

ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПРИВІД ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

© Гащук П.М., Білозор Р.Р., 2005

Розглянуто принципи побудови циліндричних електромагнітних лінійних двигунів зворотно-поступального руху, що застосовуються як безпосередній вібропривід в техніці й медицині. Описано режими крокової роботи двигуна та штучного дроблення його кроку, наводиться приклад побудови електронної системи керування.

The principle of the construction cylindrical electromagnetic linear motors action-revers movement, that used as direct vibrodrive in techniques and medicine are considered. The regimes of stepping function, artificial motor step division and structure of the electronic control system are given.

Вступ. У наш час можна спостерігати помітну інтенсифікацію науково-технічних досліджень у галузі автоматизації різноманітних промислових процесів з розширенням області застосування електроприводу, зокрема електромагнітного. Особливу увагу зосереджено на безпосередньому (безредукторному) кроковому електроприводі лінійного і поворотного руху для різноманітних галузей промисловості, робототехніки, транспортних систем [1, 2]. У цій роботі розглянуто принципи побудови, функціонування та керування лінійного електромагнітного приводу зворотно-поступального руху, який знаходить все ширше застосування у вібраційних системах, системах подачі й контролю, в автомобілебудуванні, електромагнітних молотах, помпах, перфораторах, медицині (реабілітаційні апарати та пристрої, вібромасажери).

Принципи побудови та функціонування. Пересічно статор двигуна зворотно-поступального руху становлять дві секції з магнітопроводами з феромагнітного матеріалу; вони мають циліндрично-симетричну форму і радіально розташовані полюсні наконечники й вікна, в яких знаходяться концентричні обмотки керування. Циліндричний ярмір складається із двох феромагнітних циліндрів, розділених немагнітною вставкою. Під час вмикання однієї секції статора ярмір займає стан магнітної рівноваги, за якої індуктивність системи „ввімкнена секція статора – ярмір” є максимальна. Після вимкнення цієї секції і вмиканні іншої виникає діюча на інший феромагнітний циліндр електромагнітна сила, що намагається пересунути ярмір в аксіальному напрямку до нового стану магнітної рівноваги. Потім цикл повторяється і, отже, ярмір двигуна здійснює зворотно-поступальний рух, що динамічно залежить від тягової характеристики двигуна $F_{em}(x)$ (F_{em} – електромагнітна сила, x – переміщення ярміра). Тому при виборі типу і розробці конструкції електромагнітного двигуна необхідно узгодити форму тягової характеристики з характером робочого навантаження виконавчого механізму. Існує багато шляхів формування різних законів перебігу функції $F_{em}(x)$. Вони полягають як у виборі відповідних геометричних форм активних елементів полюсів статора та ярміра – тих, що забезпечують варіацію похідної від провідності за координатою руху ярміра, так і в формуванні відповідних законів зміни струму в обмотках керування.

Енергію W_{em} , зосереджену в деякому об'ємі V_B повітряного зазора двигуна, можна виразити через індукцію B або напруженість магнітного поля H :

$$W_{em} = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 V_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 V_B, \quad (1)$$

де $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність повітря. В такому разі зусилля, що розвивається двигуном, визначатиметься через похідну від магнітної енергії за координатою переміщення x як

$$F_{em} = \left| \frac{dW_{em}}{dx} \right| = \mu_0 H \frac{dH}{dx} V_B = \frac{1}{\mu_0} B \frac{dB}{dx} V_B. \quad (2)$$

Якщо магнітне поле створюється струмом j , що протікає в обмотці статора, то енергію можна формально виразити через струм j і потокозчеплення ψ

$$W_{em} = \int j d\psi = \frac{1}{2} j \psi. \quad (3)$$

Оскільки

$$\psi = \Phi w; \quad \Phi = jw/R_\mu,$$

де Φ – магнітний потік; w – кількість витків обмотки керування; R_μ – магнітний опір магнітного кола двигуна, то

$$W_{em} = \frac{1}{2} \frac{(jw)^2}{R_\mu} = \frac{1}{2} \Phi^2 R_\mu = \frac{1}{2} L j^2, \quad (4)$$

тут L – індуктивність електромагнітної системи, залежна від положення якоря x .

