аналізу використання лінійних двигунів в електромеханічних конструкціях доведено доцільність їх широкого використання. Проаналізовано конструкційні особливості такого типу двигунів та наведено методи розрахунку основних параметрів.

Ключові слова: електропривідна система, лінійний двигун, структура, прямий привід, магнітне поле, струмове навантаження.

1. Вступ

Якісний розвиток систем автоматизованого електричного приводу при дотриманні режиму економії залежить від підвищення ефективності, зростання продуктивності праці та умов вирішення завдань щодо автоматизації виробництва. Це забезпечує найширше

впровадження та застосування гнучкої технології, і створення сучасних механізмів нового типу.

На цей час існують теоретичні та практичні опрацювання в галузі конструювання та дослідження процесів у різних типах лінійних електродвигунів. Увагу розробників привертають лінійні двигуни постійного струму або синхронні лінійні двигуни (з залежним або незалежним перетворювачем частоти).

Вибір таких двигунів обумовлюється необхідністю забезпечення широкого діапазону регулювання, сталої роботи на низьких швидкостях та використання існуючих силових і керуючих пристроїв приводу постійного струму.

Для більшості механізмів переважне розповсюдження отримали асинхронні лінійні двигуни, простота конструкції яких забезпечує порівняно меншу вагу і вартість виконавчого елемента.

2. Об'єкт і предмет дослідження

В різноманітних галузях промисловості існує необхідність безпосереднього здійснення поступального руху виконуючих органів робочих машин. Для цієї мети доцільним є застосування лінійних двигунів, що є об'єктом досліджень. Основними перевагами таких двигунів 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.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення особливостей використання лінійних двигунів в різних пристроях, аналіз конструкцій та ознайомлення з методами розрахунку основних параметрів.

4. Аналіз літератури

У більшості електроприводів (ЕП) використовуються двигуни обертового руху. При використанні їх для приводу робочих машин та механізмів з поступальним рухом виконавчих органів (механізмів подач металообробних верстатів, пересування мостових кранів, ковальсько-пресових машин, транспортерів, засувок тощо) потрібно застосування механічних передач для перетворення обертового руху валу в поступальний. До них відносяться кривошипно - шатунний механізм, передачі шестерня - рейка, гвинт - гайка та ін.

Отже, з'явилося прагнення використовувати в електроприводах двигун поступального руху, що дозволило б відмовитися від застосування механічної передачі. Це сприяє підвищенню технічних показників роботи електроприводів і технологічного обладнання. Таке прагнення реалізується шляхом створення лінійних двигунів постійного та змінного струму [1-3].

У багатьох практичних випадках застосування лінійного електроприводу потребує нових проектних розробок всього виробничого механізму. Тому до проектування лінійного електродвигуна та використання його у промислових установках слід підходити індивідуально. Особливість конструкції лінійних двигунів та область застосування потребує створення необхідних вимог.

Електроприводи з лінійними двигунами коротко називають прямим приводом. В цілому - це електрична машина з безпосереднім перетворенням електромагнітної енергії на лінійне або поворотне переміщення. Область застосування прямого приводу дуже різноманітна – це виробництво напівпровідникових виробів та радіоелектроніки, системи переміщення предметів, медична техніка, обладнання для торгівлі та побутова техніка, електротранспортні

системи, обладнання для пакування, промислові верстати та технологічне обладнання, поліграфічне обладнання та розмножувальна техніка, військова техніка.

В даний час існує безліч конструктивних різновидів лінійних асинхронних двигунів (ЛАД), які є невід'ємною частиною виробничого механізму. Це накладає конкретні вимоги щодо його конструктивного виконання.

Наприклад, при промисловій частоті якісна межа між високошвидкісними та тихохідними двигунами проходить там, де полюсний поділ становить приблизно 0,03 м, а синхронна швидкість – 3 м/с. Але більшість ЛАД промислових установок відповідно до вимог технологічного процесу і за умовами безпечної роботи повинні мати робочі швидкості менше 3 м/с.

Ця вимога відноситься до електроприводів електротермічних установок: штовхачів, виштовхувачів, механізмів відчинення та закривання дверей, а також окремих механізмів гнучкого автоматизованого виробництва (кантувачів, скидачів). Полюсні поділки менше 0,03м при трифазній обмотці та нормальній зубова-пазовій структурі виготовити дуже важко.

