

С.Г. Буряковський, А.С. Маслій, Л.В. Асмолова, Н.Т. Гончарук

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СТІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ МОНОШПАЛЬНОГО ТИПУ З ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ДВИГУНОМ

Робота присвячена розвитку функціональності залізничного стрілочного перевалу шляхом впровадження вентиляно-індукторного електроприводу. Таке рішення дає обґрунтування для спрощення механічної частини стрілочного перевалу шляхом заміни редуктора на кульково-гвинтову пару, а також розмістити усю кінематичну лінію стрілочного перевалу на одній шпалі. Наведено математичний опис чотирифазного вентиляно-індукторного двигуна, та спрощеної механічної лінії стрілочного перевалу у вигляді одномасової електромеханічної системи. Розроблена імітаційна математична модель електроприводу стрілочного перевалу моношпального типу як система підлеглого керування з вентиляно-індукторним двигуном, яка враховує нелінійну характеристику навантаження. Наведено результати комп'ютерного моделювання з ПИД та нечітким регулятором швидкості, які показали, що нечіткий ПИД регулятор більш якісно відпрацьовує задані величини та переміщення гостряків. Бібл. 18, табл. 2, рис. 14.

Ключові слова: вентиляно-індукторний електропривод, електромеханічна система, система керування, нечіткий регулятор швидкості.

Работа посвящена развитию функциональности железнодорожного стрелочного перевода путем внедрения вентиляно-индукторного электропривода. Такое решение дает обоснование для упрощения механической части стрелочного перевода путем замены редуктора на шарико-винтовую пару, а также разместить всю кинематическую линию стрелочного перевода на одной шпале. Приведено математическое описание четырехфазного вентиляно-индукторного двигателя и упрощенной механической линии стрелочного перевода в виде одномассовой электромеханической системы. Разработанная имитационная математическая модель электропривода стрелочного перевода моношпального типа как система подчиненного управления с вентиляно-индукторным двигателем учитывает нелинейную характеристику нагрузки. Приведенные результаты компьютерного моделирования с ПИД и нечетким регулятором скорости показали, что нечеткий ПИД регулятор более качественно обрабатывает заданные величины и перемещения остряков. Библ. 18 табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: вентиляно-индукторный электропривод, электромеханическая система, система управления, нечеткий регулятор скорости.

Вступ. Одним з основних напрямів реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [1] є оновлення транспортного сектору України і поступова гармонізація діючих у цій сфері стандартів та політики з існуючими в Європейському Союзі. Серед основних цілей і завдань щодо розвитку транспортного сектору передбачено розвиток галузі залізничного транспорту, технічних потужностей залізниць, оскільки існує загроза незабезпечення в подальшому потреб економіки України в перевезеннях та неможливості виконання пасажирських перевезень.

Сьогодні технічний ресурс залізниці практично вичерпано, капітальний ремонт і реконструкції потребують близько 11 тис. км залізничних колій (близько 30 % від загальної протяжності), спостерігається низька швидкість руху поїздів, що посилюється зношеністю колій, які знаходяться в критичному стані. Показник вантажо-напруженості українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1 км) в 3-5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн [2].

Саме тому в галузі залізничного транспорту одним із пріоритетних напрямів формування та реалізації державної політики є переведення галузі на європейський рівень, оновлення та модернізація основних фондів; техніко-технологічна модернізація залізничного транспорту, підвищення рівня безпеки залізничних перевезень, модернізація колійного господарства.

Реалізація зазначених напрямів техніко-технологічної модернізації залізничного транспорту сприятиме підвищенню рівня безпеки та якості залізничних перевезень, забезпечить ефективне функціонування та розвиток залізничного транспорту.

Особлива роль відводиться якості функціонування стрілочних переводів. Пошук засобів підвищення експлуатаційних характеристик їх роботи стосується модернізації або заміни електродвигуна [3], впровадження нових типів датчиків та механізмів запирання гостряків [4].

В [5] поліпшення динаміки роботи та розширення функціональних можливостей залізничної автоматики розглядалися засобами регульованого електроприводу на прикладі стрілочного перевалу СП-6м на основі двигуна постійного струму, оскільки в Україні нажалі досі використовуються приводи такого типу.

Розвиток залізничного транспорту, збільшення маси поїздів і зростання швидкостей їх руху привели до необхідності застосування приводів з двигунами змінного струму [6]. Асинхронні електродвигуни трифазного змінного струму мають ряд переваг в порівнянні з електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, а саме відсутність такого складного і малонадійного вузла, як колектор, що значно скорочує експлуатаційні витрати на поточне обслуговування та ремонт. В даний час на залізниці застосовуються електродвигуни змінного струму типу МСТ [7].

У [8] розроблена математична модель стрілочного перевалу СП-6м, який досить поширено експлуатується в Україні, на базі двигунів постійного і змінного струмів.

Подальша модернізація вітчизняних стрілочних переводів потребує заміну існуючих конструкцій приводів, які вже морально і технічно застаріли. Ці системи в багаторічній практиці роботи показали свою працездатність, але на сьогоднішній день вони не можуть відповідати новим вимогам, що ставляться до швидкісного

рейкового транспорту. Тому необхідність модернізації систем стрілочних приводів очевидна і повинна здійснюватися засобами електроприводу [9-11].

Поряд з удосконаленням існуючих електроприводів стрілочних переводів шляхом заміни ненадійних елементів і електродвигуна, світовими компаніями проводиться робота над створенням нових їх типів [12]. Все частіше стрілочні переводи оснащуються модифікованою системою приводу з мікроконтролерним управлінням.