Тож є підстави записати

$$F_{em} = \left| \frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR_\mu}{dx} \right| = \left| \frac{1}{2} j \frac{d\psi}{dx} \right| = \left| \frac{1}{2} j^2 \frac{dL}{dx} \right|. \quad (5)$$

З виразу (5) випливає, що для реалізації процесу електромагнітного перетворення енергії необхідна зміна хоча б одного з параметрів: R_μ , ψ або L . Під час зміни індуктивності системи $L(x)$ відбувається зміна енергії в магнітному колі, тобто здійснюється процес електромеханічного перетворення енергії, а оскільки F_{em} залежить як від j , так і від dL/dx , то одночасна зміна цих величин забезпечує необхідну форму статичних тягових характеристик двигуна. Тому для забезпечення бажаного різноманіття режимів роботи електромагнітних двигунів доцільно їх укомплектувати якорями різноманітної геометричної форми. За джерело енергії може правити як промислова мережа змінного струму, так і автономне джерело постійного струму. Оскільки при постійному струмі j залежність $F_{em}(x)$ визначається законом зміни dL/dx , то під час формування характеристики із максимальним значенням сили на певній робочій ділянці геометрію магнітних полюсів статора та якоря формують за максимумом величини dL/dx . При цьому в двигуні забезпечується максимальна швидкодія.

Звісно, задача синтезу електромеханічного перетворювача енергії має вичерпний змістовний сенс, коли електрична машина (власне перетворювач) розглядається сумісно з електронним комутатором (системою керування). Формальне поєднання електричної машини з системою керування дає змогу розв'язати задачу реалізації якнайширшого діапазону динамічних станів з одночасним підвищенням ККД в процесі перетворення енергії.

Розглянемо електромагнітний двигун, що має досить просту конструкцію (рис. 1). Магнітопровід статора 1, виготовлений з феромагнітного матеріалу, має циліндрично-симетричну форму; в ньому радіально розташовано полюсні наконечники та два циліндричні вікна, в яких змонтовано концентричні обмотки 2. Кінці циліндричного якоря 3, також виготовленого з феромагнітного матеріалу, мають форму зрізаного конуса. В розточку статора запресовано немагнітну втулку, яка виконує одночасно роль напрямної та підшипника ковзання для якоря, що пересувається у ній в аксіальному напрямку. Довжина частини якоря, що має незмінний діаметр, приблизно дорівнює полюсному поділу (кроку) τ статорної секції. Вибір кута зрізу наконечників якоря визначається бажаним законом зміни тягового зусилля машини.

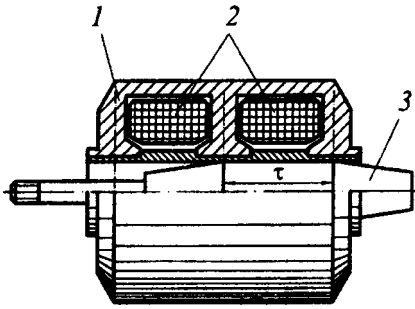


Рис. 1. Лінійний електромагнітний двигун зворотньо-поступального руху

Нехай якорь 3 в початкову мить часу знаходиться в крайньому правому положенні (рис. 1). У разі посилення живлення в ліву секцію статора виникає зростаючий магнітний потік, який проходить ланцюгом “лівий полюсний наконечник – ярмо статора – середній полюсний наконечник – циліндрична поверхня якоря – ліва зрізана ділянка якоря – повітряний зазор”. При цьому провідність магнітного кола зростає плавно, що забезпечує плавний рух якоря вліво доти, поки він не займе положення, за якого настане найвища магнітна провідність для магнітного потоку, що протікає перерізом якоря. Потім ліва статорна секція відмикається і вмикається права, що забезпечує зворотний рух якоря. Описаний цикл багатократно повторюється.

Рациональне конструювання електромагнітного модуля полягає насамперед у формуванні такої тягової характеристики, яка б забезпечувала отримання максимуму корисної роботи в заданому об’ємі. В описаному двигуні власне й забезпечена відповідність між його тяговою характеристикою і конструкцією магнітної системи. Конічна форма якоря забезпечує більшу енергетичну ощадність двигуна в області відносно малих сил порівняно з якорем циліндричного типу з плоским кінцем за значно більшого його ходу. За рахунок зміни кута конусності або застосування східчасто-циліндричної форми якоря можна забезпечити доволі широкий діапазон динамічних станів якоря і за рахунок цього досягнути узгодження динамічних тягових електромагнітних сил з зовнішніми силами, що протидіють рухові якоря.

