

УДК 621. 317

<sup>1</sup>СМОЛЯНИНОВ В. Г., <sup>2</sup>СУХОПАРА О. М.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>НВП ТОВ «МТІ», м. Київ, Україна

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ЛІНІЙНИМ КРОКОВИМ ПРИБРОЕМ

**Мета.** Аналіз відомих підходів та виявлення особливостей зміни електричних параметрів при пересуванні рухомої ланки лінійних крокових пристроїв та побудова енергоефективного керування, що контролює ці зміни, для підвищення ефективності їх функціонування.

**Методика.** При дослідженні використовувались теорії електричних ланцюгів та електронних схем, неперервне перетворення Лапласу, що враховує зміну електричних параметрів при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою.

**Результати.** За результатами проведеного аналізу знайдена залежність часових інтервалів та зміни форми струму в обмотці лінійного крокового пристрою від положення рухомої ланки. Визначені інтервали розподілення спожитої енергії для здійснення пересування рухомої ланки на довжину кроку. Розглянута організація керування лінійним кроковим пристроєм без використання додаткових датчиків контролю за пересуванням рухомої ланки при енергоефективному керуванні лінійним кроковим пристроєм.

**Наукова новизна.** Визначені та проаналізовані часові інтервали при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою, їх залежність від форми струму в обмотці лінійного крокового пристрою, знайдені аналітичні вирази для їх розрахунку. Можливість організації роботи лінійного крокового пристрою, здійснюючи керування рухомою ланкою за формою струму в обмотці без додаткових датчиків, дозволяє реалізувати ефективне перетворення, передачу та розподілення енергії в системі енергоефективного керування лінійним кроковим пристроєм.

**Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані при створенні нових способів керування, що контролюють форму струму в обмотках лінійних крокових пристроїв без використання додаткових датчиків положення, пересування та швидкості, та нових схемотехнічних рішень засобів енергоефективного керування для їх реалізації.

**Ключові слова:** лінійний кроковий пристрій, форма струму, часові інтервали, енергоефективне керування.

**Вступ.** Використання лінійних крокових пристроїв (ЛКП), що є виконуючими елементами електроприводу з лінійним покрововим пересуванням рухомої ланки (РЛ), потребують створення нових ефективних засобів керування ними. Існує велика кількість різноманітних схем та засобів керування ЛКП, але недостатньо розглянуті питання керування ними з урахуванням електромагнітних процесів, що відбуваються в них при значному взаємному впливі електричних та механічних частин одна на одну, при достатньо великих індуктивностях та постійних часу обмоток, нелінійному характер електромагнітних параметрів ЛКП та пов'язані з цим задачі зменшення енергоспоживання, підвищення надійності та адаптивності роботи ЛКП, потребує додаткових досліджень та розробки нових засобів енергоефективного керування та схемотехнічних рішень для їх реалізації, є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз попередніх досліджень.** Розвиток та використання ЛКП в якості промислових роботів, маніпуляторів та різних автоматизованих пристроїв, побудованих на базі електромагнітного приводу лінійного пересування [1-7], дозволяє значно спростити механічну частину автоматизованих систем, підвищити надійність та забезпечити

функціональні можливості виконавчої частини системи за рахунок безпосереднього, без перетворювання інформації, використання сигналів, що надходять із блоку програмного курування (БПК).

БПК слугує для автоматичної підтримки заданого режиму роботи виконуючого органу (ВО). Він включає в себе програмний керуючий модуль на базі мікро або міні ЕОМ, перетворювача вхідної інформації для узгодження параметрів програмного пристрою з напівпровідниковим перетворювачем енергії, що формує відповідні рівні живлення ВО. Одночасно він вирішує задачі підвищення якості пересування ВО за допомогою формування потрібних законів керування. Однією із задач, що вирішує БПК, є забезпечення рівномірної послідовності керуючих імпульсів. Для підвищення надійності роботи ВО, підвищення якості руху та швидкодії системи між БПК та ВО використовують елементи зворотного зв'язку, блок датчиків (БД), в якості яких зазвичай використовують датчики пересування, положення або швидкості.