Робочі швидкості руху (0,02-2м/с) забезпечуються шляхом зниження частоти. Забезпечення низької швидкості руху можливо при роботі ЛАД з великим ковзанням, шляхом зміни напруги або частоти.

Лінійні двигуни мають ряд переваг, що сприяє їх широкому застосуванню:

- точність позиціонування області нанометрів, висока рівномірність ходу, висока статична жорсткість приводу. Сумарна похибка по координаті трохи більше 10 мкм при величині переміщення до 1м;
- динамічність, високі прискорення, високі кінцеві швидкості до 9 м/с;
- надійність, відсутність зносу та висока точність протягом усього терміну служби виробу, низькі рівні шуму та вібрації, мала кількість компонентів, що утворюють систему;
- компактність, малі габарити, легка інтеграція в існуючі конструкції;
- гнучкість, програмне управління та переналагоджування, системи з кількома рухомими каретками та багатокоординатні системи, мала кількість компонентів у системі, простота, зручність монтажу та налаштування [4-8].

Особливість конструкції та переваги розкривають можливість широкого застосування лінійних двигунів у будь яких галузях. Це сприяє створенню нових конструкцій, які використовуються в електроприводних системах.

Наприклад, лінійні електродвигуни серії RACO COMPACT відомі завдяки своїм невеликим розмірам та великою потужністю (рис. 1). Конструкція RACO COMPACT добре підходить для дуже частих і повторюваних рухів. Наявні моделі перебивають потужності у широкому діапазоні (зусилля до 4 т). RACO COMPACT з двигуном змінного струму розраховані на напругу 230 VAC / 400 VAC або 24 VAC [3].



Рис.1. Перспективна конструкція лінійного двигуна та електропривод компанії RACO COMPACT [3].

Перспективною концепцією в автомобілебудуванні є використання двигуна з вільним поршнем (рис. 2), який напрями з'єднаний з лінійним електричним генератором [9]. Такий двигун набагато компактніший і надійний у порівнянні з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ). Потенціал цієї системи можна використовувати як частину гібридно-електричного транспортного засобу для застосування в автомобілях, важкому транспорті, системах комбінованого виробництва тепла та електроенергії. Такі двигуни розвивають потужність 40 кВт. Високий ККД таких двигунів досягається за рахунок зниження негативних внутрішніх втрат. Тому що відсутні обертальні частини, які мають значну інерцію.

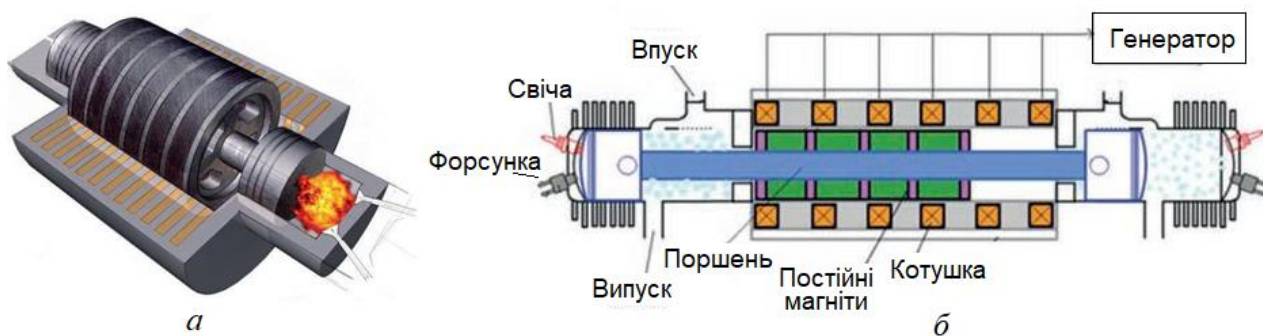


Рис.2. Конструкція лінійного генератора з вільним поршнем (а) та основні елементи (б) [9].

На кожен цикл роботи двигуна приходять два робочих такти. Такі двигуни (рис.2) можуть працювати на будь-якому виді пального: рідкого або газоподібного.

