

УДК 621.313.175:621.314.1

П.М. Гащук, Р.Р. Білозор

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра експлуатації та ремонту автомобільної техніки

ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПРИВІД В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ

© Гащук П.М., Білозор Р.Р., 2002

Йдеться про безпосередній (без проміжних передач) електропривід, в якому лінійний чи поворотний рух робочого тіла здійснюється за рахунок електромагнітної взаємодії між рухомими елементами відповідно до сигналів цифрового керування. Такий привід найкраще пристосований до роботи з комп'ютерними та мікропроцесорними пристроями автоматичних систем.

Описано структуру лінійних і поворотних електродвигунів з покращаними силовими та динамічними характеристиками. Розглядається режим штучного дроблення кроку двигуна, який дає змогу реалізувати неперервне переміщення рухомого органа приводу. Наводиться приклад побудови мікропроцесорної системи керування електромагнітними двигунами.

Direct electric drive in which linear or rotating motion of working medium performed by means of electromagnetic interaction between movable mobile parts corresponds to the signals generated by digital programmed control means and which has no cinematic converters are considered. This drive is adapted at most for work with computers and microprocessor devices of automatic systems.

The structure of linear and rotating electric motors is described, which has good power and dynamic characteristics. The regimes of artificial motor step division are discussed, allowing to realize smooth movement of drive mobile part. The example of performance of microprocessor control system of the electromagnetic motors is given.

1. Вступ: принцип крокового позиціонування. Потреби підвищення швидкодії і точності позиціонування, спрощення структури автоматичних систем і комп'ютеризованих виробництв, а також будови автоматизованого обладнання і технологічного устаткування зумовили надзвичайно високі темпи вдосконалення й все ширше застосування безпосереднього (безредукторного) електропривода, що поєднує в собі електричну машину і напівпровідниковий перетворювач. Електричні машини таких приводів, зрозуміло, виконавчо повинні бути максимально пристосовані до суміщення власне з електронними пристроями керування, а разом з тим вони повинні відповідати особливим вимогам за енергетичними, динамічними, масогабаритними та точнісними показниками.

Типовим для електромагнітних двигунів лінійного і поворотного руху є таке:

– структурно двигун є статором із системою обмоток (обвивок) керування і неоднорідний за магнітними властивостями якір (ротор) [1]; лінійні електродвигуни – це пересічно циліндричні чи плоскі дискретно неоднорідні (у зазначеному щойно сенсі) структури; двигун можна структурувати й обернено, укладаючи обмотки керування в якір (ротор) і створюючи магнітні неоднорідності в статорі;

- локалізація магнітного поля в області електромеханічного перетворення енергії і збільшення тягових зусиль здійснюється за рахунок формування магнітних систем якоря або ротора з неоднорідними за магнітними властивостями ділянками, утвореними чергуванням феромагнітних і немагнітних ланок та створення поверхонь заборони, перепон для магнітних потоків;

- опір магнітних ланцюгів електромеханічного перетворювача знижують за рахунок скорочення довжини силових ліній магнітного поля;

- передбачається пересилання енергії магнітного поля з обмотки, що вимикається, в обмотку, що вмикається (форсуванням імпульсів струму і рекуперацією енергії);

- керування здійснюється за допомогою цифрових мікроелектронних систем у поєднанні із силовими напівпровідниковими комутаторами фаз двигунів, що дозволяє працювати в комплексі з керувальними ЕОМ і мікропроцесорними пристроями;

- системи керування можуть мати як жорстку структуру, у разі застосування логічних обчислювальних пристроїв, так і змінювану, у разі використання перепрограмовуваних мікропроцесорних пристроїв керування і наведення зворотного зв'язку за положенням (позицією).

З повсюдним застосуванням впорскування пального в двигунах внутрішнього згоряння з іскровим запаленням набули поширення регулятори швидкості обертання вала двигуна на ялових (неробочого ходу) режимах. Спочатку такі регулятори призначалися лише для стабілізації мінімальної частоти ялового ходу (за відсутності навантаження), але далі із заміною механічних виконавчих елементів (скажімо, біметалевих) на електромеханічні, керовані електронними засобами, виникла можливість використання впускного повітряного каналу, керованого на всіх можливих режимах роботи двигуна, а не тільки на ялових. При цьому електроніка дала можливість впливати на виконавчий елемент регулятора ялового ходу з боку інших систем керування, таких, як система керування процесом гальмування автомобіля, система автоматичного керування силовим приводом, система забезпечення комфорту тощо. Регулювання зводиться до керування кількістю повітря, яким постачається двигун (в межах, наприклад, від 2 до 60 кг/год) повністю через регулятор. При цьому регулятор перепускає через себе усі види забруднень – тверді частки, випари, агресивні гази (особливо у випадку скеровування в циліндри двигуна картерних газів). Тому актуальним стало розташування регулятора поза основним контуром системи впуску, в обхідному, байпасному каналі.

Порівняно часто для регулювання ялового ходу теплового двигуна (точніше, частоти обертання вала двигуна за відсутності навантаження) використовуються лінійні (з пересуванням рухомого елемента виконавчого пристрою пересічно в межах 20 мм) чи обертові (з повертанням рухомого елемента пересічно в межах 45 град) електромагнітні регулятори, в яких рушійні чинники формуються за допомогою енергії електромагнітного поля. На противагу їм набувають поширення електродинамічні регулятори, в яких силові чинники формуються пересиланням за певними законами порцій електричної енергії в магнітному полі. Особливо в нагоді тут стають крокові двигуни. Типову конструкцію обертового крокового двигуна відображає рис. 1: ротор Rt формують сталі магніти, а статори $St1$, $St2$ містять дві обвивки (обмотки) $w1$, $w2$, через які пересилаються керівні струми (Φ – магнітний потік).