Найбільш широке застосування знайшли датчики положення [3, 7], які розділяють по числу каналів на одно - та багатоканальні; по принципу дії - на потенціометричні фотоелектричні та електромагнітні; по виду вихідної інформації - на імпульсні та потенціометричні. Імпульсний датчик подає інформацію як унітарний код, кількість імпульсів в яких відповідає кількості відпрацьованих кроків. Потенціометричні датчики видають інформацію у вигляді постійних сигналів які співпадають з періодами відпрацьованих кроків. Фотоелектричні датчики, встановлюють на волю двигуна як диск з перерізами або отворами кількість яких співпадає з кількістю кроків двигуна.

Електромагнітні датчики, це багатоканальні датчики з пасивним рухомим елементом. При пересуванні якоря в обмотках датчика відбувається модуляція змінного магнітного потоку яка використовується для формування інформаційних імпульсів про місцезнаходження якоря. Також в якості датчика положення можна використати спеціальні або власні обмотки ЛКП.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що для реалізації енергоефективного керування з використанням датчиків зворотного зв'язку, найбільш перспективним в плані отримання інформації о пересуванні рухомої ланки ЛКП є використання сигналів, що знімаються з власних обмоток ЛКП.

**Постановка завдання.** В наш час ЛКП з покровим пересуванням якоря та пристроями для їх керування, знайшли широке використання в якості промислових роботів та маніпуляторів, транспортних системах, вібротехнологічних установках та т. і., тому вирішення питання підвищення надійності та адаптивності роботи такого обладнання до зміни механічного навантаження при спрощенні системи керування ними з одночасним зменшенням енергоспоживання під час його роботи, є однією з важливих задач при проектуванні таких систем. Метою даної роботи є дослідження та розробка енергоефективного керування лінійними кроковими пристроями, що розглядаються в якості активно - індуктивного навантаження, в яких аналізується форма струму, що знімається з власних обмоток ЛКП при покровому пересуванні рухомої ланки, та визначаються часові інтервали таких змін, що використовуються для формування імпульсів керування РЛ ЛКП.

**Результати дослідження.** З великої кількості механізмів, що використовують для створення обертового моменту або синхронізуючого зусилля під дією струму та магнітного

поля та які можна розділити [1, 3]: а) пристрої у яких взаємодіють постійні магніти та провідники зі струмом (магнітоелектричні); б) пристрої у яких частини з магнітом'якого матеріалу втягуються в котушки зі струмом (електромагнітні); в) пристрої у яких взаємодіють котушки зі струмом, будемо розглядати тільки електромагнітні пристрої лінійного пересування принцип дії яких базується на дискретній зміні стану електромагнітного поля в робочому зазорі за рахунок імпульсного збудження або перемикання обмоток при пересуванні рухомої ланки на довжину кроку.

В залежності від виду керування та використаних ключових елементів існує великий вибір схем керування, що працюють на нелінійне активно - індуктивне навантаження якими є обмотки ЛКП. Незалежно від типу ключового елемента [8] та роду живлячої напруги [9], схеми керування ЛКП можна розділити на реверсивні, струм навантаження яких протікає в обох напрямках та неререверсивні які забезпечують в навантаженні пульсуючий струм одного напрямку [10].

Основним типом перетворювача, що використовується для живлення та керування ЛКП є неререверсивний перетворювач кожний канал якого є послідовним з'єднанням ключового елемента та обмотки ЛКП.

Структура ЛКП, розглядається як пристрій циліндричної форми з рухомою ланкою, яка набрана з феромагнітних елементів, що розділені немагнітними вставками. Зовнішній магнітопровід виконує роль статора, що складається із секцій з кільцевими магнітними полюсами в яких розміщені обмотки збудження. Полюси своїми наконечниками повернуті у бік рухомої ланки. Немагнітні вставки розділяють феромагнітні елементи таким чином, що останні зміщені відносно секцій статора на величину яка відповідає лінійному кроку пересування рухомої ланки. Полюсний поділ секції статора дорівнює довжині феромагнітного елемента, який займає всю її довжину в положенні магнітної рівноваги.