В цілому система лінійний генератор з вільним поршнем – це є перетворювач енергії, який побудований на базі вільнопоршневого ДВЗ. Така система складається з внутрішньої камери згорання палива, лінійної електричної машини та пристрою відскоку.

Під час роботи системи пальне спалюється в лінійному генераторі з вільним поршнем. Поршень має постійні магніти, які переміщуються відносно котушок завдяки газам палива. В результаті, відповідно до процесів перетворення, створюється електрична енергія.

Особливість конструкції поршневого блоку дозволяє вільне переміщення поршня в камері двигуна за рахунок дії пневматичної пружини.

Хімічна енергія палива використовується для лінійного руху за рахунок поршневого магніту вздовж статора та електромагнітної системи. У порівнянні з традиційною системою новий перетворювач енергії не має кривошипно-шатунного механізму, що призводить до спрощення її конструкції і надійності.

Генератор з вільним поршнем двигуна – це нова система вироблення електроенергії, яка розроблена для електромобілів і є найбільш ефективною у порівнянні зі звичайними двигунами. Для забезпечення стабільної роботи системи та зворотно-поступальним рухом поршня використовуються контролери ітеративного керування.

З розвитком технології виготовлення постійних магнітів, зокрема з появою таких сплавів, як самарій-кобальт і неодим-залізо-бор, отримали розвиток електричні машини з постійними магнітами. На цей час вентильні електроприводи з двигунами із збудженням від постійних магнітів є найефективнішими та найдинамічнішими. На сьогодні спостерігається бурхливий розвиток систем із безпосереднім приводом на основі вентильних двигунів.

Це стосується і двигунів обертального руху та лінійних двигунів. Лінійні вентильні двигуни безпосереднього приводу мають замінити всілякі передавальні пристрої в системах автоматичної обробки та точного позиціонування.

У вентильному двигуні (ВД) індуктор знаходиться на роторі (у вигляді постійних магнітів), якірна обмотка знаходиться на статорі. Напряга живлення обмоток двигуна формується залежно від положення ротора. Якщо в двигунах постійного струму для цієї мети

використовувався колектор, то у вентильному двигуні його функцію виконує напівпровідниковий комутатор [10, 11].

Основною відмінністю ВД від синхронного двигуна є його самосинхронізація за допомогою датчика положення ротора (ДПР). Внаслідок чого у ВД, навпаки, частота обертання поля пропорційна частоті обертання ротора, а частота обертання ротора залежить від напруги живлення.

Зараз можна виділити два основні принципово різні типи лінійних вентильних двигунів: з феромагнітним і немагнітним якорем (рис. 3).



Рис.3. Конструкції вентильних лінійних двигунів з феромагнітним (а) і немагнітним (б) якорем [10].

Лінійні вентильні двигуни з феромагнітним якорем набули значного розвитку. Зараз компанії виробники таких двигунів можуть запропонувати машини з тяговими зусиллями від 200 Н до 20кН. Це перекриває значний діапазон завдань навіть важкого верстатобудування. Область застосування цих двигунів поступово розширюється і включає вже будь-яке верстатне обладнання. Таке становище вимагає швидких та стабільно точних переміщень. Наприклад, цей принцип закладений в установці для лазерного різання та у багатофункціональних верстатах, що призначені для твердого точіння та шліфування. Такі верстати мають високу динаміку лінійних двигунів, а при шліфуванні - високу точність переміщень. Відсутність зносу і можливість виконання частих швидких і коротких ходів особливо затребувані в шліфувальних верстатах.

Саме для таких функцій індуктор лінійного вентильного двигуна (ЛВД) виконаний у вигляді розімкнутої смуги постійних магнітів (рис.3, а). Якір складається з багатофазної системи обмоток і феромагнітної пластини, яка замикає потік індуктора. Транспортна плита разом з якорем здійснює зворотно-поступальні рухи по лінійним напрямним коченням. Через гнучкий кабель-канал до якоря і датчика підведені кабелі для живлення обмоток і створення зворотного зв'язку (сигналів датчика лінійного переміщення). Така конструкція ЛВД стала наслідком прямого розгортання синхронної машини обертального руху з постійними магнітами в площину.