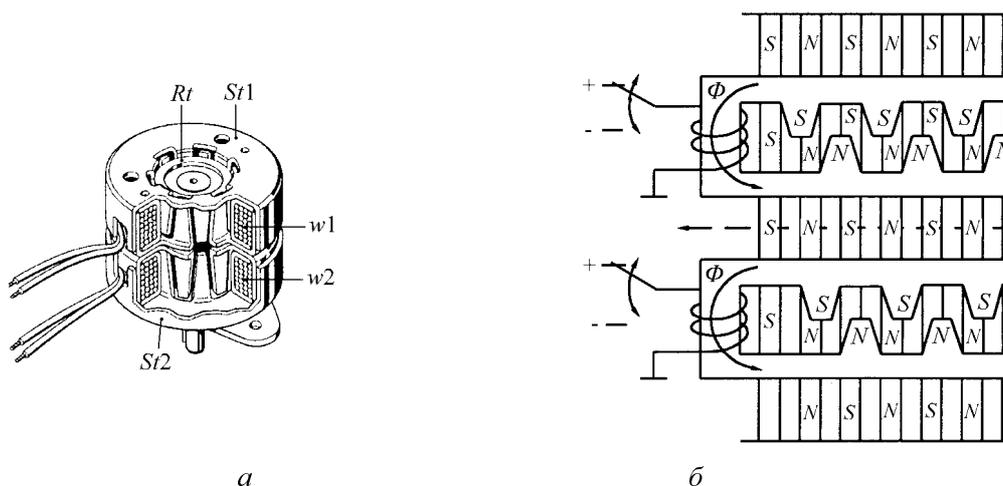


Рис. 1. Кроковий обертовий електродвигун: а – елементи загальної будови ; б – схема розкладки магнітних полів

2. Безпосередній лінійний кроковий електропривід. Лінійний безпосередній електропривід – це пристрій для перетворення електричної енергії в механічну роботу електрично керованого поступального руху за дії в основному електромагнітних силових чинників. Застосовувані для виготовлення двигунів матеріали – конструктивна сталь, латунь, бронза, дюраль, нержавійна сталь, обмотувальні дроти, ізоляційні матеріали.

Завдяки використанню тільки ефекту електромагнітної силової взаємодії і практично повному усуненню проміжних передач і кінематичних ланок безпосередньому електроприводу стають притаманними такі позитивні властивості:

- низький рівень власних шумів;
- неохильність до забруднення довкілля;
- технічна і функційна надійність;
- технологічність виготовлення і порівняно невисока вартість електромеханічної частини;
- простота і зручність експлуатації;
- високий рівень придатності до обслуговування та ремонту;
- здатність ефективно виконувати корисні функції за високих тисків, у вакуумі і в рідинних середовищах.

Практика проектування і застосування безпосереднього електропривода засвідчила досяжність таких технічних показників:

- довжина ходу рухомого елемента лінійних електродвигунів – від кількох міліметрів до кількох метрів;
- тягові зусилля – від декількох тисячних до тисяч ньютонів;
- споживана потужність – приблизно 1 Ват на 1 Н тягового зусилля;
- точність позиціонування – в середньому $\pm 0,1$ мм;
- живлення – від мережі 220 і 380 В змінного струму, а також від акумуляторних батарей;
- швидкість переміщення рухомого елемента – до 1 м/с і більше;
- масогабаритні показники – у середньому 1 кг маси на 10 Н зусилля.

Розв'язання задач автоматизації промислових процесів, задач формування транспортних систем, задач робототехніки тощо полягає, зокрема, в розробці електропривода з

лінійними силовими електродвигунами, вбудованими без проміжних передач і ланок безпосередньо в конструкцію механічних і мехатронних систем. Переміщення рухомої частини в лінійних електродвигунах, як зазначалося, здійснюється тільки під впливом електромагнітного поля, яке створює зусилля між взаємодіючими частинами, причому закон зміни зусиль підпорядковується заданій програмі.

Лінійні електродвигуни з цифровим керуванням доречно застосовувати для автоматизації технологічних процесів і вантажорозвантажувальних робіт, як привід дугового та точкового зварювання виробів, робототехніці, багатокоординатних системах позиціонування, при виготовленні й обробці напівпровідникових приладів, в системах подачі і регулювання палива в теплових двигунах, у системах точної адресації, різних вібраційних системах (зокрема, в медицині), різних автономних силових пристроях зворотно-поступального руху, водозанурювальних механізмах плавникового та хвильового типів, у сільському господарстві тощо.

Безпосередній електропривід може працювати в різних режимах:

- кроковому (дискретному) з примусовою комутацією фазних обмоток;
- зворотно-поступальному (вібраційному);
- автокомутації (самокомутації) фаз із використанням давачів кроків (наприклад, фотоелектричних) і максимально можливою швидкістю переміщення рухомого елемента;
- неперервного (плавного) переміщення рухомого елемента з невисокою швидкістю та електронним дробленням основного кроку двигуна.

В усіх випадках забезпечується висока стабільність рухомого елемента в області збуджених фазних обмоток.

3. Параметри лінійного крокового електродвигуна. На рис. 2 схемно відображена типова конструкція лінійного циліндричного електромагнітного двигуна з неоднорідним якорем, що містить статор Ст (шестифазний – із шістьма обмотками керування $1, \dots, 6$ і кільцевими магнітними полюсами) та якорь Як з феромагнітними та немагнітними ланками, що рівномірно чергуються вздовж нього. Конструкція якоря передбачає можливість поздовжнього переміщення в розточці статора. Основними кінематичними і геометричними параметрами двигуна є полюсний поділ статора – λ , крок якоря – l_z , довжина феромагнітної ланки якоря – $l_{\mu 0}$, довжина немагнітної вставки – $l_{\mu} = l_z - l_{\mu 0}$, діаметр статора D_C , діаметр якоря $d_{\text{я}}$. Статор по довжині розділено навпіл немагнітною вставкою, розмір l_s якої для забезпечення рівномірного переміщення якоря за різних алгоритмів комутації фазних обмоток двигуна вибирається таким, щоб між осями суміжних полюсів була відстань $l_s = 3/4\lambda$. Структура двигуна задовольняє співвідношення: $m\lambda = (m - 2)l_z$; $l_{\mu 0} = \lambda$ ($m = 6$ – кількість фаз двигуна). Послідовним збудженням обмоток двигуна в різному поєднанні здійснюється почергова, парна (симетрична) та змішана (несиметрична) комутація фаз.

Основний крок двигуна в режимах почергової або парної комутації фаз, $x_i = l_z / m = \lambda / (m - 2)$, а в режимі змішаної 12-тактної комутації $x_i = l_z / 2m$ (рис. 3, а). Характерні статичні тягові характеристики для почергової та парної комутації фаз наведено на рис. 3, б, де $F_{\text{ем}}$ – вісна електромагнітна сила, x – переміщення якоря. За основні силові параметри двигуна правлять граничне пускове зусилля F_r двигуна в режимі парної комутації фаз (при заданому струмі в обмотці керування) та максимальне значення статичного синхронізувального зусилля F_m , яке при форсуванні живлення суттєво перевищує значення величини F_r .