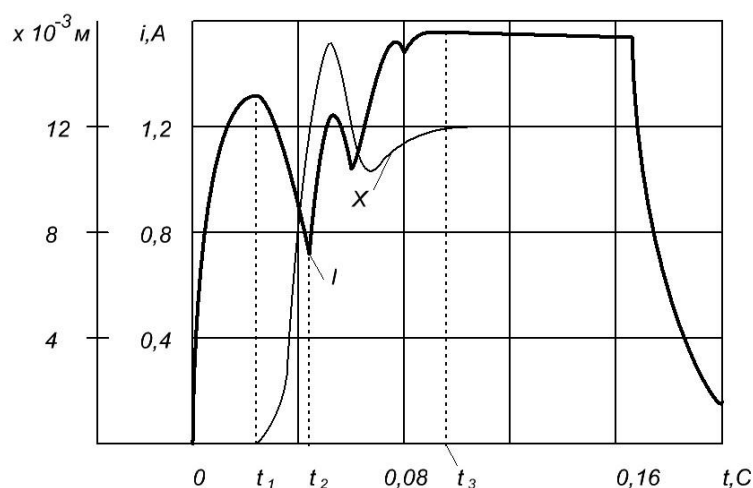


Рис.1. Форма струму в обмотці ЛКП

Реалізувати енергоефективне керування з контролем переміщення та швидкості РЛ ЛКП можливо в системі локально - замкнутого приводу, використовуючи сигнали відповідних датчиків для комутації обмоток ЛКП. Використання датчиків призводить до

ускладнення конструкції привода, збільшенню приєднаної маси рухомої частини, що погіршує динамічні та енергетичні показники привода в цілому. Іноді для комутації обмоток ЛКП використовують електрорушійну силу (ЕРС), наведену в допоміжних обмотка при пересуванні РЛ ЛКП, кількість яких дорівнює кількості основних обмоток ЛКП. В замкнутих системах керування для комутації обмоток ЛКП використовують датчики струму які включені в ланцюги обмоток ЛКП [7]. При цьому комутація обмоток відбувається коли струм досягає сталого значення, якір вже відпрацював крок та зайняв положення магнітної рівноваги. Надлишкова енергія, що продовжує надходити в обмотку призводить як до її марних втрат так і нагріву конструкції ЛКП.

Аналіз проведений для швидкодіючих електромагнітів та крокових двигунів [4, 6, 7] з рухомою ланкою із феромагнітного матеріалу, свідчить, що під дією електромагнітних сил відбувається зміна індуктивного опору на кроці пресування, а відповідно і повного опору обмотки, що відображається у зміні форми струму в обмотках. Таким чином струм в обмотках можна використати в якості функції керування, яку формує сам ЛКП, що відображає електромагнітні процеси у його внутрішній структурі при пересуванні рухомої ланки. При дослідженні форми та часових інтервалів осцилограми струму в обмотці –  $I(i_{\text{вкл}}(t))$  та відповідно знятої, осцилограми пересування рухомої ланки –  $X$ , на рис.1, можна визначити, що на інтервалі від  $0 - t_1$  зростає струм у включеній обмотці але ланка не рухається, потужність джерела живлення йде на накопичення електромагнітної енергії для початку її пересування. На інтервалі від  $t_1$  до  $t_2$  здійснюється пересування рухомої ланки, потужність джерела живлення перетворюється в механічну енергію. Після часу спрацювання  $t_2$ , що дорівнює часу зрушення  $t_1$  та часу пересування  $t_d$ , рухома ланка досягає положення магнітної рівноваги, струм в обмотці починає зростати і до часу  $t_3$  досягає сталого значення. На інтервалі від  $t_2$  до  $t_3$ , коли пересування скінчилося, спожита потужність витрачається тільки на нагрів структури ЛКП та повністю перетворюється в потужність втрат. Для енергоефективного функціонування ЛКП потрібно значно зменшити або скоротити часовий інтервал  $t_2 - t_3$ , а також інтервал  $t_1$ . Ефективність функціонування підвищується при зменшенні інтервалу  $t_1$ , за допомогою ланцюгів форсування струму [10] у включеній обмотці ЛКП, а інтервал  $t_2 - t_3$  зменшується, коли довжина імпульсів керування формується відповідно до зміни форми струму в обмотках ЛКП і відключення відбувається або в час  $t_2$  або після часу  $t_2$  з невеликою затримкою для надійного спрацювання ЛКП.