З розвитком напрямків лазерної і термічної обробки розроблено принципово нову конструкцію лінійних вентильних двигунів. Вимоги скорочення втрат у перетворенні енергії та збільшення номінальних швидкостей і прискорень призвели до появи та активної розробки ЛВД з немагнітним якорем (рис.3, б).

На відміну від попереднього двигуна, ЛВД з немагнітним якорем не містить магнітопровідних частин (через це він так і названий) та виконаний у вигляді системи багатофазних обмоток. Індуктор виконаний у вигляді двох сталевих пластин, із встановленими на них постійними магнітами та скріпленими в єдиний блок, який у перерізі нагадує букву U.

Лінійні двигуни знайшли широке застосування у машинах ударної дії, наприклад, палезабивних молотів (рис.4), які застосовуються при дорожніх роботах і будівництві [13].



Рис.4. Перспективне використання лінійного двигуна для машин ударного типу.

Статор лінійного двигуна розташовується на стрілі молота і може переміщатися напрямними стрілами у вертикальному напрямку за допомогою лебідки. Ударна частина молота є вторинним елементом двигуна. Для підйому ударної частини молота двигун вмикається таким чином, щоб поле було спрямоване вгору. При підході ударної частини до верхнього крайнього положення двигун відключається і ударна частина опускається вниз на палю під дією сили тяжіння. У деяких випадках двигун не вмикається, а реверсується, що дозволяє збільшити енергію удару.

У міру заглиблення палі статор двигуна переміщується вниз за допомогою лебідки. Електричний молот простий у виготовленні, не вимагає підвищеної точності виготовлення деталей, нечутливий до зміни температури і може працювати практично миттєво.

Амплітуда коливань якоря ЛД на частоті власних коливань ω_0 (коли відсутня сила інерції) визначається при прирівнянні механічної роботи W_{mec} до роботи сил в'язкого тертя W_b , тобто $W_{mec} = W_b$. [13, 14].

Механічна робота на інтервалі руху якоря від положення амплітуди коливань $-X_{am}$ до X_{am} (за умови синусоїдного струму):

$$W_{mec} = \int_{-X_{am}}^{X_{am}} F_e(x_a, i) dx_a = \frac{F_{em} \pi X_{am} (\tau^2 - X_{am}^2)}{2\tau^2}, \quad (1)$$

де F_e – електромагнітна сила; x_a – переміщення якоря; i – струм ЛД; τ – полюсна поділка. Робота сил в'язкого тертя F_b (залежить від швидкості) за півперіод:

$$W_b = \int_0^{T/2} F_b v_a dt = b \int_0^{T/2} v_a^2 dt = \frac{b\omega X_{am}^2 \pi}{2}, \quad (2)$$

де v_a – швидкість якоря; b – коефіцієнт тертя; ω – кутова швидкість коливань і струму ЛД. Отже,

$$\frac{b\omega X_{am}^2 \pi}{2} = \frac{F_{em} \pi X_{am} (\tau^2 - X_{am}^2)}{2\tau^2} . \quad (3)$$

Відповідно (3), амплітуда коливань:

$$X_{am} = \frac{-\tau^2 b \omega \pm \sqrt{\tau^4 b^2 \omega^2 + 4F_{em}^2 \tau^2}}{2F_{em}} .$$

Враховуючи, що кутова швидкість коливань $\omega = \sqrt{k/m_a} = \omega_0$ залишаючи додатній корінь, отримується:

$$X_{am0} = \frac{\tau \sqrt{\frac{\tau^2 b^2 k}{m_a} + 4F_{em}^2} - \tau^2 b \sqrt{\frac{k}{m_a}}}{2F_{em}} , \quad (4)$$

де k – коефіцієнт жорсткості пружин вібратора; m_a – маса якоря. Механічна потужність вібратора:

$$P_{mec} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} F_b v_a dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} b v_a^2 dt = \frac{b\omega^2 X_{am}^2}{2} , \quad (5)$$

$$P_{mec0} = \frac{b\omega_0^2 X_{am}^2}{2} = \frac{bkX_{am}^2}{2m_a} \quad (6)$$

Необхідне значення механічної потужності та амплітуди забезпечується відповідним значенням електромагнітної сили F_{em} . Оскільки остання залежить від струму, то джерело живлення ЛД має забезпечувати необхідний рівень струмового навантаження, яке визначається напругою джерела. У випадку роботи вібратора в значному діапазоні частоти коливань необхідно враховувати спосіб зміни напруги живлення в залежності від частоти.