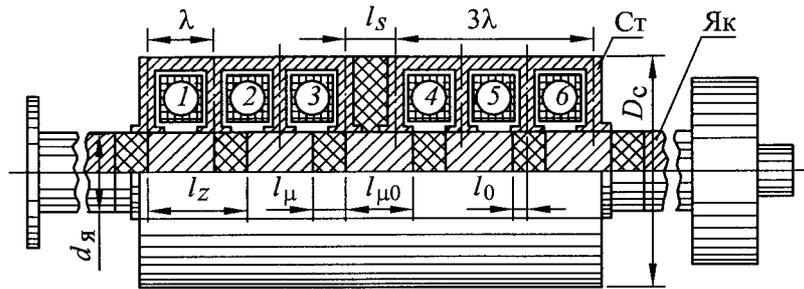


Рис. 2. Схема, що відображає типову конструкцію циліндричного лінійного крокового двигуна

Збільшення неоднорідності структури якоря призводить до підвищення крутизни й амплітудних значень статичних тягових характеристик, а електромагнітні параметри багатофазного активно-індуктивного навантаження напівпровідникового перетворювача набувають нелінійного характеру. Для забезпечення широких функційних можливостей і прийнятних енергетичних показників лінійних електродвигунів висуваються підвищені вимоги до пристроїв керування, тобто задачі позиціонування в них розв'язуються в основному електронними засобами.

4. Електронне дроблення кроку. У деяких випадках при роботі електромагнітного приводу виникає потреба позиціонування в межах основного кроку двигуна. Для цього необхідно побічними заходами зменшувати величину кроку електромагнітного двигуна за допомогою штучного (електронного) його дроблення, що досягається ступеневою зміною струмів одночасно в декількох обмотках цифро-аналоговим перетворенням керувальних сигналів у поєднанні із симетричною системою комутації фаз [2 – 3].

На рис. 4 схемно показано структуру одного з різновидів восьмифазного лінійного крокового двигуна (2ФЗ, 3ФР, 4ФЗ – дво-, три-, чотирифазне регулювання) і суміщені експериментальні статичні характеристики двох фаз за абсолютним значенням силового чинника ($|F|_{em}$ – модуль електромагнітної сили, $F_{тр}$ – сила тертя). За одночасної зміни струмів, наприклад, у першій і восьмій обмотках керування (двофазне регулювання струмів за замкнутим циклом [2 – 3], рис. 4, а) якір двигуна пересувається з точки стійкої рівноваги $X = x_1$ у точку $X = x_3$. При дослідженні алгоритмів регулювання і визначення форми струмів в обмотках для реалізації рівномірного дроблення кроку лінійного електромагнітного крокового двигуна, що характеризується нелінійним розподілом тягових зусиль за координатою, необхідно брати до уваги вплив сил тертя в системі.

Необхідність покращання якості руху дискретного електропривода стимулювало розробку перетворювачів із модуляцією багатофазної системи струмів (напруг). Одержаний при цьому режим електронного дроблення кроку дозволяє, крім підвищення точності позиціонування, збільшити навантажувальну спроможність і стійкість приводу. Багато з відомих схем, хоча і є простими, мають суттєвий недолік, який полягає в тому, що реальна крива синхронізувального моменту або зусилля крокового двигуна близька до лінійної чи синусоїдної функції. Одержувані при цьому фактичні значення дробових кроків неоднакові і відрізняються від заданого середнього.

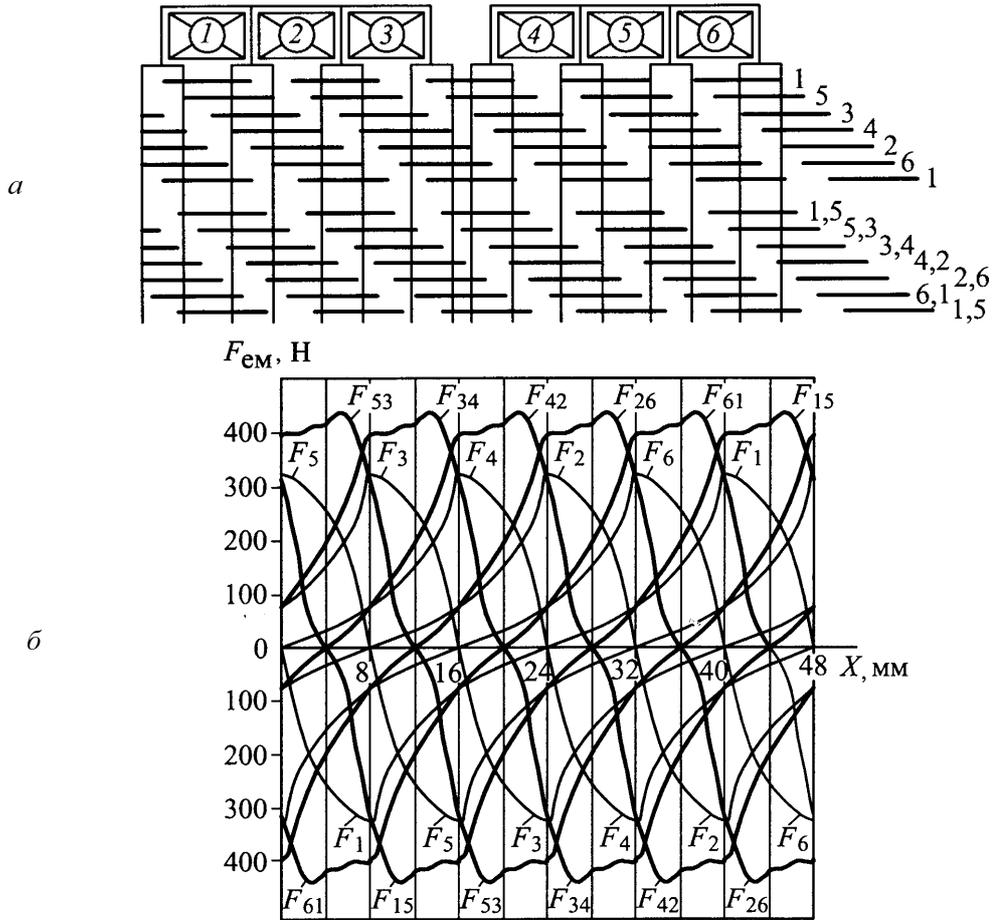


Рис. 3. Схеми комутації обмоток керування (а) та відповідні статичні характеристики лінійного двигуна (б)