Розглянемо форму струму в обмотці ЛКП на рис. 1, та визначимо часові інтервали, які характеризують її зміни. До моменту часу  $t_1$ , струм змінюється по експоненційному закону з постійною часу  $\tau_n = L_{\text{min}} / R_n$ , де  $L_{\text{min}}$  - індуктивність обмотки перед спрацюванням рухомої ланки;  $R_n$  - активний опір обмотки. Повний опір ланцюга навантаження в операторній формі:  $Z_n(p) = R_n + pL_{\text{min}}$ . При нульових початкових умовах, використаємо безперервне перетворення Лапласа та визначимо перехідний струм на інтервалі  $0 - t_1$ :  $i(t) = \text{Res} \frac{U}{p(R_n + pL_{\text{min}})} e^{p_1 t_1} + \text{Res} \frac{U}{p(R_n + pL_{\text{min}})} e^{p_2 t_1}$ , де  $p_1 = 0$  та  $p_2 = -R_n / L_{\text{min}}$  - корені характеристичного рівняння навантаження, за умови  $Z_n(p) = 0$ ;  $U$  - напруга джерела живлення постійного струму. Рішення рівняння, після диференціювання та відповідних

математичних перетворень, прийме вигляд:  $i(t) = \frac{U}{R_H} (1 - e^{-\frac{R_H}{L_{min}} t})$ , звідки час зрушення  $t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{I_H}{I_H - i(t)}$ , де  $I_H = U/R_H$  – стале значення струму навантаження.

На кривій струму -  $I$ , рис. 1, в час  $t_1$ , струм досягає значення  $i(t_1)$ , при якому сила тяжіння долає момент опору та рухома ланка ЛКП починає пересуватися. Рівняння балансу сил для ЛКП, дорівнює  $F_{EM} = m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{пр} (x, \frac{dx}{dt})$ , де  $m = m_{р.л} + m_{пр}$  - маса рухомої ланки ЛКП та приєднаного навантаження;  $F_{EM}$  – тягова сила;  $F_{пр}(x, \frac{dx}{dt})$  – протидіюча сила, залежна, як від положення, так і від швидкості рухомої ланки. В мить зрушення рухомої ланки має місце рівняння  $d^2x/dt^2 = 0$ , що відповідає рівнянню сил  $F_{EM} = F_{пр}$ , тоді зусилля, що створює ЛКП:  $F_{EM} = (iw)^2 \frac{dG_m}{2dx} = \frac{\Phi^2 dG_m}{2G_m^2 dx}$ , де  $G_m$  – магнітна провідність ланцюга рухомої ланки;  $x$  – довжина пересування рухомої ланки;  $w$  – кількість витків обмотки ЛКП,  $\Phi$  - магнітний потік.

Враховуючи, що в мить зрушення  $t_1$ , тягова та протидіюча сили рівні, струм в момент зрушення рухомої ланки  $i(t_1) = \frac{\Psi}{L_{min}} = \frac{\Phi w}{L_{min}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2F_{пр} dx}{dG_m}}$ , звідки час зрушення:  $t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{1}{1 - i(t_1)/I_H} = \frac{w^2 G_m}{R_H} \ln \frac{1}{1 - \frac{R_H}{wU} \sqrt{\frac{2F_{пр} dx}{dG_m}}}$ . З часу  $t_1$  до часу  $t_2$ , відбувається пересування рухомої ланки ( $x$  - рис. 1). Для визначення часу пересування  $t_d$  використаємо рівняння балансу напруг  $\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U}{w} - \frac{iR_H}{w} = \frac{U}{w} - \frac{\Phi R_H}{L_{max}}$ , та балансу сил  $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_{EM}}{m} - \frac{F_{пр}}{m} = \frac{dG_m}{2mG_m^2 dx} \Phi^2 - \frac{F_{пр}}{m}$ . Приблизне аналітичне рішення можливо отримати, якщо диференційні рівняння подати ступеневим рядом, що сходиться [6]. Враховуючи, що в час  $t_1$  пересування та швидкість рухомої ланки дорівнює нулю, рівняння руху можливо апроксимувати ступеневою функцією, параболою  $k$  – порядку:  $x = a \cdot t^k$ , де  $a$  - коефіцієнт пропорційності. З аналізу кривих пересування рухомої ланки ЛКП [6, 7] можна визначити, що  $k = 3$ . Для визначення коефіцієнта  $a$  візьмемо другу похідну від рівняння руху РЛ ЛКП та підставимо рівняння потоку в рівняння балансу сил. Після відповідних математичних перетворень знайдемо час пересування:

$$t_d = \sqrt[3]{\frac{x}{a}} = \sqrt[3]{\frac{3 m w x G_m}{U \sqrt{\frac{F_{пр} dG_m}{2dx} - \frac{R_H F_{пр}}{w}}}}$$