Основною сферою застосування лінійних синхронних двигунів є високошвидкісний електричний транспорт (рис.5).

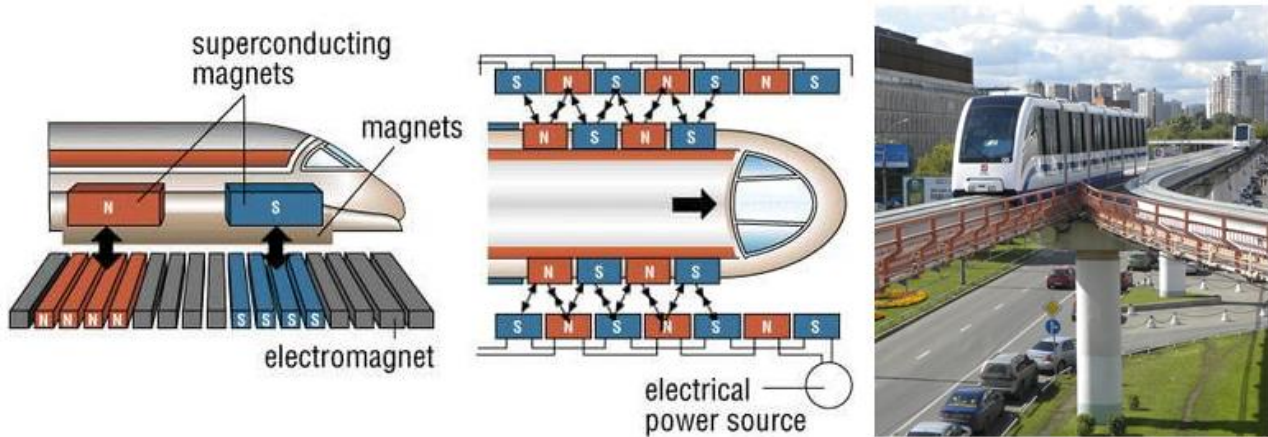


Рис.5. Елементи лінійного синхронного двигуна вагону потяга.

За умови нормальної експлуатації такого транспорту необхідно мати порівняно великий повітряний зазор між рухомою частиною та вторинним елементом. У такому виді транспорту застосовується синхронний лінійний двигун, який має високі енергетичні параметри, а саме $\cos\phi$, який близький до одиниці і високий ККД, що досягає 96%.

Застосування синхронних лінійних двигунів у високошвидкісному транспорті поєднується, як правило у потягах, з магнітною підвіскою вагонів та застосуванням надпровідних магнітів і обмоток збудження. Це дозволяє підвищити комфортабельність руху та економічні показники роботи рухомого складу.

У потягах під дном вагона кріпляться потужні магніти в сантиметрах від Т-подібного сталевих полотна (рис. 5).

Під час руху потяга магнітний потік, що проходить через контур полотна, постійно змінюється. В результаті з'являються індукційні струми, які створюють потужне магнітне поле, що відштовхує магнітну підвіску потяга. Під дією левітації відбувається притягування різних полюсів магнітів і відштовхування однакових полюсів. Спеціальна система постійно зберігає величину зазору 15 міліметрів між магнітами. При збільшенні зазору система підвищує силу струму в несучих магнітах і наближає вагон до полотна, при зменшенні знижує силу струму, і зазор збільшується. Також на електромагнітні елементи встановлюють спеціальні батареї, що дозволяють потягу левітувати під час зупинки.

Рух поїзда здійснюється лінійним двигуном. По черзі включаються обмотки статора, створюючи магнітне поле. Статор поїзда втягується у поле і рухає весь склад. При цьому із частотою 4000 разів на секунду відбувається зміна полюсів на магнітах шляхом попереминої подачі струму. Зміна сили та частоти струму дозволяє регулювати швидкість потяга.