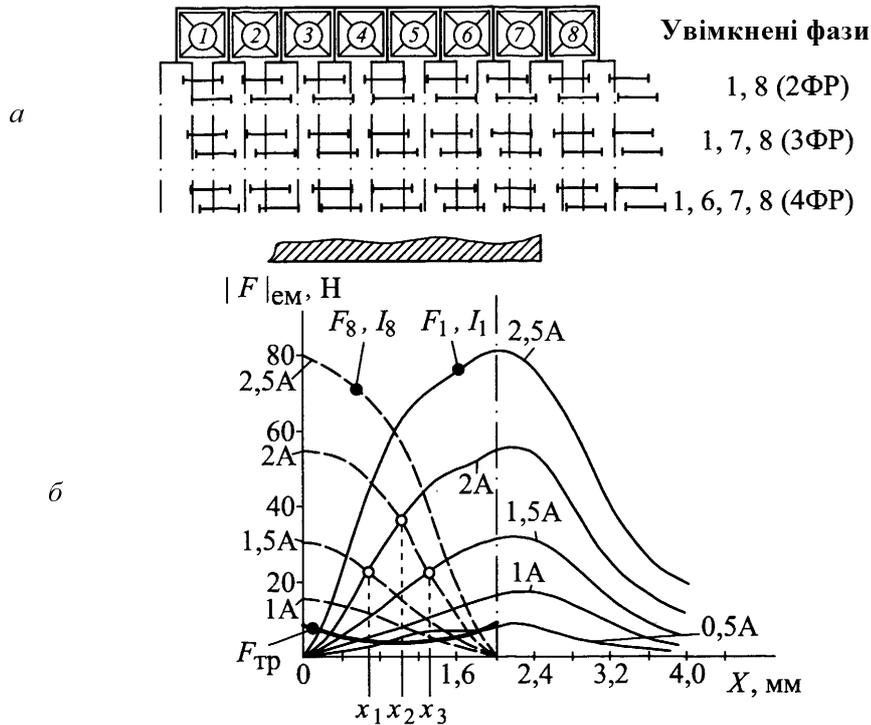


Рис. 4. Схеми комутації обмоток керування (а) та відповідні статичні характеристики лінійного двигуна (б)

Мікропроцесорне керування перетворювачем з електронним дробленням кроку розширює можливості приводу і дає змогу реалізувати алгоритми роботи, що враховують як реальний характер залежності синхронізувального зусилля лінійного крокового двигуна (ЛКД) від переміщення якоря і ступеня насичення магнітної системи [3], так і величину навантаження двигуна.

На рис. 5 наведено блок-схему перетворювача з мікропроцесорним керуванням восьмифазним ЛКД, що забезпечує різні закони регулювання струмів в обмотках. Сигнали керування від мікропроцесора (МП) в паралельному цифровому коді подаються на входи чотирьохканального цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Аналогові сигнали з виходів ЦАП надходять в посилювачі-формувачі (ПФ), що здійснюють широтно-імпульсну модуляцію напруг на виходах чотирьохканального регулятора напруг (РН). Кожний із виходів РН під'єднаний до пари обмоток ЛКД.

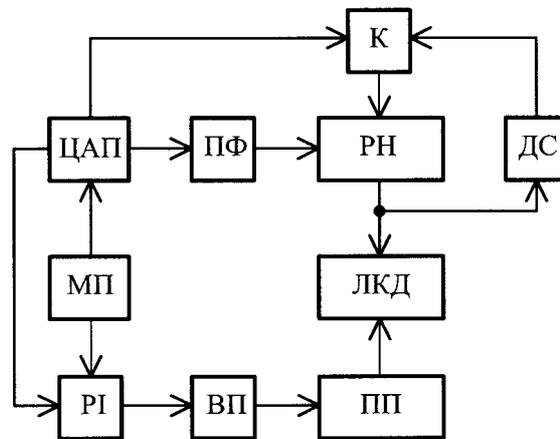


Рис. 5. Блок-схема перетворювача з мікропроцесорним керуванням

З метою підвищення точності позиціонування і відпрацювання заданої форми струмів, у систему керування можуть бути введені датчики струмів (ДС) і компаратор (К). Аналогові сигнали зворотних зв'язків у каналах РН порівнюються в К із задаючими сигналами ЦАП і результуючі сигнали надходять у ланки керування ключів РН.

У цьому випадку ПФ у схемі керування відсутні. Попарне вмикання фаз ЛКД дозволяє зменшити кількість зворотних зв'язків і каналів РН без порушення алгоритму комутації фаз. Одночасно з аналоговими сигналами з цифрових виходів ЦАП тактові імпульси кроків надходять у розподільувач імпульсів (РІ) і через вихідні посилювачі (ВП) за допомогою транзисторних ключів посилювача потужності (ПП) комутують фази ЛКД за заданим алгоритмом.

5. Аналітичні залежності, що описують штучне дроблення кроку лінійного електромагнітного двигуна. У режимі електронного дроблення кроку при широтно-імпульсному регулюванні фазних струмів двигуна траєкторія руху якоря визначається перерозподілом тягових зусиль між збудженими фазами, тобто значеннями струмів у кожний дискретний момент часу і силами протидії, що складаються із зусилля навантаження і сил сухого тертя. При цьому для визначення ступеня дроблення кроку і струмів у цифро-аналоговому перетворювачі залежність тягового зусилля від координати при фіксованих зна-

ченнях струму в обмотках можна з достатнім ступенем точності описати неповним квадратичним поліномом, наприклад, для двофазного регулювання струмів в обмотках ЛКД [3]:

$$\begin{aligned} F_1 &= a_0 + a_1 x_j + a_2 i_{1j} + a_{12} x_j i_{1j}, \\ F_8 &= b_0 + b_1 x_j + b_2 i_{8j} + b_{12} x_j i_{8j}. \end{aligned} \quad (1)$$

Коефіцієнти поліномів у (1) визначаються на підставі повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^2 в рамках теорії планування експерименту (МПЕ) [4]. При цьому використовуються закодовані значення варійованих незалежних факторів – переміщення X і струм в k -й обмотці I_k .