Для перевірки отриманих виразів часу зрушення  $t_1$ , часу пересування  $t_d$ , та часу спрацювання  $t_2 = t_1 + t_d$  були зроблені розрахунки та отримані експериментальні дані які обирались у відповідності до параметрів ЛКП [11] з якого знімались характеристики, з величиною напруги живлення  $U=40$  в:  $t_{1розр.,сек} = 0,0815$ ,  $t_{1експ.,сек} = 0,083$ ;  $t_{d,розр.,сек} = 0,0774$ ,  $t_{d,експ.,сек} = 0,076$ ;  $t_{2розр.,сек} = 0,1589$ ,  $t_{2експ.,сек} = 0,159$ . Середня похибка для розрахункових та вимірних значень не перевищує 10%, яку можна пояснити наявністю втрат в електромагнітному ланцюзі навантаження та додатковим механічним опором рухомої ланки ЛКП.

При аналізі енергетичних характеристик на часових інтервалах, що характеризують пересування РЛ ЛКП, потужність джерела живлення використовується, як на створення тягового зусилля і гальмування РЛ ЛКП, так і на нагрів ЛКП в кінці робочого ходу рухомої ланки. На рис. 1, інтервал часу  $0 - t_1$  характеризує енергію, необхідну для подолання сил тертя і протидіючих сил інерції РЛ ЛКП та приєднаної до неї маси. З моменту часу  $t_1$  енергія, що надходить до обмоток ЛКП, використовується безпосередньо на пересування РЛ ЛКП та приєднаної до неї маси, виконуючи корисну роботу. На інтервалі часу з  $t_2$  до  $t_3$  енергії, що надходить в більшій мірі використовується на створення гальмівних зусиль, спрямованих на зменшенню кінетичної енергії РЛ ЛКП. Після часу  $t_3$  вся підведена енергія практично витрачається на нагрів ЛКП. Енергоефективне керування забезпечується при комутації обмоток в час  $t_2$ , коли рухома ланка досягла положення магнітної рівноваги в секції включеної обмотки ЛКП. Для зменшення інтервалу  $0 - t_1$  застосовують ланцюги форсування струму [10], при використанні, як додаткових джерела енергії, так і рекуперації енергії, що накопичується власно в структурі ЛКП, що підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД) електроприводу в цілому.

Для реалізації енергоефективного керування з вибором в якості функції керування зміни форми струму в обмотці ЛКП, з точки зору підвищення надійності та адаптивності роботи, при зміні механічного навантаження та зменшенні споживання енергії, необхідно використати систему керування, яка здатна відслідковувати зміни струму, при пересуванні рухомої ланки, та формувати імпульси керування ЛКП. Для роботи такої системи керування не потрібні громіздкі датчики положення, пересування та швидкості, які потребують складної конструктивно - технологічної реалізації та власної системи керування.

**Висновки.** Проведений у статті аналіз показав, що струм в обмотці ЛКП можна використати в якості функції енергоефективного керування, який без додаткових датчиків, формує сам лінійний кроковий пристрій, що відображає електромагнітні процеси у його внутрішній структурі при пересуванні рухомої ланки.

Зроблений аналіз та отримані аналітичні вирази для розрахунку часових інтервалів зміни струму в обмотці ЛКП показує, що формування імпульсів напруги потрібної амплітуди та довжини на інтервалі часу зрушення  $t_1$ , та пересування  $t_d$  ( $t_2 = t_1 + t_d$ ), дозволяє організувати енергоефективне керування при максимумі швидкодії та мінімумі енергоспоживання.

Конструювання ЛКП з властивостями, що дозволяють організувати енергоефективне керування без додаткових датчиків, за рахунок контролю електромагнітних процесів у власній конструкції, є перспективним напрямком проведення розробок в межах більш широкого кола застосування, наприклад, в автоматизації технологічних процесів в легкій промисловості та робототехніці.

