

С.Г. Буряковський, Л.В. Асмолова, Ан.С. Маслій, Ар.С. Маслій, І.В. Обруч

## Розробка та дослідження мікропроцесорної системи автоматичного керування моношпального стрілочного переводу з лінійним двигуном індукторного типу та дискретним регулятором швидкості

*Робота присвячена розробці мікропроцесорної системи автоматичного керування безредукторним регульованим електроприводом стрілочного переводу моношпального типу на базі лінійного індукторного двигуна. Таке рішення дозволяє контролювати положення гостряків, здійснювати процес переводу з плавним доводом гостряків до рамної рейки, захистити елементи електродвигуна від перевантажень. Запропоновано структурну схему дискретного ПІД-регулятора швидкості, синтезованого в z-зображенні та отримано діаграми розподілу його коефіцієнтів за методом Чина-Хронса-Ресвіка. Наведені результати комп'ютерного моделювання показали, що час переводу гостряків менший ніж 0,7 с при сталому рівні задавання швидкості якоря 0,2 і 0,3 м/с, що дозволяє реалізувати сучасні вимоги до стрілочних переводів залізничного транспорту. Бібл. 25, табл. 2, рис. 12.*

**Ключові слова:** електропривод з лінійним індукторним двигуном, електромеханічна система, система керування, дискретний ПІД-регулятор швидкості.

**Вступ.** Транспортна система – це важлива складова економічного зростання національних економік світового господарства. Розвиток залізничних міжнародних транспортних мереж сприяє на інтеграцію товарообміну між Європейським Союзом (ЄС) і Україною. Тому оновлення транспортної інфраструктури України є одним з основних напрямів реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [1], яка закладає основу змін у транспортній галузі на наступні 8 років, а саме розвитку нових швидкісних міжрегіональних сполучень, сполучень з країнами ЄС та оновлення міської транспортної інфраструктури [2].

Невід'ємною частиною залізничної інфраструктури є стрілочні переводи. Розвиток їх систем автоматичного керування та вдосконалення технологій обслуговування значною мірою сприяє підвищенню безпеки руху та покращенню економічних показників діяльності залізниць [3–5].

Світовими компаніями проводиться робота над створенням нових типів стрілочних переводів [6, 7], а саме до моношпального їх виконання. Загальна їх концепція, як для звичайного, так і високошвидкісного руху, зводиться до забезпечення максимальної надійності та безпеки, при яких витрати на поточне утримання мінімальні. Сучасні стрілочні переводи оснащуються новими електродвигунами [7–10] та системами керування [4, 11].

В Україні відсутність регульованих електроприводів стрілочних переводів вимагає створення спеціалізованих електроприводів. Для підвищення їх ефективності є потреба створення нових типів електроприводів [12–14]. В [15] розглядалися питання розвитку функціональності залізничного стрілочного переводу шляхом впровадження електроприводу з вентиляно-індукторним двигуном, що обґрунтовується спрощенням механічної частини стрілочного переводу шляхом заміни редуктора на кульково-гвинтову пару та розміщенні усієї кінематичної лінії стрілочного переводу на одній шпалі.

Заміна ротативних електродвигунів на лінійні надає ще більш спрощення конструкції, що забезпечує підвищення ККД, зниження витрат на обслуговування та підвищення надійності роботи стрілочних

переводів. Відмінною особливістю таких двигунів є їх здатність до перетворення електричної енергії на механічні поступальні рухи виконавчих механізмів стрілочних переводів – гостряків і рухливих сердечників хрестовин, безпосередньо, без проміжних механічних перетворювачів. Електропривод з урахуванням лінійних електродвигунів електромагнітного типу (ЛДЕМТ) розглядався в [16]. Рациональність такого технічного рішення складається в запасі надлишку енергії, що має місце в кінці циклу роботи електроприводу стрілочного переводу для того, щоб в подальшому використовувати її на початку переміщення стрілок. Дана стаття присвячена вдосконаленню мікропроцесорної системи автоматичного керування безредукторним регульованим електроприводом стрілочного переводу моношпального типу на базі лінійного двигуна індукторного типу для отримання заданого закону керування рухом гостряків та зменшення часу переводу стрілки.

Особливістю стрілочних переводів такого типу є те, що завдяки унікальним властивостям конструкцій і можливостям систем керування, вони забезпечують високу точність позиціонування гостряків і необхідну керуваність тягового зусилля при урахуванні підвищення швидкості та вантажопотоку перевезень.

Таким чином, запропонований в статті шлях створення нової системи керування електроприводом стрілочного переводу є актуальним з точки зору необхідності переходу до нової сучасної елементної бази систем автоматичного керування та нових конструкційних рішень.

**Метою статті** є розробка мікропроцесорної системи автоматичного керування стрілочного переводу моношпального типу з лінійним двигуном індукторного типу (ЛДІТ) та дискретним пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) регулятором швидкості з налаштованими коефіцієнтами за методом Чина-Хронса-Ресвіка для забезпечення сучасних вимог безпеки руху.