Через те, що статичні характеристики тягового зусилля нелінійні, для одержання адекватної апроксимації в заданих межах варіювання інтервал варіювання факторів доцільно звузити, при цьому похибка апроксимації не повинна перевищувати задану (скажімо, 3–5%). У цьому випадку сімейство кривих статичних тягових характеристик можна розбити на чотири інтервали варіювання незалежних факторів. Наприклад, якщо крок двигуна $X_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м і фазні струми змінюються від 0 до 2 А (рис. 4), інтервали варіювання факторів можуть бути такі:

$$0 \leq X' \leq 1 \cdot 10^{-3} \begin{cases} 0 \leq I_{81} \leq 1, \\ 1 \leq I_{11} \leq 2; \end{cases} \quad 1 \cdot 10^{-3} \leq X'' \leq 2 \cdot 10^{-3} \begin{cases} 1 \leq I_{82} \leq 2, \\ 0 \leq I_{12} \leq 1. \end{cases}$$

На інтервалі X' величини тягових зусиль збуджених фаз двигуна надалі будемо позначати через F' , а на інтервалі X'' – через F'' . Для двох факторів на двох рівнях варіювання при ПФЕ 2^2 коефіцієнти поліномів визначаються за формулою

$$a_i, b_i = \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_{j,u} F_u \right)}{N},$$

де N – кількість дослідів у відповідному інтервалі варіювання; $y_{j,u}$ – кодовані значення варійованих незалежних факторів.

При аналізі позиціонування рухливого елемента в режимі електронного дроблення кроку двигуна розглядаються два варіанти: 1) струми у фазах змінюються лінійно; 2) траєкторія руху якоря є лінійною функцією часу. В обох випадках для визначення мінімально можливих приростів Δx переміщення і приростів Δi струмів необхідно враховувати величину протидійного зусилля:

$$F_{\text{пд}} = F_{\text{н}} + F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

де $F_{\text{н}}$ – величина навантаження на штоку якоря;

$$F_{\text{тр}} = k_f (F_{\text{я}} + F_r) = F_{\text{т1}} + F_{\text{т2}} \quad (3)$$

– сумарне зусилля сухого тертя; k_f – коефіцієнт тертя ковзання; $F_{\text{я}}$ – сила нормального тиску якоря; F_r – сумарне радіальне зусилля однобічного притягання якоря в збуджених обмотках за рахунок ексцентриситету в напрямній втулці.

У виразі (3) $F_{\text{т1}} = F_{\text{т1}} \text{sign}(\dot{X})$ і тому, що неперервне позиціонування розглядається як квазістаціонарний, цю величину можна визначити, знаючи вагу рухомого елемента і коефіцієнт тертя k_f . Для двофазного регулювання струмів у двигуні

$$F_r = F_{r1} + F_{r11}, \quad (4)$$

а F_r однієї фазної обмотки може бути визначена з виразу [5]

$$F_r = 4 \cdot 10^5 \frac{\Psi^2}{\omega^2} \frac{\varepsilon}{\pi D_{\text{я}} h \sqrt{\delta^2 - \varepsilon^2}}, \quad (5)$$

де Ψ – потокозчеплення; ω – кількість витків у обмотці; ε – ексцентриситет; $D_{\text{я}}$ – діаметр якоря; h – ширина полюса над феромагнітною ланкою якоря; δ – величина робочого зазору. При цьому допускається, що вихрові струми в системі відсутні (малі сходячі часті зміни струмів в обмотках) і зчеплення відбувається з усіма витками збудженої обмотки. Обчислювана сила F_r під кожним полюсом є змінною величиною при переміщенні якоря по напрямній втулці і зміні струму в обмотці. Величина потокозчеплення $\Psi = L \cdot I$ також є змінною величиною при переміщенні якоря і залежність індуктивності L від координати в ній можна визначити з відомого виразу для діючої електромагнітної сили $F_{\text{ем}} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dX}$. З

сімейства експериментальних тягових характеристик визначається $\frac{dL}{dX}$ у всьому діапазоні зміни струму в обмотці, і в результаті графічного інтегрування одержуємо залежність $L(X)$ з урахуванням індуктивності системи статор–якір і фази двигуна до початку руху на ділянці, що розглядається.

На рис. 4, б відображено характер зміни залежності $F_{\text{тр}}(X)$ при переміщенні якоря і синхронному регулюванні струмів у двох фазах двигуна за заданим алгоритмом [3] двофазне регулювання (2ФР). Для реалізації рівномірного переміщення рухомого елемента з постійним зусиллям (що необхідно при розв'язанні більшості технологічних задач), а також визначення форми струмів за заданою траєкторією руху в другому варіанті роботи вводиться величина F_z – постійнодіюче в кожній точці задане зусилля, причому $F_z > F_{\text{тр}}$. В результаті досліджень було встановлено, що залежність $F_{\text{тр}}(X)$ апроксимується функцією

$$F_{\text{тр}} = l_0 + l_1 x_j,$$

або для більш складних залежностей у другому варіанті роботи

$$F_{\text{тр}} = l_0 + l_1 x_j + l_{11} x_j^2$$

у відповідному факторному просторі [4], де l_0 , l_1 і l_{11} – коефіцієнти поліномів.

У першому варіанті роботи при лінійній зміні фазних струмів двигуна для випадку 2ФР в загальному вигляді $F_1 = F_8$, звідки

$$x_{j0} = \frac{s}{z}, \quad (6)$$

де x_{j0} – положення якоря при лінійній зміні струмів в обмотках без врахування сил протидії в заданих точках факторного простору;

$$s = a_0 - b_0 - b_2 i_{8j} + a_2 i_{1j}, \quad z = b_1 - a_1 - a_{12} i_{1j} + b_{12} i_{8j}.$$

В результаті з (2)–(5) і (6) можна визначити величину $F_{\text{тр}}$ за заданим законом зміни струмів в обмотках ЛКД. З врахуванням сил протидії руху якоря рівняння рівноваги сил у точках позиціонування при переміщенні в напрямку обмотки, що тягне (рис. 4, а), буде мати вигляд

$$F_1 + F_{\text{пд}} = F_8, \quad (7)$$

звідки

$$x_{\text{пд}j} = \frac{s + F_{\text{пд}j}}{z}, \quad (8)$$

де $F_{\text{пд}j}$ – сила протидії в розглянутій j -й точці простору при $F_{\text{н}} = 0$; $x_{\text{пд}j}$ – положення якоря з урахуванням сил протидії. Для визначення впливу сил тертя в системі і функціональних можливостей ЛКД у режимі штучного дроблення кроку дослідження проводились без механічного навантаження на штоці рухомого елемента, яке при необхідності легко враховується у виразі (2) для $F_{\text{пд}}$.