5. Методи та результати досліджень

Для забезпечення можливості раціонального вибору конструктивних параметрів лінійного синхронного двигуна високошвидкісного магнітолевітуючого екіпажу зі збудженням від джерела постійного магнітного поля, використовується обернена задача з некоректними умовами. У таких випадках застосовується методика визначення тягового зусилля, яке виникає при взаємодії магнітного поля збудження зі струмом у котушках шляхової структури.

Для спрощення розрахунку параметрів та створення рівнянь напруг, струмів і потокозчеплень ЛСД додаються припущення [15]:

– активні опори, власні і взаємні індуктивності фазних обмоток не залежать від величини, частоти і форми струмів, які протікають у них;

– з'єднувальні дроти між окремими котушками колійних обмоток не мають магнітного зв'язку з електричними контурами, а їхні власні параметри враховуються в параметрах фазних обмоток;

– фазні обмотки ЛСД симетричні, тобто мають однакову конструкцію і однакові просторові зміщення один щодо одного;

– не враховується крайовий ефект, обумовлений скінченим числом котушок шляхової обмотки ЛСД;

– не враховується зміна намагнічуваності постійних магнітів, яка обумовлена впливом магнітного поля котушок шляхової обмотки ЛСД;

– нехтується вплив вихрових струмів, що наводяться в матеріалі котушок шляхової обмотки ЛСД;

– перемикання напруги в безпосередньому перетворювачі частоти (БПЧ) відбувається миттєво;

– припускається, що напруга, яку видає БПЧ на фазу не пульсує (випрямлена), та є постійною.

За таких припущень рівняння напруг ЛСД, що має трифазну шляхову обмотку, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} U_A &= r_A i_A + L_{aa} \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Af}}{dt}; \\ U_B &= r_A i_B + L_{aa} \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Bf}}{dt}; \\ U_C &= r_A i_C + L_{aa} \frac{di_C}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + \frac{d\psi_{Cf}}{dt}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $U_A, U_B, U_C, i_A, i_B, i_C$ – миттєві значення фазних напруг і струмів;

r_a, L_{aa}, M_a – активні опори, власні і взаємні індуктивності фазних обмоток;

ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокозчеплення фазних обмоток, яке обумовлено потоком збудження.

Трифазна система періодичних несинусоїдальних напруг, вхідних до затискачів шляхової обмотки ЛСД і потокозчеплення системи збудження з котушкою шляхової структури:

$$\begin{aligned} U_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2U_n} \cos(n\omega t + \beta_n); & \psi_{Af} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} x; \\ U_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2U_n} \cos\left(n\omega t - n \frac{2\pi}{3} + \beta_n\right); & \psi_{Bf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3}\right); \\ U_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2U_n} \cos\left(n\omega t + n \frac{2\pi}{3} + \beta_n\right), & \psi_{Cf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left(x + \frac{2\tau}{3}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

де U_n, β_n – діюче значення і фазовий кут n -ої гармоніки напруги;

ω – кутова частота живлячої напруги, яка пов'язана з його періодом T співвідношенням $\omega = 2\pi/T$. Постійна складова і амплітуди гармонік потокозчеплення залежать від струму намагнічування $i_f \psi_n = i_f \cdot A_n$ ($n = 0, 1, \dots$).

ЕРС з урахуванням $v = dx/dt$ при діючому значенні n -ої гармоніки:

$$E_n = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{\pi}{\tau} v \psi_n.$$

За таких позначень ЕРС, що наводиться у фазах шляхової обмотки і вимушені складові струмів характеризуються співвідношенням:

$$\begin{aligned} e_A &= -\frac{d\psi_{Af}}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2}\right); & i_A &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x}; \\ e_B &= -\frac{d\psi_{Bf}}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right); & i_B &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3}\right)}; \\ e_C &= -\frac{d\psi_{Cf}}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right); & i_C &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} \left(x + \frac{2\tau}{3}\right)} \end{aligned} \quad (9)$$

де \bar{I}_n – комплекс діючого значення n -ої гармоніки фазного струму, $j = \sqrt{-1}$