Для досягнення наміченої мети поставлені такі завдання:

- розробка системи автоматичного керування стрілочного переводу моношпального типу з ЛДІТ, яка дозволяє здійснювати процес переводу з плавним

© С.Г. Буряковський, Л.В. Асмолова, Ан.С. Маслій, Ар.С. Маслій, І.В. Обруч

доводом гостряків до рамної рейки, захист двигуна від перевантажень та контроль положення гостряків для швидкісних і високошвидкісних залізниць електротранспорту;

- синтез дискретного ПІД-регулятора швидкості для електроприводу з двигуном індукторного типу, як елементу вдосконалення мікропроцесорної системи автоматичного керування стрілочного переводу для поліпшення його роботи як в штатних режимах, так і нестаціонарних.

**Матеріал дослідження.** Функціональна схема електроприводу стрілочного переводу наведена на рис. 1, до складу якої входять три блоки: ЛДІТ, регулятор швидкості з силовим перетворювачем у складі блоку управління і датчик положення гостряків, який здійснює контроль за переміщенням гостряків та щільним приляганням їх до рамної рейки.



Рис. 1. Функціональна схема електроприводу стрілочного переводу з ЛДІТ

На рис. 2,а показано поперечний перетин ЛДІТ, який розміщений в шпалі як подано на рис. 2,б.

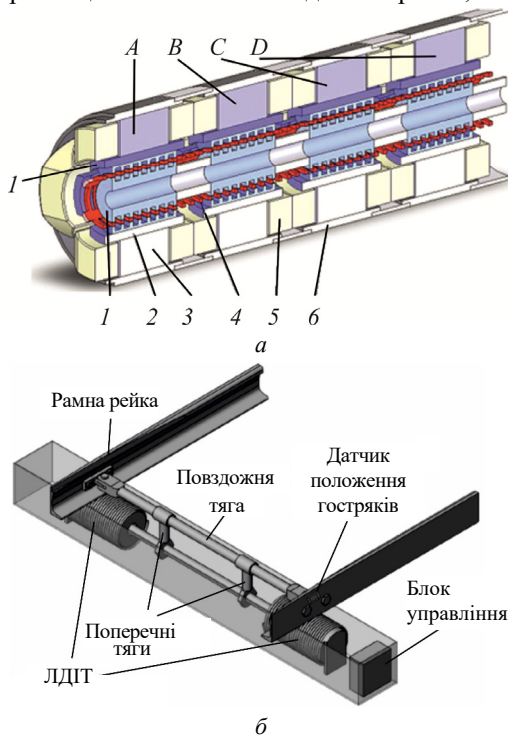


Рис. 2. Конструкція ЛДІТ (а) та розміщення його в одній шпалі (б):

- 1 – статор; 2 – полюсні наконечники зовнішнього статора; 3 – полюса; 4 – якір; 5 – котушки фаз; 6 – корпус

Лінійний електродвигун має чотири фази *A, B, C, D* та складається з двох статорів *I* (внутрішнього і зовнішнього), що дозволяє отримати мінімальний повітряний проміжок в міжзубцевій зоні при незнач-

них габаритах машини, зосереджуючи магнітний потік в зубцевій зоні. Почергове включення фаз електродвигуна (*A, B, C, D*) забезпечує рівномірний розподіл електромагнітної сили при русі якоря *4*. При нарощуванні кількості котушок (фаз), можна, якщо необхідно, істотно понизити коливання сили, що діє на якір, під час його руху. Ще одна перевага такої конструкції індукторного двигуна – це відносно велика довжина якоря в порівнянні з електромагнітом, дозволить легко реалізувати переміщення гостряків без зміни інших габаритних розмірів двигуна.

Залежно від сигналу датчика положення гостряків, які встановлені на зовнішній стороні рамної рейки і забезпечують контроль за щільним приляганням до неї гостряка, силовий перетворювач, розташований у блоці управління і виконаний на базі польових або IGBT транзисторів, підключає котушку статора до джерела живлення. При цьому електродвигун здійснює перетворення електричної енергії в механічну, приводячи в рух якір.

Такий електродвигун вимагає іншої, ніж у ЛДЕМТ, системи автоматичного керування і, як наслідок, відмінного рішення, але забезпечує реверсну роботу без застосування додаткових пружин [16].

Математичний опис та імітаційна модель ЛДІТ на основі рішення рівняння Лагранжа наведено в [17] та в нормальній формі Коші має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, x)}{\partial i_A}} \left( U_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, x)}{\partial x} v \right); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, x)}{\partial i_B}} \left( U_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, x)}{\partial x} v \right); \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, x)}{\partial i_C}} \left( U_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, x)}{\partial x} v \right); \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, x)}{\partial i_D}} \left( U_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, x)}{\partial x} v \right); \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{el} - F_{on} - \alpha v}{m}; \\ \frac{dx}{dt} = v, \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_A, U_B, U_C, U_D$  – напруга джерел живлення;  $r_A, r_B, r_C, r_D, i_A, i_B, i_C, i_D$  – активні опори та струми у відповідних фазах статора;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$  – потокозчеплення відповідних фаз;  $x$  – переміщення якоря;  $F_{on}$  – сила опору;  $\alpha$  – коефіцієнт тертя між направляючою і якорем;  $v$  – швидкість руху якоря;  $m$  – маса якоря;  $F_{el}$  – сила руху електродвигуна.