В загальному випадку, величина похибки при відпрацюванні елементарного дробного кроку, зумовлена наявністю сил протидії в системі і визначається як

$$\Delta x_j = x_{\text{пд}j} - x_{j0} = \frac{F_{\text{пд}j}}{z}. \quad (9)$$

Якщо

$$F_{\text{пд}j} = F_{\text{пд}\Sigma} = l_0 + l_1 x_j, \quad (10)$$

то, підставляючи (10) в (7) і розв'язуючи (8), із (9) після перетворень отримаємо

$$\Delta x_j = \frac{l_0 - l_1}{z - l_1}. \quad (11)$$

При лінійному регулюванні струмів I_1 , I_8 визначаємо величину їх дроблення в цифро-аналоговому перетворювальному пристрої [3] за заданими положеннями рухомого елемента x_{j0} :

$$a_0 + a_1 x_{j0} + a_2 (i_{1j} - \Delta i_j) + a_{12} x_{j0} (i_{1j} - \Delta i_j) + F_{\text{пд}j} = b_0 + b_1 x_{j0} + b_2 (i_{8j} + \Delta i_j) + b_{12} x_{j0} (i_{8j} + \Delta i_j),$$

$$\Delta i_j = \frac{F_{\text{пд}j}}{a_2 + b_2 + x_{j0} (a_{12} + b_{12})} = \frac{l_0 + l_1 x_{j0}}{a_2 + b_2 + x_{j0} (a_{12} + b_{12})} \quad (12)$$

Для спрощення визначається середня величина дроблення струмів

$$\Delta i_{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta i_j}{n}, \quad (13)$$

де n – кількість розглянутих точок на інтервалі позиціонування. Ступінь дроблення струмів визначається за істинними значеннями фактора $I_{\text{к}}$ [4]:

$$v_I = \frac{I_{\text{кmax}}}{\Delta I_{\text{cp}}}, \quad (14)$$

де $\Delta I_{\text{cp}} = \Delta i_{\text{cp}} (I_{\text{cp}} - I_{\text{min}})$.

В другому варіанті роботи визначимо форму струмів в збуджених обмотках для реалізації рівномірного переміщення рухомого елемента двигуна. Без врахування сил протидії $F_1 = F_8 = F_z$

$$i_{1j} = \frac{F_z - a_0 - a_1 x_j}{a_2 + a_{12} x_j}, \quad i_{8j} = \frac{F_z - b_0 - b_1 x_j}{b_2 + b_{12} x_j} \quad (15)$$

у відповідному факторному просторі. Похибка позиціонування за наявності сил тертя при регулюванні струмів відповідно (15), визначається з (9) з урахуванням (10). Після перетворень отримуємо

$$\Delta x_j = \frac{-(l_0 + l_1 x_j)(a_2 + a_{12} x_j)(b_2 + b_{12} x_j)}{F_z (a_{12} b_2 - b_{12} a_2)}.$$

На границях зон позиціонування в межах кроку при $X = X_{\min}$ і $X = X_{\max}$ струми в збуджених обмотках не спадають до нуля, внаслідок чого при підході до цих точок для збереження рівноваги сил в системі і плавного переміщення рухомого елемента необхідно підімкнути наступну за алгоритмом фазну обмотку ЛКД без стрибка струму (рис. 6). Наприклад, для $X = X_{\max}$

$$F_1'' + F_{\text{пд}j} = F_8'' + F_z. \quad (16)$$

Враховуючи (16), визначаємо величину похибки відпрацювання кроку $\Delta x_{\text{гр}}$ на границі зони позиціонування.

$$x_{\text{гр}0} = \frac{F_z - a_0'' - a_2'' i_{1j}}{a_1'' + a_{12}'' i_{1j}}, \quad x_{\text{гр пд}0} = \frac{s'' + F_{\text{пд}j} - F_z}{z''},$$

де $s'' = a_0'' - b_0'' - b_2'' i_{8j} + a_2'' i_{1j}$, $z'' = b_1'' - a_1'' - a_{12}'' i_{1j} + b_{12}'' i_{8j}$. Після перетворень з урахуванням (10), i_{1j} із (15) і $i_{8j} = +1$ в точці X_{\max} отримуємо

$$\Delta x_{\text{гр}} = \frac{F_{\text{пд}j} (a_2'' + a_{12}'')}{(a_2'' + a_{12}'')(b_1'' + b_{12}'') - a_{12}'' F_z} = \frac{l_0'' (a_2'' + a_{12}'')}{(a_2'' + a_{12}'')(b_1'' + b_{12}'') - l_1''} - a_{12}'' F_z. \quad (17)$$

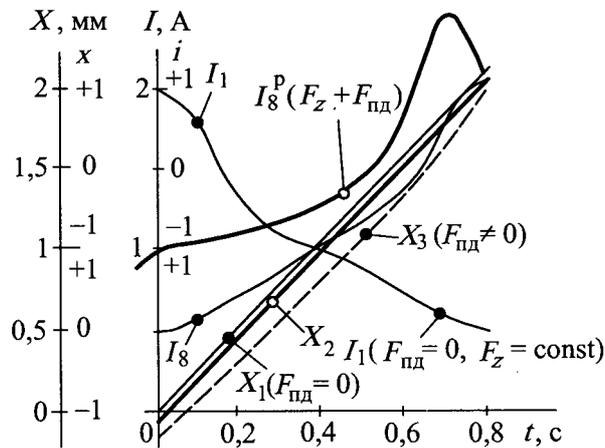


Рис. 6. Графіки зміни струмів в двох фазах

Середня величина похибки позиціонування визначається як

$$\Delta x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta x_j}{n},$$

а ступінь дроблення кроку за формулою

$$v_x = \frac{X_0}{\Delta X_{\text{ср}}}, \quad (18)$$

де $\Delta X_{\text{cp.}} = \Delta x_{\text{cp.}} (X_{\text{cp.}} - X_{\text{min.}})$ Для реалізації рівномірного переміщення рухомого елемента при $F_{\text{нд}} \neq 0$ вираз для струму обмотки, що тягне, буде мати вигляд

$$i_{8j}^{\text{p}} = \frac{F_z + F_{\text{нд}j} - b_0 - b_1 x_j}{b_2 + b_{12} x_j}. \quad (19)$$

При цьому необхідно дотримуватись обмеження, що накладається на величину струму в обмотках $I_{8j}^{\text{p}} \leq I_{\text{кmax}}$, враховуючи енергетичні, теплові і комутаційні умови роботи. На рис. 6 показані криві зміни струмів у двох фазах ЛКД для реалізації лінійної залежності $X(t)$ без врахування (X_1, I_1, I_8) і з врахуванням (X_3) сил тертя при симетричному регулюванні струмів, відповідно до (15), а також при регулюванні струму в обмотці, що тягне, відповідно до (19) ($I_{8j}^{\text{p}}, X_2, F_z = 8 \text{ Н}$). З рисунка видно, що у випадку 2 ФР для реалізації рівномірного дроблення кроку ЛКД струми в обмотках необхідно змінювати за складним законом з врахуванням граничних умов позиціонування при перемиканні фаз.