Література

1. Гнатів А. В. Теорія електроприводу транспортних засобів / А. В. Гнатів, Ш. В. Аргун, І. С. Трунова. - Харків: ХНАДУ, 2016. - 292 с.
2. Емельянов А. В. Шаговые двигатели / А. В. Емельянов, А. Н. Шилин. - Волгоград: ВолгГТУ, 2005. - 48 с.
3. Гумен В. Ф. Следящий шаговый электропривод / В. Ф. Гумен, Т. В. Калининская. - Л.: Энергия, 1980. - 168 с.
4. Коваленко М.А. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С.15-20.
5. Yeadon W. H., Yeadon A. W. Handbook of Small Electric Motors. McGraw - Hill, 2001. - 1185 s.
6. Тер – Акопов А. К. Динамика быстродействующих электромагнитов / А. К. Тер – Акопов. - М.; Л.: Энергия, 1965. - 168 с.
7. Электромагнитный привод робототехнических систем / [А.А. Афонин, Р.Р. Белозер, В.В. Гребеников и др.]. - Киев: Наук. думка, 1986. - 272 с.
8. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Издательский дом "Додэка - XXI", 2005. - 384 с.
9. Хрусталеv Д.А. Аккумуляторы / Д.А. Хрусталеv. - М.: Изумруд, 2003. - 224 с.
10. Леоненко Л.И. Полупроводниковые форсирующие схемы / Л.И. Леоненко. - М.: Энергия, 1974. - 96 с.
11. Смолянінов В. Г. Поліпшення функціонування виконуючих пристроїв радіоелектронних засобів / В. Г. Смолянінов, О. М. Сухопара // Вісник НТУУ "КПІ". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. - 2012. - Вип. 48. - С.140-148.

References

1. Gnatov A. V. Teoriya elektroprivodu transportnih zasobiv [Theory electric drive of transport] / A. V. Gnatov, Sh. V. Argun, I. S. Trunova. - Harkiv: HNADU, 2016. - 292 p. [in Ukrainian].
2. Emelyanov A.V. Shagovye dvigateli [Step engines] / A.V. Emelyanov, A.N. Shilin. - Volgograd: VolgGTU, 2005. - 48 p. [in Russian].
3. Gumen V.F. Sledyashij shagovyj elektroprivod [Tracking step-by-step electric drive] / V. F. Gumen, T. V. Kalininskaya. - L.: Energiya, 1980. - 168 p. [in Russian].
4. Kovalenko M.A. (2015). Avtonomnij eksperimentalnij stend dlya viprobuvannya unipolyarnogo krokovogo dviguna na bazi mikrokontrolera [The autonomous experimental stand for testing a unipolar stepper motor based on a microcontroller] / M. A. Kovalenko, D. S. Macyuk // Elektrotehnika ta elektroenergetika - Electrical engineering & electricity, 2, 15-20 [in Ukrainian].
5. Yeadon W. H., Yeadon A. W. Handbook of Small Electric Motors. McGraw - Hill, 2001. -1185 p.
6. Ter – Akopov A. K. Dinamika bystrodeystvuyushih elektromagnitov [Dynamics of fast-acting electromagnets] / A. K. Ter – Akopov. - M.; L.: Energiya, 1965. - 168 p. [in Russian].
7. Elektromagnitnyj privod robototekhnicheskikh sistem [Electromagnetic drive of robotic systems] / [A.A. Afonin, R.R. Belozher, V.V. Grebenikov i dr.]. - Kiev: Nauk. dumka, 1986. - 272 p. [in Russian].
8. Voronin P. A. Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semejstva, karakteristiki, primenenie [Power semiconductor keys: families, characteristics, application] / P. A. Voronin. Izd. 2-e, pererab. i dop. - M.: Izdatelskij dom "Dodeka - HHI", 2005. - 384 p. [in Russian].
9. Hrustalev D.A. Akkumulyatory [Batteries] / D.A. Hrustalev. - M.: Izumrud, 2003. - 224 p. [in Russian].
10. Leonenko L.I. Poluprovodnikovye forsirovushie shemy [Semiconductor boosting circuits] / L.I. Leonenko. - M.: Energiya, 1974. - 96 p. [in Russian].
11. Smolyaninov V.G., Suhopara O.M. (2012). Polipshennya funkcionuvannya vikonyuyuchih pristroyiv radioelektronnih zasobiv [Improving the functioning of radio electronics performing devices] / V.G. Smolyaninov, O.M., Suhopara // Visnik NTUU "Kiyivskij politehnichnij institut". Seriya Radiotekhnika. Radioaparaturobuduвання - Visnyk NTUU "Kiev Polytechnic Institute". Series-Radio Engineering. Radio equipment, 48, 140-148 [in Ukrainian].