Для підключення фаз двигуна до джерела живлення та регулювання на ній напруги необхідний електронний комутатор. Оскільки робота ЛДІТ не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній зазвичай застосовується напівмостова схема [18]. Фрагмент схеми електронного комутатора (для фази *A*) наведено на рис. 3.

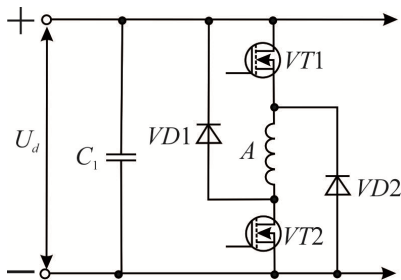


Рис. 3. Схема фази *A* електронного комутатора для 4-фазного ЛДІТ

Фази (*A*, *B*, *C*, *D*) включені між напівпровідниковими ключами (фаза *A* – *VT1* – *VT2*; фаза *B* – *VT3* – *VT4*; фаза *C* – *VT5* – *VT6*; фаза *D* – *VT7* – *VT8*), що працюють в режимі ШІМ залежно від положення гостряків і напрямку їх руху. Захисні діоди (для фази *A* – *VD1* – *VD2*; для фази *B* – *VD3* – *VD4*; для фази *C* – *VD5* – *VD6*; для фази *D* – *VD7* – *VD8*) забезпечують протікання струму після закриття верхнього або нижнього ключів у фазах.

Для управління ЛДІТ був синтезований цифровий ПІД-регулятор швидкості, який описується передаточною функцією:

$$W_p(z) = K_p + K_i \frac{T_0 z}{z-1} + K_d \frac{z-1}{T_0 z}, \quad (2)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передачі пропорційної складової;  $K_i$  – коефіцієнт передачі інтегральної складової;  $K_d$  – коефіцієнт передачі диференціальної складової;  $T_0$  – період дискретності, с.

На підставі передавальної функції (2) отримано різницеве рівняння, що описує алгоритм роботи дискретного ПІД-регулятора:

$$\begin{aligned} u[n] &= K_p e[n] + K_i (u[n-1] + T_0 e[n]) + \\ &+ \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) = \\ &= K_p e[n] + K_i T_0 e[n] + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) + K_i u[n-1]. \end{aligned} \quad (3)$$

За рівнянням (3) побудовано структурну схему, що наведена на рис. 4.

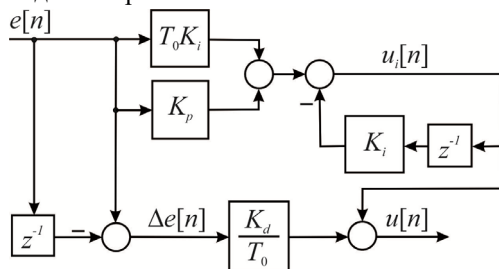


Рис. 4. Структура дискретного ПІД-регулятора

Оскільки ЛДІТ описується нелінійною функцією [17] то для налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора стандартні методи, що застосовуються для налаштування лінійних об'єктів, не підходять [6, 19]. Тому їх розрахунок виконувався за методом Чина-Хронса-Ресвіка [20], що дозволяє отримати більший запас стійкості ніж традиційний метод Циглера-Нікольса [21, 22].

За методом Чина-Хронса-Ресвіка для розрахунку коефіцієнтів ПІД-регулятора спостерігається реакція

об'єкту управління на ступінчастий сигнал задавання. Елементи об'єкта управління, що мають аперіодичну характеристику (рис. 5), апроксимуються послідовним з'єднанням аперіодичної ланки та ланки запізнення.

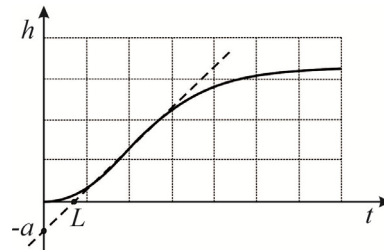


Рис. 5. Приклад кривої розгону об'єкту керування

З рис. 5 видно, що для розрахунку коефіцієнтів ПІД-регулятора за методом Чина-Хронса-Ресвіка використовуються два параметри:  $a$  і  $L$ . Їх розрахунок виконувався за умовами відсутності перерегулювання (CHR0%) та його наявності у 20% (CHR20%). Формули, за якими коефіцієнти  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  розраховуються наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок коефіцієнтів ПІД-регулятора за методом Чина-Хронса-Ресвіка за відсутності перерегулювання та його наявності

Метод	$K_p$	$K_i$	$K_d$
CHR0%	$\frac{0,6}{a}$	$\frac{L}{K_p}$	$\frac{0,5L}{K_p}$
CHR20%	$\frac{0,95}{a}$	$\frac{1,4L}{K_p}$	$\frac{0,47L}{K_p}$

Розрахункові параметри ПІД-регулятора корегувались вручну для покращення якості регулювання, оскільки аналітичні вирази ґрунтуються на спрощених моделях об'єкту і надають похибку. Підстроювання параметрів регуляторів виконані за наступними правилами: збільшення пропорційного коефіцієнта  $K_p$  збільшує швидкодію і знижує запас стійкості; зі зменшенням інтегральної складової  $K_i$  похибка регулювання з часом зменшується швидше; зменшення сталої інтеграції  $T_i$  зменшує запас стійкості; збільшення диференціальної складової  $K_d$  збільшує швидкодію.