Одночасне збудження в якості демпфувальної ланки третьої фазної обмотки двигуна (причому струм у ній залишається сталим і максимальним при регулюванні струмів в інших двох, $I_8 = \text{const}$) дозволяє домогтися більш рівномірного переміщення рухомого елемента. Початкове і кінцеве положення якоря показані на рис. 4, б. Дроблення факторного простору здійснюється з допустимою похибкою поліномної апроксимації і при $0 \leq X' \leq \frac{X_{\text{max}}}{2}$,

$F_1' = F_7' + F_8'$ а при $\frac{X_{\text{max}}}{2} \leq X'' \leq X_{\text{max}}$, $F_1'' + F_8'' = F_7$ – при русі якоря праворуч (рис 4).

Запишемо в загальному вигляді систему рівнянь неповних квадратичних поліномів апроксимації залежностей діючих зусиль для обох факторних просторів:

$$F_1 = a_0 + a_1 x_j + a_2 i_{1j} + a_{12} x_j i_{1j},$$

$$F_7 = b_0 + b_1 x_j + b_2 i_{7j} + b_{12} x_j i_{7j},$$

$$F_8 = c_0 + c_1 x_j.$$

В першому варіанті роботи ЛКД без урахування сил протидії в системі $F_1' = F_7' + F_8'$

$$x'_{j0} = \frac{s'}{z'},$$

де

$$s' = a'_0 - b'_0 - c'_0 + a'_2 i_{1j} - b'_2 i_{7j}, \quad z' = b'_1 - a'_1 + c'_1 + b'_{12} i_{7j} - a'_{12} i_{1j}.$$

При $F_{\text{нд}} \neq 0$, $F_1' + F_{\text{нд}} = F_7' + F_8'$

$$x'_{\text{нд}} = \frac{s' + F_{\text{нд}j}}{z'}.$$

Якщо виконується умова (10), то

$$\Delta x'_j = \frac{l'_0 - l'_1}{z' - l'_1}.$$

Для кінцевої ділянки позиціонування з рівняння $F_1'' + F_8'' = F_7''$ впливає рівність

$$x''_{j0} = \frac{s''}{z''},$$

де $s'' = a_0'' - b_0'' + c_0'' + a_2''i_{1j} - b_2''i_{7j}$, $z'' = b_1'' - a_1'' - c_1'' - a_{12}''i_{1j} + b_{12}''i_{7j}$. З рівняння $F_1'' + F_8'' + F_{\text{нд}} = F_7''$ визначаються $x_{\text{нд}}''$ і відповідно $\Delta x_i''$. Величини і ступінь дроблення струмів I_1 , I_7 визначаються відповідно до (12)–(14).

В другому варіанті роботи двигуна для реалізації лінійної залежності $X(t)$ при $F_{\text{нд}} = 0$

$$\begin{aligned} F_1' &= F_7' + F_8' = F_z, \quad F_1'' + F_8'' = F_7'' = F_z, \\ i_{1j}' &= \frac{F_z - a_0' - a_1'x_j'}{a_2' + a_{12}'x_j'}, \quad i_{7j}' = \frac{F_z - b_0' - c_0' - (b_1' + c_1')x_j'}{b_2' + b_{12}'x_j'}. \end{aligned} \quad (20)$$

При цьому $F_z \geq F_8$ тому, що $I_8 = \text{const}$. Для другої половини факторного простору

$$i_{1j}'' = \frac{F_z - a_0'' - c_0'' - (a_1'' + c_1'')x_j'}{a_2'' + a_{12}''x_j'}, \quad i_{7j}'' = \frac{F_z - b_0'' - b_1''x_j''}{b_2'' + b_{12}''x_j''}. \quad (21)$$

Похибки $\Delta x_j'$, $\Delta x_j''$ позиціонування рухомого елемента за наявності сил тертя при регулюванні струмів згідно з (20), (21) визначаються з (9) у відповідному факторному просторі з урахуванням (10) і виразів для струмів (20), (21). Величини $\Delta x_{\text{сп}}$, v_x визначаються з (17), (18). Для рівномірного переміщення рухомого елемента двигуна при $F_{\text{нд}} \neq 0$ струму I_7 у відповідному факторному просторі визначається з рівнянь

$$\begin{aligned} F_7' + F_8' &= F_z + F_{\text{нд}}, \quad F_7'' = F_z + F_{\text{нд}}, \\ i_{7j}^p' &= \frac{F_z + F_{\text{нд}} - b_0' - c_0' - (b_1' + c_1')x_j'}{b_2' + b_{12}'x_j'}, \quad i_{7j}^p'' = \frac{F_z + F_{\text{нд}} - b_0'' - b_1''x_j''}{b_2'' + b_{12}''x_j''}. \end{aligned} \quad (22)$$

На рис. 7 показані криві зміни струмів у трьох фазах ЛКД (3ФР) для реалізації лінійної залежності $X(t)$ без урахування (X_1 , I_1 , I_7 , I_8) і з урахуванням (X_3) сил тертя при симетричному регулюванні I_1 , I_7 , відповідно до (20), (21), а також при регулюванні струму в обмотці, що тягне, відповідно до (22) (I_7^p , X_2 , $F_z = 37$ Н). У цьому випадку, як і у випадку двофазного регулювання (2ФР) струмів, на границях зон позиціонування в межах кроку необхідно вмикати додаткову фазу обмотку двигуна (струм I_6 , рис. 7).

Регулювання струмів одночасно в чотирьох обмотках ЛКД дає змогу одержати практично рівномірне переміщення рухомого елемента [3]. При цьому за рахунок фазового зсуву в кожній парі обмоток (I_6 , I_8 та I_1 , I_7 , рис. 8) тягове зусилля в межах кроку вирівнюється, а частота комутації фаз двигуна збільшується удвічі порівняно з двофазним регулюванням (2ФР) струмів. Початкове і кінцеве положення якоря в режимі 4ФР струмів показані на рис. 4, а, з якого видно, що фази 1 і 8 є гальмуючими, а 6 і 7 – тягнучими.