Якщо представити аналогічним чином в комплексній формі вирази для напруг (8) і ЕРС (9) на підставі співвідношень (7) отримується рівняння напруг для n -ої гармоніки:

$$U_n e^{jn\omega t} e^{j\beta_n} = r_a \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x} + jn \frac{\pi}{\tau} v L_{an} \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x} + jE_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x}, \quad (10)$$

де L_{an} – індуктивність фазної обмотки для n -ої гармоніки:

$$L_{an} = L_{aa} + 2M_a \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right).$$

Поточне зміщення висів обмоток :

$$x = x_0 + vt = x_0 + \frac{\pi}{\tau} \omega t,$$

де x_0 – зсув обмотки збудження відносно обмотки фази А під час $t = 0$.

Якщо ввести позначення:

$$\beta_n - n \frac{\pi}{\tau} x_0 = \theta_n + \frac{\pi}{2}; \quad nL_{an} = x_{an}; \quad r_a + jx_{an} = \bar{Z}_n$$

та з урахуванням (10) отримується співвідношення:

$$U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)} = \bar{Z}_n \bar{I}_n + jE_n \quad \text{або} \quad \bar{U}_n = \bar{Z}_n \bar{I}_n - \bar{E}_n,$$

$$\text{де} \quad \bar{U}_n = U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)}; \quad \bar{E}_n = -jE_n.$$

На підставі останніх співвідношень для n -ої гармоніки струму:

$$\overline{I_n} = \frac{U_n e^{j(\theta_n + \frac{\pi}{2})} - E_n e^{j\frac{\pi}{2}}}{\overline{Z_n}} = \overline{U_n - (-E_n)}. \quad (11)$$

Сили, що діють на обмотку збудження ЛСД і пов'язаний з нею транспортний засіб, визначаються співвідношенням:

$$f_q = \left(i_A \frac{\partial \psi_{Af}}{\partial q} + i_B \frac{\partial \psi_{Bf}}{\partial q} + i_C \frac{\partial \psi_{Cf}}{\partial q} \right); \quad q = x, y, z. \quad (12)$$

Постійні складові зусиль, що діють на обмотку збудження ЛСД, визначається доданками, що мають однаковий порядок гармонік струму і взаємної індуктивності:

$$\begin{aligned} F_x &= -\frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn}; \\ F_y &= -\frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{yn} \cos \theta_{mn}; \\ F_z &= -\frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{zn} \cos \theta_{mn}. \end{aligned} \quad (13)$$

Механічна потужність, що розвивається ЛСД, і рівна їй електромагнітна потужність:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ем}} = F_x = -\frac{3}{\sqrt{2}} v \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n E_n \sin \theta_{mn}. \quad (14)$$

Активна і повна потужність, що підводиться до шляхової обмотки ЛСД:

$$P_a = P_{\text{мех}} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 r_a = 3 \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n, \quad S = 3 \left(\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Таким чином, показані співвідношення частини математичної моделі ЛСД для стаціонарних режимів дозволяють розрахувати параметри при довільному характері струму в шляховій обмотці або напруги на її затискачах. Для розрахунку характеристик ЛСД необхідно визначити амплітуди гармонік потокозчеплення джерела постійного магнітного поля збудження з котушками шляхової структури лінійного двигуна тощо.

Високошвидкісний наземний транспорт з лінійним електроприводом у сполученні з магнітним підвісом забезпечує можливість безконтактного руху. Такий від транспорту складає достойну конкуренцію авіаційному, автомобільному та залізничному транспорту, перш за все з точки зору безпеки, екологічності, безшумності, можливості доставки пасажирів та вантажів безпосередньо в пункти призначення, без пересадок на інші види транспорту.

6. Висновки

В роботі проаналізовано загальне використання лінійних двигунів у будь яких електромеханічних конструкціях. Але на даний час їх використання набагато ширше. Наприклад, у верстатах, в приводах з кроковими та вентильним двигунами, у сучасних електроприводних системах ліфтових установок, воєнної техніки тощо. На цей час світ працює над створенням високошвидкісного міського та міжрегіонального транспорту. Наприклад, новим напрямком високошвидкісного наземного транспорту є поєднання вакуумного транспорту з лінійним електроприводом і магнітною подушкою – так звана система Hyperloop (гіперпетля). Принцип роботи такого транспорту побудований на ідеї подолання аеродинамічного опору. В результаті значення швидкості може досягати від 500 до 1200 км/год в залежності від ландшафту і близькості повороту.