Після підстроювання коефіцієнтів ПІД-регуляторів швидкості набирають вигляду, показаний на рис. 6.

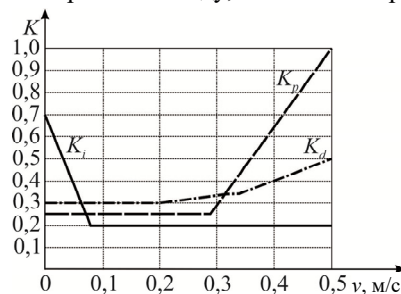


Рис. 6. Коефіцієнти ПІД-регулятора

З рис. 6 видно, що усі коефіцієнти мають залежність від швидкості руху гостряків, а саме: коефіцієнт пропорційної ланки  $K_p$  різко зростає від 0,25 до 1 при швидкості вище 0,3 м/с; коефіцієнт інтегральної ланки  $K_i$  має різко спадаючу лінійну характеристику при малих швидкостях руху до 0,08 м/с і змінюється в межах від 0,7 до 0,2; коефіцієнт диференціальної

ланки  $K_d$  має більш пологою характеристику і змінюється в межах від 0,3 до 0,5 при швидкості руху гостряків вище 0,2 м/с.

З урахуванням цього рис. 4 матиме вигляд, як наведено на рис. 7.

Розгорнута функціональна схема стрілочного переводу наведена на рис. 8, де відокремлено пунктиром ЛДІТ з датчиком положення гостряків, електронним комутатором (рис. 3), розподільником з перетворювачем імпульсів та регулятором швидкості (рис. 7), що входять до складу блоку управління.

Система управління стрілочного переводу моношального типу розглядається як двоконтурна система підпорядкованого регулювання координат з ПІД-регулятором швидкості, яка спільно з ЛДІТ зведена до загальної імітаційної моделі у MATLAB [23, 24], з урахуванням усіх елементів, параметрів та зв'язків між ними на рис. 9, а на рис. 10 наведено схема механічної частини.

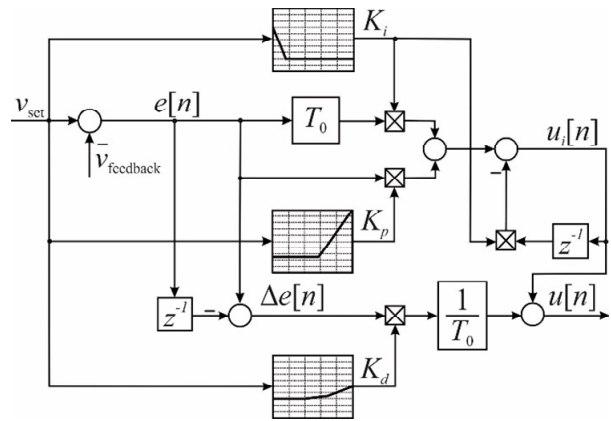


Рис. 7. Структура дискретного ПІД-регулятора швидкості з налаштованими коефіцієнтами за методом Чина-Хронса-Ресвіка

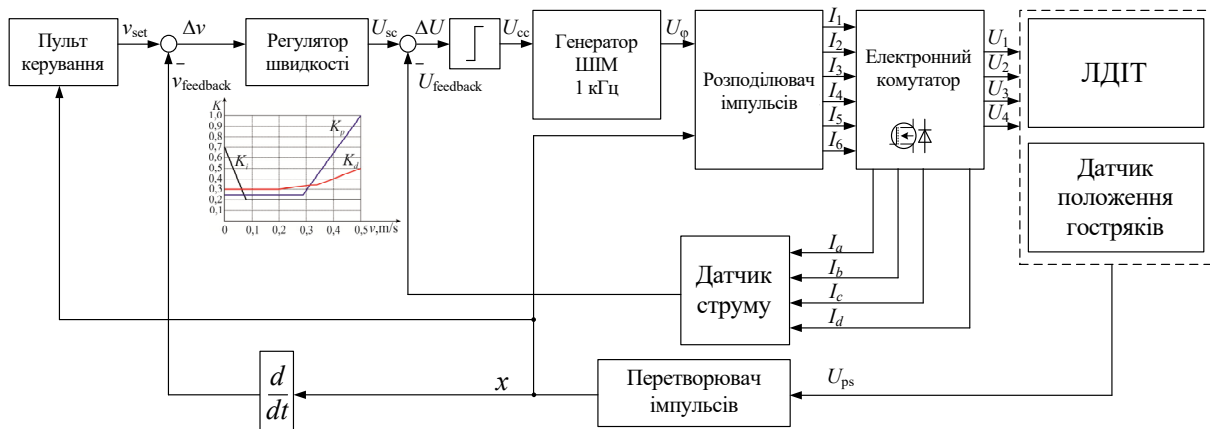


Рис. 8. Розгорнута функціональна схема електроприводу стрілочного переводу з ЛДІТ