При лінійному регулюванні фазних струмів і $F_{\text{нд}} = 0$

$$F_1 + F_8 = F_6 + F_7,$$

а положення якоря x_{j0} визначаються відповідно до (6), де

$$s = a_0 - b_0 - c_0 + d_0 + a_2i_{1j} - b_2i_{6j} - c_2i_{7j} + d_2i_{8j}, \quad z = b_1 - a_1 + c_1 - d_1 + b_{12}i_{6j} - a_{12}i_{1j} + c_{12}i_{7j} - d_{12}i_{8j}.$$

З урахуванням сил протидії в системі

$$F_1 + F_8 + F_{\text{нд}} = F_6 + F_7. \quad (23)$$

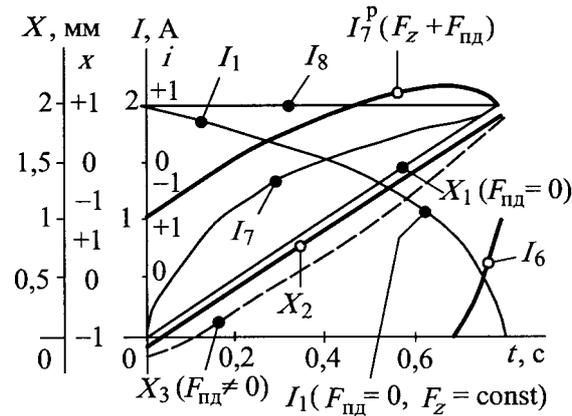


Рис. 7. Графіки зміни струмів у трьох фазах ЛКД при лінійній програмі руху якоря

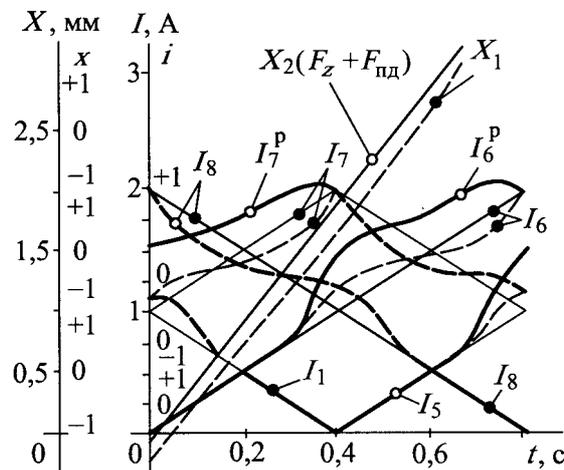


Рис. 8. Закони зміни струмів у чотирьох фазах ЛКД при лінійній програмі руху якоря без урахування (штрихові лінії) та з урахуванням (суцільні лінії) сил протидії

Із (23) визначається $x_{j\text{нд}}$ і аналогічно з (11) – Δx_j . За заданими положеннями якоря x_{j0} і змінної $F_{\text{тр}}(X)$, відповідно до 2ФР, з урахуванням регулювання чотирифазних струмів і умови (10) визначається величина

$$\Delta i_j = \frac{I_0 + I_1 x_{j0}}{p},$$

де

$$p = a_2 + b_2 + c_2 + d_2 + x_{j0}(a_{12} + b_{12} + c_{12} + d_{12}).$$

Величини Δi_{cp} і v_1 визначаються з (13) і (14).

Визначимо характер зміни фазних струмів при рівномірному переміщенні рухомого елемента двигуна. При $F_{\text{нд}} = 0$

$$F_1 + F_8 = F_6 + F_7 = F_z. \quad (24)$$

Для кожної пари сил характер зміни одного зі струмів в обмотці будемо вважати заданим (наприклад, струми I_1 , I_6 , що не досягають максимальних значень на вибраному

кроці). При цьому для динамічної рівноваги на границях зон позиціонування необхідно враховувати, що $I_1 = I_7$, $I_6 = I_8$. З (24) визначаємо:

$$i_{7j} = \frac{g}{c_2 + c_{12}x_j}, \quad i_{8j} = \frac{q}{d_2 + d_{12}x_j}, \quad (25)$$

де

$$g = F_z - b_0 - c_0 - (b_1 + c_1)x_j - (b_2 + b_{12}x_j)i_{6j}, \quad q = F_z - a_0 - d_0 - (a_1 + d_1)x_j - (a_2 + a_{12}x_j)i_{1j}.$$

Величина Δx_j через наявність сил тертя в системі визначається з (23) з урахуванням (25), а величини Δx_{cp} , v_x , визначаються з (17), (18). Для реалізації рівномірного переміщення рухомого елемента двигуна при $F_{пд} \neq 0$ у розглянутій зоні позиціонування $F_1 + F_8 = F_z$, $F_6 + F_7 = F_z + F_{пд}$,

$$i_{7j}^p = \frac{g + F_{пдж}}{c_2 + c_{12}x_j}. \quad (26)$$

На рис. 8 показані криві зміни струмів у обмотках, відповідно до (25), і залежності $X(t)$ в інтервалі $1,5X_0$ з урахуванням сил тертя в системі (X_1 , пунктирні криві, $F_z = 20$ Н), а також при регулюванні струмів в обмотках, що тягнуть, відповідно до (26) (I_6^p , I_7^p , X_2).

6. Резюме. Похибка розрахункових і експериментальних даних у розглянутих способах штучного дроблення кроку при лінійному регулюванні струмів в обмотках ЛКД становить 15 – 20%, а ступінь дроблення кроку і струмів через наявність сил тертя в системі для даного типу двигунів становить 7 – 12 при різних алгоритмах регулювання.

Описаний спосіб чотирифазного регулювання струмів в силових ЛКД є найбільш гнучким і досконалим для реалізації рівномірного переміщення рухомого елемента в режимі штучного дроблення кроку. При цьому необхідно домагатися зменшення сил сухого тертя між рухомими частинами в конструкції двигуна тому, що вони суттєво обмежують ступінь дроблення кроку і можливості позиціонування.

1. Подлипенский В.С., Петренко В. Н. Электромагнитные и электромашинные устройства автоматики. – К.: Вища школа, 1987. – 592 с. 2. Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод. – Л.: Энергия, 1980. – 168 с. 3. Афонин А.А., Билозор Р.Р., Гребеников В.В. и др. Электромагнитный привод робототехнических систем. – К.: Наукова думка, 1986. – 272 с. 4. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в. электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с. 5. Тимошенко В.М., Фадин Ю.И. Силы сопротивления движению якоря в электромагнитных двигателях. В. П. Д. // Электромагнитные машины возвратно-поступального движения. – Новосибирск: СО АН СССР, 1971. – С. 76–82.