Таким чином, лінійні двигуни практично досягають можливості заміни обертальних двигунів під час поступального лінійного переміщення робочого органу механізму. Розширення області їх використання є актуальною задачею, яку вирішує сучасний цивілізований світ. Про це свідчать створення багатьох конструкцій електропривідних систем на базі роботи лінійних двигунів.

Список літератури:

- 1) Теряев В.И., Островерхов М.О. (2010). Частотне керування лінійним асинхронним двигуном Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). Частина 1 Електромеханічні системи та автоматизація. С 45-47
- 2) Попович М.Г., Лозинський О.Ю. (2005) Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи – Київ : «Либідь», 680 с.
- 3) <https://raco.de/en/compact-dc-electric-actuators/type/k6n4-dc-148523-516>
- 4) Теряев В.И., Островерхов М.О. (2011). Алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів. Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. 32 – 34.
- 5) В.В. Чумак, .А. Коваленко, І.В. Ткачук (2019). Математичне моделювання лінійного двигуна для сепаратора лому кольорових металів. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 2. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 99-108.
- 6) Yuichiro Nozaki, Terufumi Yamaguchi, Takafumi Koseki (2015) Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motor with Parameters Depending on Secondary Speed for Urban Transportation System, , The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan.
- 7) G. Kang, K. Nam (2005) Field-oriented control scheme for linear induction motor with end effect. IEE proceedings – Electric power applications, Vol.152, №6.
- 8) FANG You-tong, FAN Cheng-zhi (2007) Single neuron network PI control of high reliability linear induction motor for Maglev. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 8(3), 408-411.
- 9) <https://what.com.ua/liniinii-generator-pristrii/>
- 10) Karii M. O., Pavliuchenko V. L., Zhuikov V. Y., Verbytskyi Y. V., Yamnenko Y. S. (2018). Elektropyvid z ventylno-induktornym elektrodvyhunom [Electric drive with switched-reluctance motor], Patent UA 127633 U.
- 11) Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розискулов С.С., Белецкий О.А. (2014) Метод регулирования и стабилизации динамических параметров разрядных токов накопительных конденсаторов. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Київ. Вип. 38. 145–155.
- 12) Шавьолкін О.О. (2015). Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. Посібник. Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. 403.

13) Бондар Р.П. (2019). Дослідження характеристик магнітоелектричного лінійного вібраційного двигуна при роботі на пружно-в'язке навантаження. Електротехніка і електромеханіка. № 1. 9-16.

14) Р.П.Бондар, Г.М.Голенков, О.Ю.Литвин, О.Д.Подольцев (2013) Моделювання енергетичних характеристик вібратора з лінійним електчним приводом. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Кременчук №2. 66-74.

15) В.Ф. Новіков, С.В. Бурилов, В.Е. Воскобойник, В.О. Дзензерський (2016). Математична модель силової установки для високошвидкісного транспортного засобу. Вісник Академії митної служби України. Дніпропетровськ. №2. 53-59.

The peculiarity of using linear electric motors and methods of calculating parameters

Tatiana Pavlenko

Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0000-0002-2356-4066

Nadiia Hablovska

Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0000-0001-6204-9713

Yurii Kubiievych

Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0009-0002-9566-0345

Abstract: One of the main scientific and research directions for the development of more advanced drive elements is the use of electric machines of linear movement. The relevance of this direction is due to the variety of tasks for electric drive systems and kinematic chains, which leads to unnecessarily complex and bulky designs. The absence of a converter and the type of movement allows the electric drive with linear electric motors to successfully compete with other types of drives in a number of areas of technology (automation, instrumentation, robotics, medical technology, etc.). One of the promising tasks is the translational movement of the working body of the mechanism, where a linear electric motor is used. Based on the analysis of the use of linear motors in electromechanical structures, the expediency of their wide use has been proven. The structural features of this type of engine are analyzed and the methods of calculating the main parameters are given.

Keywords: Electric drive system, linear motor, structure, direct drive, magnetic field, current load.