SMOLIANINOV V. G.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1657-1479>

Kyiv National University of Technologies and Design

SUKHOPARA A. N.

SPE LTD «МТИ»Kyiv, Ukraine

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ШАГОВЫМ  
УСТРОЙСТВОМ

<sup>1</sup>СМОЛЯНИНОВ В. Г., <sup>2</sup>СУХОПАРА А. Н.

<sup>1</sup>Киевский национальный университет технологий и дизайна

<sup>2</sup>НПП ООО "МТИ". Г. Киев, Украина

**Цель.** Анализ известных подходов и определение особенностей изменения электрических характеристик при движении подвижного звена линейного шагового устройства и построение

энергоэффективного управления, что контролируют эти изменения, для повышения эффективности их функционирования.

**Методика.** При исследовании использовались теории электрических цепей и электронных схем, непрерывное преобразование Лапласа, что учитывает изменение электрических параметров при перемещении подвижного звена линейного шагового устройства.

**Результаты.** По результатам проведенного анализа найдена зависимость временных интервалов и изменения формы тока в обмотке линейного шагового устройства от положения подвижного звена. Определены интервалы распределения потребляемой энергии для обеспечения перемещения подвижного звена на величину шага. Рассмотрена организация управления линейным шаговым устройством без использования дополнительных датчиков контроля за перемещением подвижного звена при энергоэффективном управлении линейным шаговым устройством.

**Научная новизна.** Определены и проанализированы временные интервалы при перемещении подвижного звена линейного шагового устройства, их зависимость от формы тока в обмотке, найдены аналитические выражения для их расчета. Возможность организации работы линейного шагового устройства, реализуя управление подвижным звеном по форме тока в обмотке без дополнительных датчиков, позволяет реализовать эффективное преобразование, передачу и распределение энергии в системе энергоэффективного управления линейным шаговым устройством.

**Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при создании новых способов управления, что контролируют форму тока в обмотках линейного шагового устройства без использования дополнительных датчиков положения, перемещения и скорости, и новых схемотехнических решений средств энергоэффективного управления для их реализации.

**Ключевые слова:** линейное шаговое устройство, форма тока, временные интервал, энергоэффективное управление.

## ENERGY EFFICIENT OPERATION OF THE LINEAR STEPPER DEVICE

<sup>1</sup>SMOLIANINOV V. G., <sup>2</sup>SUKHOPARA A. N.

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design

<sup>2</sup>SPE LTD "MTI" Kyiv, Ukraine

**Purpose.** Analysis of known approaches and determination of the characteristics of changes in electrical characteristics during the movement of the mobile link of a linear stepper device and the construction of energy-efficient control that control these changes in order to increase the efficiency of their functioning.

**Methodology.** The theories of electrical circuits and electronic circuits, continuous transformation of Laplace, which takes into account the change in electrical parameters when moving the mobile link of the linear stepping device.

**Findings.** Based on the results of the analysis, it was found that time intervals and changes in the shape of the current in the winding of the linear step device were dependent on the position of the mobile link. The intervals of energy consumption are defined to ensure that the rolling link is moved by the size of the step. It is considered the organization of the control of a linear step device without the use of additional sensors to monitor the movement of the mobile link in the energy efficient control of the linear step device.

**Originality.** The main approaches to the time intervals for the movement of the mobile link of the linear step device, their dependence on the current form in the winding, found analytical expressions for their calculation have been defined and analyzed. The ability to organize the work of a linear step device, implementing the control of the mobile link in the form of current in the winding without additional sensors, allows to implement an effective conversion, transmission and distribution of energy in the system energy efficient control of a linear step device.

**Practical value.** The results of the research can be used for the creation of new methods that control the shape of the current in the windings of the linear step device without the use of additional sensors of position, movement and speed, and new schematic solutions of energy efficient control devices for their implementation.

**Keywords:** linear step device, current form, time interval, energy efficient control.