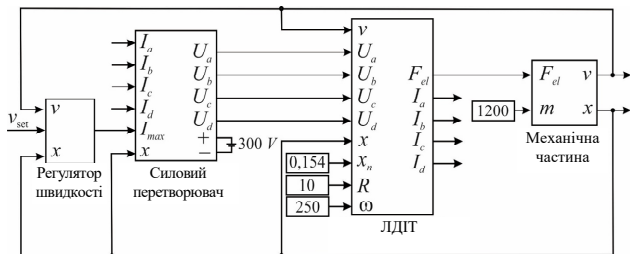


Рис. 9. Узагальнена імітаційна модель стрілочного переводу з ЛДІТ в середовищі MATLAB

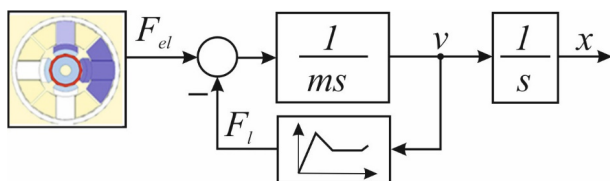


Рис. 10. Структурна схема механічної частини стрілочного переводу з ЛДІТ

У зворотному зв'язку системи є блок навантаження  $v = f(F_c)$ , який відображає характеристику тертя [25], оскільки стрілочні переводи працюють за різних погодних умов під впливом випадкових факторів (опалення, дощ, сніг, речовини, які висипаються з вагонів, тощо). Середні величини коефіцієнта тертя по поверхні рейка-подушка (сталь-сталь) наведені в табл. 2.

На рис. 11 та рис. 12 наведено перехідні процеси роботи електроприводу стрілочного переводу, а саме переміщення гостряків та швидкості переводу з ПІД-регулятором швидкості з урахуванням нелінійної характеристики тертя при різних заданнях швидкості руху гостряків.

Таблиця 2

Коефіцієнт тертя в стані спокою і ковзання

Матеріали, що труться	Коефіцієнт тертя			
	в стані спокою		в стані ковзання	
	без змащення	зі змазкою	без змащення	зі змазкою
рейка – подушка	0,8	0,5-0,4	0,15-0,3	0,05-0,18

З отриманих графіків перехідних процесів встановлено, що ПІД-регулятор підтримує задану швидкість руху гостряків 0,2 м/с (рис. 11) і 0,3 м/с (рис. 12), що дозволяє контролювати положення гостряків. Також забезпечує процес переводу з плавним доводом гостряків до рамної рейки, що захищає елементи електродвигуна від механічних перевантажень.

На графіках перехідних процесів переміщення гостряків відображено їх безударний довід до рамної рейки, що підтверджується кривими швидкості в кінці процесу переводу від  $t > 0,6$  с.



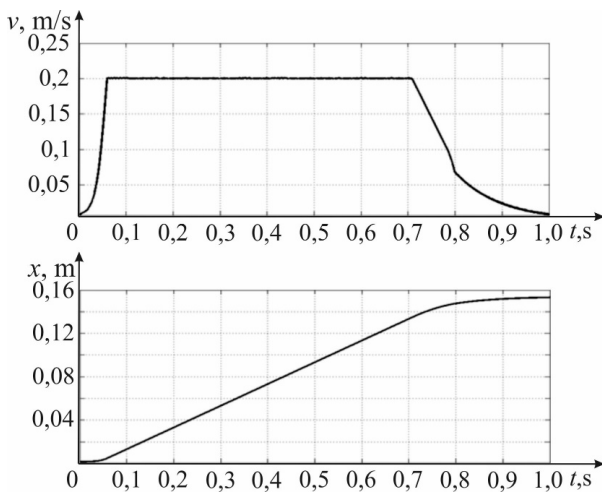


Рис. 11. Перехідні процеси у стрілочному переводі моношпального типу з ПІД-регулятором швидкості при заданні швидкості  $v_3 = 0,2$  м/с

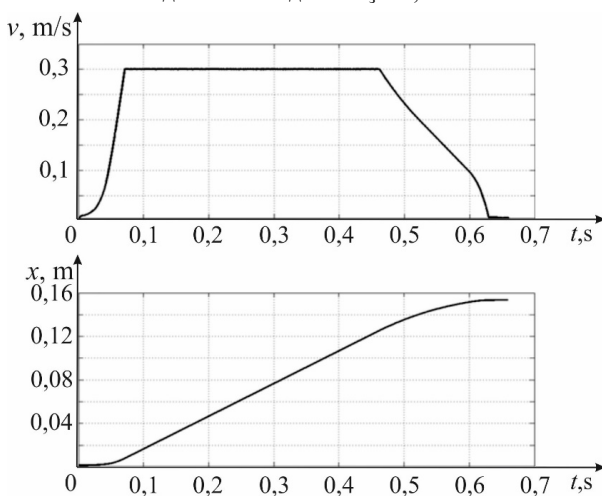


Рис. 12. Перехідні процеси у стрілочному переводі моношпального типу з ПІД-регулятором швидкості при заданні швидкості  $v_3 = 0,3$  м/с

### Висновки.

1. Запропоновано та досліджено мікропроцесорну систему автоматичного керування стрілочного переводу моношпального типу з ЛДІТ та дискретним ПІД-регулятором швидкості, що дозволило поліпшити якість динаміки його роботи.