Електромагнітні двигуни зворотньо-поступального руху можна також застосовувати у випадках, коли потрібні невеликі хід і зусилля рухомого елемента за жорстких вимог щодо масогабаритних показників. Такі вимоги висуваються, зокрема в медицині, при застосуванні цього приводу як вібраторів, вібромасажерів, помпових пристроїв тощо. При цьому двигун може працювати як в кроковому режимі, так і в режимі дроблення основного кроку з доволі плавним переміщенням рухомого елемента. Рис. 2 відображає один із варіантів таких двигунів, що можуть застосовуватися у різних областях медицини. Тут робочий хід рухомого елемента $x = 40$ мм, зусилля на штоку рухомого елемента $F_{em} \cong 10$ Н, постійна напруга живлення $U_{жс} = 9 \dots 15$ В, струм в обмотці двигуна $I_{об} \cong 0,5$ А.

На штоки рухомого елемента вмонтовано диски з гофрованими трубками, виготовлені з відповідного матеріалу (наприклад, латексної гуми). До дисків можуть кріпитися різноманітні насадки необхідної форми. Методика розрахунку двигунів зворотньо-поступального руху та їх електромагнітних модулів наведена в [2].

Система керування для плавного позиціонування приводу. На рис. 3 показано блок-схему системи керування двигуном зворотньо-поступального руху в режимі електронного дроблення кроку. При цьому у разі неперервного (плавного) переміщення рухомого елемента двигуна з різною швидкістю використовується принцип цифроаналогового перетворення керувальних сигналів, який дає змогу реалізувати ніби “перетягування” якоря з зони однієї активної фазної обмотки двигуна в зону іншої – активної. Характеризують процес керування графіки $j_1, j_2 = f(t)$ зміни струмів в обмотках двигуна й крива переміщення якоря $X = \varphi(t)$ (t – час).

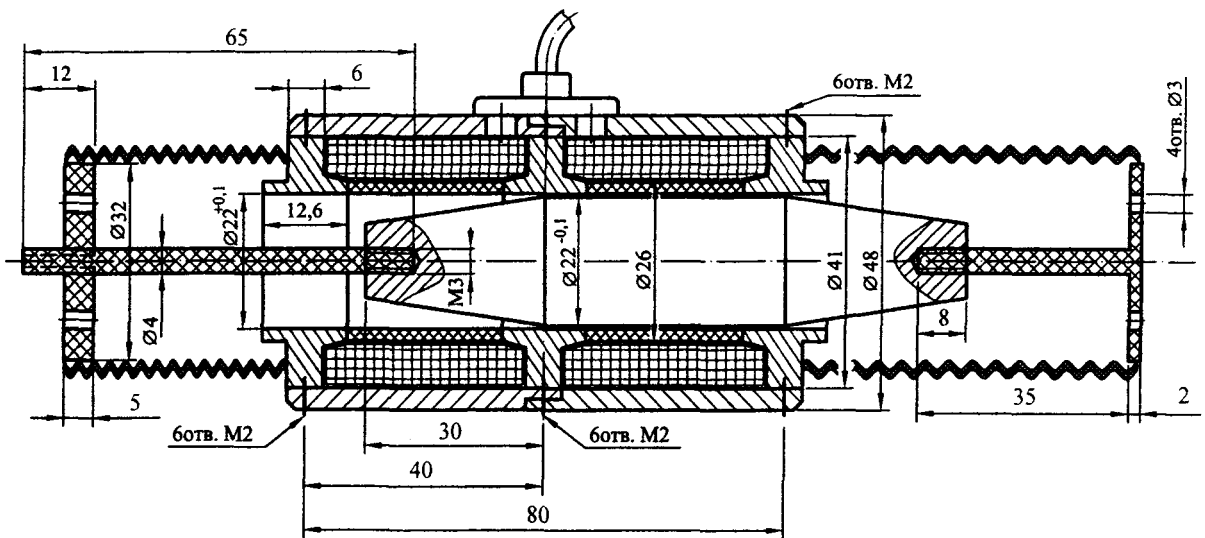
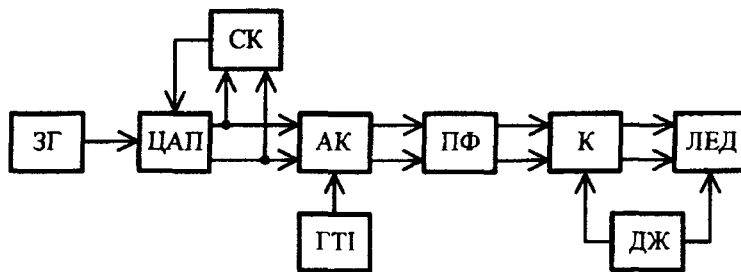
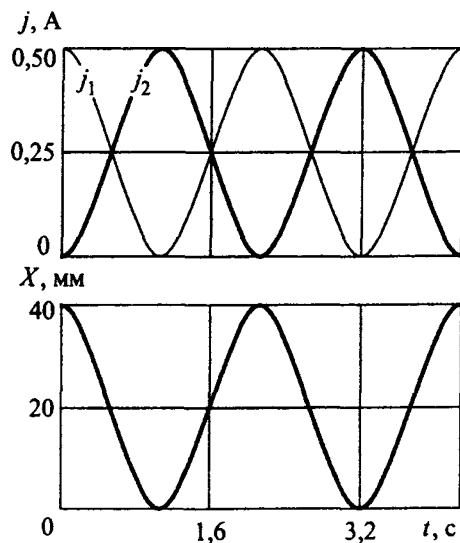