2. На основі аналітичних методів  $z$ -перетворення синтезовано дискретний ПІД-регулятор швидкості та розроблено його імітаційну модель з урахуванням нелінійної характеристики тертя, яка підтвердила поліпшення динаміки роботи приводу стрілочного переводу з ЛДІТ.

3. Методом Чина-Хронса-Ресвіка отримано діаграми розподілу коефіцієнтів ПІД регулятора в залежності від швидкості руху якоря: коефіцієнт пропорційної ланки різко зростає від 0,25 до 1 при швидкості вище 0,3 м/с; коефіцієнт інтегральної ланки має різко спадаючу лінійну характеристику при малих швидкостях рух до 0,08 м/с і змінюється в межах від 0,7 до 0,2; коефіцієнт диференціальної ланки має найпологішу характеристику і змінюється в межах від 0,3 до 0,5 при швидкості руху гостряків вище 0,2 м/с.

4. На основі дослідження перехідних процесів переміщення гостряків показана можливість реалізації

безударного доводу їх до рамної рейки, що підтверджується кривими швидкості в кінці процесу переведення стрілки, які прямують до 0 та можливість отримання часу переведу гостряків менш ніж за 0,7 с при сталому рівні задання швидкості 0,2 і 0,3 м/с руху якоря для ЛДІТ.

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/430-2018-%D1%80> (Дата звернення: 14.02.2022).
2. Міністерство інфраструктури України. Інформація про українські залізниці. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (Дата звернення: 14.02.2022).
3. Буряковский С.Г., Маслий Ар.С., Маслий Ан.С. Перспективы модернизации электроприводов стрелочных переводов. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2013, № 2 (22), Ч. 2, С. 124-127. Режим доступу: [http://sauc.kdu.edu.ua/files/EES\\_2-2013\(22\)\\_Part\\_2.pdf](http://sauc.kdu.edu.ua/files/EES_2-2013(22)_Part_2.pdf) (Дата звернення: 14.02.2022).
4. Kande M., Isaksson A., Thottappillil R., Taylor N. Rotating Electrical Machine Condition Monitoring Automation – A Review. *Machines*, Oct. 2017, vol. 5, no. 4, p. 24. doi: <https://doi.org/10.3390/machines5040024>.
5. Bemment S.D., Goodall R.M., Dixon R., Ward C.P. Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Sep. 2017, vol. 232, no. 5, pp. 1407-1424. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409717727879>.
6. Rasmussen P.O. *Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors*. Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, 2002. 274 p.
7. *Design of High-Speed Railway Turnouts*. Southwest Jiao Tong University Press. Published by Elsevier Inc. 2015. Режим доступу: <https://www.xnjdcbs.com/upfile/file/201705/14937827805937.pdf> (Дата звернення: 14.02.2022).
8. Arslan B., Tiryaki H. Prediction of railway switch point failures by artificial intelligence methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Mar. 2020, vol. 28, no. 2, pp. 1044-1058. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1906-66>.
9. Sezen S., Karakas E., Yilmaz K., Ayaz M. Finite element modeling and control of a high-power SRM for hybrid electric vehicle. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Mar. 2016, vol. 62, pp. 49-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.01.006>.
10. Дорохин Б.П., Сердюк Т.Н. Внедрение новых типов двигателей стрелочных электроприводов. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, 2013, № 6, С. 71-84. Режим доступу: <http://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/51291> (Дата звернення: 14.02.2022).
11. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*, Feb. 2020, vol. 13, no. 3, art. no. 700. doi: <https://doi.org/10.3390/en13030700>.
12. Lagos R.F., San Emeterio A., Vinolas J., Alonso A., Aizpun M. The influence of track elasticity when travelling on a railway turnout. *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2014, p. 11. doi: <https://doi.org/10.4203/ccp.104.208>.
13. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdvi I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.04>.

14. Моисеенко В.И., Поддубняк В.И. *Автоматика и компьютерные системы на станциях*. – К.: Транспорт Украины, 1999. – 142 с.
15. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Asmolova L.V., Goncharuk N.T. Mathematical modelling of transients in the electric drive of the turnout of the mono-sleeper type with switched-inductor motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 16-22. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.03>.
16. Forster N., Gerlach A., Leidhold R., Buryakovskiy S., Masliy A., Lyubarskiy B.G. Design of a Linear Actuator for Railway Turnouts. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, pp. 463-470. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591471>.
17. Buryakovskiy S., Lyubarskiy B., Masliy Ar., Masliy An. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2015, № 19 (95), С. 75-78. Режим доступу: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1838> (Дата звернення: 14.02.2022).
18. Буряковский С. Г., Карпенко Н. П., Любарский Б. Г., Маслий Ар. С., Маслий Ан. С. Математическое описание линейного электродвигателя индукторного типа для стрелочного перевода. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика»*, 2016, № 1 (4), С. 258-260.
19. Kuznetsov V.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. Multiobjective synthesis of two degree of freedom nonlinear robust control by discrete continuous plant. *Technical Electrodynamics*, 2020, no. 5, pp. 10-14. <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.010>.
20. Chien-Hrones-Reswick Autotuning Method. Режим доступу: <https://www.ni.com/docs/ru-UA/bundle/labview-2021/page/lvpidmain/chienforms.html> (Дата звернення: 14.02.2022).
21. Ziegler-Nichols Tuning Rules for PID. Режим доступу: <https://www.mstarlabs.com/control/znrule.html> (Дата звернення: 14.02.2022).
22. Huba M., Chamraz S., Bistak P., Vrancic D. Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, art. no. 6157. doi: <https://doi.org/10.3390/s21186157>.
23. Черных И.В. *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink*. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
24. Balamurugan S., Umarani A. Study of Discrete PID Controller for DC Motor Speed Control Using MATLAB. *2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441)*, 2020, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213780>.
25. Yuan Z., Wu M., Tian C., Zhou J., Chen C. A Review on the Application of Friction Models in Wheel-Rail Adhesion Calculation. *Urban Rail Transit*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00141-y>.
- 124-127. Available at: [http://sauc.kdu.edu.ua/files/EES\\_2-2013\(22\)\\_Part\\_2.pdf](http://sauc.kdu.edu.ua/files/EES_2-2013(22)_Part_2.pdf) (Accessed 14 February 2022). (Rus).
4. Kande M., Isaksson A., Thottappillil R., Taylor N. Rotating Electrical Machine Condition Monitoring Automation – A Review. *Machines*, Oct. 2017, vol. 5, no. 4, p. 24. doi: <https://doi.org/10.3390/machines5040024>.
5. Bemment S.D., Goodall R.M., Dixon R., Ward C.P. Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Sep. 2017, vol. 232, no. 5, pp. 1407-1424. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409717727879>.
6. Rasmussen P.O. *Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors*. Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, 2002. 274 p.
7. *Design of High-Speed Railway Turnouts*. Southwest Jiao Tong University Press. Published by Elsevier Inc. 2015. Available at: <https://www.xnjdcbs.com/upfile/file/201705/14937827805937.pdf> (Accessed 14 February 2022).
8. Arslan B., Tiryaki H. Prediction of railway switch point failures by artificial intelligence methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Mar. 2020, vol. 28, no. 2, pp. 1044-1058. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1906-66>.
9. Sezen S., Karakas E., Yilmaz K., Ayaz M. Finite element modeling and control of a high-power SRM for hybrid electric vehicle. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Mar. 2016, vol. 62, pp. 49-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.01.006>.
10. Dorohin B.P., Serdyuk T.M. Implementation of new types of points motors. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 2013, no. 6, pp. 71-84. Available at: <http://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/51291> (Accessed 14 February 2022). (Rus).
11. Fathy Abouzeid A., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*, Feb. 2020, vol. 13, no. 3, art. no. 700. doi: <https://doi.org/10.3390/en13030700>.
12. Lagos R.F., San Emeterio A., Vinolas J., Alonso A., Aizpun M. The influence of track elasticity when travelling on a railway turnout. *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2014, p. 11. doi: <https://doi.org/10.4203/cmp.104.208>.
13. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdui I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.04>.
14. Moiseenko V.I., Poddubnyak V.I. *Автоматика і комп'ютерні системи на станицях* [Automation and computer systems in stations]. Kiev, Transport of Ukraine Publ., 1999. 142 p. (Rus).
15. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Asmolova L.V., Goncharuk N.T. Mathematical modelling of transients in the electric drive of the turnout of the mono-sleeper type with switched-inductor motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 16-22. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.03>.
16. Forster N., Gerlach A., Leidhold R., Buryakovskiy S., Masliy A., Lyubarskiy B.G. Design of a Linear Actuator for Railway Turnouts. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, pp. 463-470. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591471>.
17. Byrakovskiy S., Ljubarskiy B., Masliy A., Masliy A. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2019, no. 19 (95), pp. 75-78. Available at: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1838> (Accessed 14 February 2022).
18. Buryakovskiy S.G., Karpenko N.P., Lyubarskiy B.G., Masliy Ar.S., Masliy An.S. Mathematical description of linear motor for inductor-type turnouts. *Collection of materials of the International scientific and technical conference «Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education and practice»*, 2016, no. 1 (4), pp. 258-260. (Rus).

#### REFERENCES

1. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku: rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30 travnia 2018 r. № 430-r* [On approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of May 30, 2018 № 430-r]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/430-2018-%D1%80> (Accessed 14 February 2022). (Ukr).
2. *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. Informatsiia pro ukrainski zaliznytsi* [Ministry of Infrastructure of Ukraine. General information about railway transport]. Available at: <https://mtu.gov.ua/en/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznytsi.html> (Accessed 14 February 2022). (Ukr).
3. Buryakovskiy S., Masliy Ar., Masliy An. Prospects modernization of electric drive of pointer translations. *Electromechanical and energy saving systems*, 2013, no. 2 (22), part 2, pp.

19. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V. Multiobjective synthesis of two degree of freedom nonlinear robust control by discrete continuous plant. *Technical Electrodynamics*, 2020, no. 5, pp. 10-14. <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.010>.
20. Chien-Hrones-Reswick Autotuning Method. Available at: <https://www.ni.com/docs/ru-UA/bundle/labview-2021/page/lvpidmain/chienforms.html> (Accessed 14 February 2022).
21. Ziegler-Nichols Tuning Rules for PID. Available at: <https://www.mstarlabs.com/control/znrule.html> (Accessed 14 February 2022).
22. Huba M., Chamraz S., Bistak P., Vrancic D. Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 18, art. no. 6157. doi: <https://doi.org/10.3390/s21186157>.
23. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2007. 288 p. (Rus).
24. Balamurugan S., Umarani A. Study of Discrete PID Controller for DC Motor Speed Control Using MATLAB. *2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCI-1441)*, 2020, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCI-144147971.2020.9213780>.
25. Yuan Z., Wu M., Tian C., Zhou J., Chen C. A Review on the Application of Friction Models in Wheel-Rail Adhesion Calculation. *Urban Rail Transit*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00141-y>.

Надійшла (Received) 17.03.2022

Прийнята (Accepted) 23.06.2022

Опублікована (Published) 07.09.2022

Буряковський Сергій Геннадійович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Асмолова Лариса Валеріївна<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

Маслій Андрій Сергійович<sup>3</sup>,

Маслій Артем Сергійович<sup>4</sup>, к.т.н., доц.,

Обруч Ігор Володимирович<sup>2</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут

«Молнія» Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»,

61013, Харків, вул. Шевченка, 47,

e-mail: sergbyrg@i.ua

<sup>2</sup> Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

e-mail: Larisa.Asmolova@khp.edu.ua (Corresponding Author),

Ihor.Obruch@khp.edu.ua

<sup>3</sup> ТОВ «СЦБ-ГРУП»,

61009, Харків, вул. Одеська, 42,

e-mail: asa.anc.corp@gmail.com

<sup>4</sup> Український державний університет залізничного транспорту,

61050, Харків, майдан Фейєрбаха, 7,

e-mail: a.masliy@ukr.net

S.G. Buriakovskiy<sup>1</sup>, L.V. Asmolova<sup>2</sup>, An.S. Maslii<sup>3</sup>, Ar.S. Maslii<sup>4</sup>, I.V. Obruch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research and Design Institute «Molniya»

of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>3</sup> LTD «SCB-GROUP»,

42, Odeska Str., Kharkiv, 61009, Ukraine.

<sup>4</sup> Ukrainian State University of Railway Transport,

7, Feierbakh Square, Kharkiv, 61050, Ukraine.

**Development and study of a microprocessor automatic control system for a mono-switch tie type with a linear inductive electric motor and a discrete speed controller.**

**Introduction.** The article is devoted to the development of the microprocessor automatic control system for a gearless controlled electric drive of a mono-switch tie based on a linear inductor electric motor. This solution provides control the position of the switch point, to carry out the transfer process with a smooth drive of shanks to the frame rail, to protect electric motor elements from overloads. **Goal.** development and study of the behavior of microprocessor automatic control system for mono-switch tie type with linear inductive electric motor and discrete PID speed controller which coefficients are adjusted according to Chin-Hrons-Reswick method to meet modern traffic safety requirements and improve operational reliability factors. **Methodology.** On the basis of electric drive theory, a kinematic line of a mono-switch tie type with nonlinear friction characteristic is presented. Using differential equation theory and Laplace transformation, a mathematic description of a linear inductor electric motor has been made. Using the z-transform method, a difference equation for describing a discrete PID speed controller is obtained, the coefficients of which are derived using the Chin-Hrons-Reswick method. A simulation mathematical model of the electric drive mono-switch tie type as the microprocessor automatic control system with linear inductive electric motor and discrete PID speed controller and nonlinear friction characteristic was built in MATLAB. **Results.** Simulation modelling of a mathematical model of the microprocessor automatic control system of the electric drive mono-switch tie type with the linear inductive electric motor and discrete PID speed controller and nonlinear friction characteristic have been developed and performed. Studies of dynamics of switch point movement have shown that, a drive time of less than 0.7 s at a constant speed motor armature of 0.2 and 0.3 m/s provides to meet modern requirements for railway switch points. The application of discrete PID speed controller has shown improved dynamics of switch point. **Originality.** First for the electric drive of the mono-switch tie type with linear inductive electric motor a mathematical model of the discrete PID speed controller and nonlinear friction characteristic as an object of speed control of switch point movement, has been developed. **Practical value.** Mathematical model of a railway track switch of the mono-switch tie type with linear inductive electric motor and discrete PID speed controller has been developed to carry out the control of the position of the switch point, process with a smooth drive them to the frame rail, to protect electric motor elements from overloads. References 25, tables 2, figures 12.

**Key words:** electric drive with linear inductive electric motor, electromechanical system, control system, discrete PID speed controller.

How to cite this article:

Buriakovskiy S.G., Asmolova L.V., Maslii An.S., Maslii Ar.S., Obruch I.V. Development and study of a microprocessor automatic control system for a mono-switch tie type with a linear inductive electric motor and a discrete speed controller. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.01>