Рис. 2. Лінійний електромагнітний двигун для потреб медицини



а



б

Рис. 3. Блок-схема системи електронного дроблення кроку лінійного двигуна (а) та відповідні характеристики (б)

Систему керування становлять задаючий генератор (ЗГ) прямокутних імпульсів регульованої частоти, двоканальний цифроаналоговий перетворювач (ЦАП), амплітудний компаратор (АК), схема керування (СК), генератор трикутних імпульсів (ГТІ), підсилювачі-формувачі (ПФ) керуючих сигналів, напівпровідниковий комутатор фаз двигуна (К), джерело живлення (ДЖ) (мережеве чи автономне) та лінійний електромагнітний двигун (ЛЕД).

У режимі неперервного позиціонування рухомого елемента двигуна з регульованою швидкістю, яка задається за допомогою структурного елемента $ЗГ$, вихідна напруга змінюється одночасно в двох каналах комутатора $К$. Тактові сигнали з елемента $ЗГ$ надходять в елемент $ЦАП$, який влаштований так, що напруга на кожному з його виходів має форму рівнобедреного трикутника, причому сигнал на одному з виходів інвертований по відношенню до сигналу на другому виході. Коли сигнали в каналах елемента $ЦАП$ по чергово досягають екстремальних значень, інформація про це надходить в елемент $СК$, що керує роботою елемента $ЦАП$. Аналогові сигнали з виходів елемента $ЦАП$ надходять в елемент $АК$, де порівнюються з сигналами елемента $ГТТ$. Амплітудний компаратор $АК$ працює в режимі широтно-імпульсного регулювання напруг вихідних сигналів, які через елементи $ПФ$ керують роботою транзисторного комутатора фаз $К$ лінійного двигуна. При такому способі широтно-імпульсної модуляції здійснюється ефективне регулювання шпаруватості керуючих сигналів у всьому можливому діапазоні (від 0 до 1) і напруга стає лінійною функцією від часу. При зменшенні струму в обмотці, що відмикається, в обмотці, що вмикається, струм синхронно зростає, що й уможливує реалізувати поступове пересування якоря двигуна між його збудженими фазами. Регулюючи кут нахилу аналогових сигналів елемента $ЦАП$ за допомогою елемента $ЗГ$, можна змінювати швидкість пересування рухомого елемента електромагнітного двигуна.

Висновок. Розробка та використання лінійних електромагнітних двигунів зворотно-поступального руху та електронних систем керування ними безумовно є перспективними засобами вдосконалення автоматизованої техніки. Нові можливості відкриваються насамперед у разі застосування їх як безпосередній електропривід в техніці й медицині. Безшумність, задовільні енергетичні показники, безпека в роботі надає йому незаперечну перевагу порівняно з іншими різновидами приводів.

1. Гащук П.М., Білозор Р.Р. Лінійний електромагнітний привід автоматичних систем // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – № 456. – С. 29–43. 2. Афонин А.А., Білозор Р.Р., Гребенников В.В. и др. Электромагнитный привод робототехнических систем. – К.: Наукова думка, 1986. – 272 с.