Електропривод розробки Bombardier Transportation [13] EBI Switch 2000 – невзрізний вбудований у шпалу стрілочний привод (рис. 1), який є найкращим прикладом шпального переводу на сьогоднішній день.



Рис. 1. Загальний вигляд стрілочного переводу EBI Switch 2000

Особливістю EBI Switch 2000 є наявність в конструкції перетворювача частоти, що програмується. Його застосування дозволяє здійснювати рівномірний пуск і гальмування двигуна, контролювати струм і зупиняти двигун у випадку неможливості доводу гостряків за певний час переводу. На рис. 2 показана схема компоновки стрілочного переводу EBI Switch 2000, де прийняті такі позначення: 1 – електродвигун; 2 – перетворювач частоти; 3 – редуктор; 4 – вал з передачею гвинт-гайка.

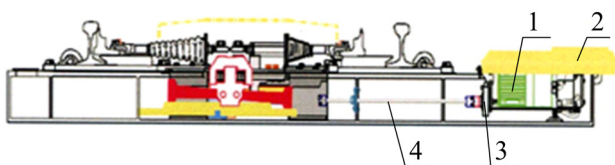


Рис. 2. Схема компоновки стрілочного переводу EBI Switch 2000

Будь-який компонент системи EBI Switch 2000 замінюється менш ніж за 15 хвилин без зняття шпали. Електропривод цього типу планового технічного обслуговування й ремонту не потребує. EBI Switch 2000 випробуваний при експлуатації близько 10^6 циклів без відмов. Середній час напрацювання на відмову становить 10-15 років.

Поряд з розробкою і впровадженням мікропроцесорних пристроїв та створення сучасного малообслуговуваного обладнання є важливим завданням створення нових типів стрілочних переводів, які мали би забезпечити максимальну надійність та безпеку як звичайного, так і високошвидкісного руху та приводили би до зниження витрат часу на укладку та обслуговування за рахунок відмови від попереднього монтажу на допоміжній платформі.

Метою роботи є дослідження поведінки роботи стрілочного переводу моношпального типу для забезпечення сучасних вимог безпеки руху та поліпшення показників експлуатаційної надійності.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

- розробити математичну модель стрілочного переводу моношпального типу з вентиляльно-індукторним двигуном та кульково-гвинтовою парою як перспективного елемента системи автоматизації для швидкісних і високошвидкісних залізниць електротранспорту;
- розробити імітаційну модель нової конструкції стрілочного переводу, яка отримана шляхом заміни старого типу редуктора на кульково-гвинтову пару, що дозволяє розмістити всю конструкцію приводу стрілочного переводу в шпалі та приводить до зменшення розміру і часу установки;
- на базі синтезованого в [14] пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) регулятора швидкості, а також нечіткого регулятора дослідити динамічні процеси в стрілочному переводі моношпального типу для поліпшення його роботи як в штатних режимах, так і нестационарних.

Матеріал дослідження. Для порівняння обрано електропривод стрілочного переводу типу СП-6м (рис. 3), кінематична схема якого наведена в [5], що складається з електродвигуна (ЕД), редуктора з вмонтованою муфтою фрикційного типу та шибери, які знаходяться всередині корпусу.



Рис. 3. Зовнішній вигляд стрілочного переводу СП-6м

Для переведення стрілки на електродвигун (ЕД) подається напруга. Його вал починає обертатися через сполучну муфту валу-шестерні 2 редуктора, розташованого в корпусі 1 механічної передачі (рис. 4). Вал-шестерня з шестернею 3 утворює перший каскад передачі. Обертання від шестерні 3 через проміжну шестерню 6 передається на шестерню 12 (другий каскад). Через фрикціон, розташований в корпусі 1, обертання передається на третій каскад передачі – вал-шестерню 11 і зубчасте колесо 5 головного валу 10.

Шиберна шестерня 8, яка виконана одним цілим з головним валом, здійснює пересування шибери 9 (четвертий каскад передачі). Зубчасте колесо 5 вільно насаджено на головний вал, виступ якого після повороту на кут 46° приходиться в зачеплення з диском головного валу. Таким чином, холостий хід приводу становить 46° . На зубчастому колесі 5 є трапецеїдальний виступ для обмеження повороту колеса. Наявність технологічного зазору величиною 46° необхід-

ний для полегшення розгону двигуна і запасу їм деякої кінетичної енергії з метою зриву гостряків на початку процесу переводу.

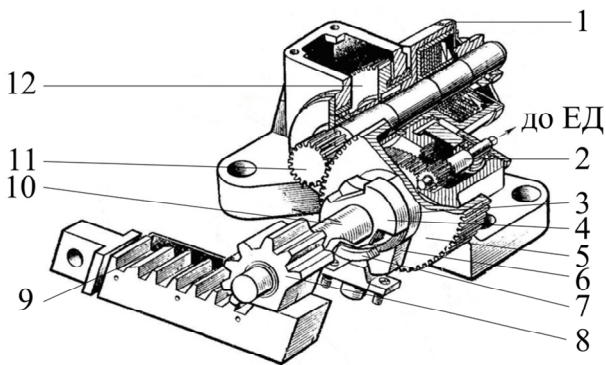


Рис. 4. Механічна передача стрілочного переводу СП-6м

Таким чином, механічна передача дозволяє отримати необхідну швидкість обертання головного валу і обертальний момент необхідної величини та передає обертальний рух якоря до робочої рейці (шиберів), перетворюючи його в поступальний рух для переведення гостряків стрілки. Але його конструкція достатньо складна, що знижує загальну надійність системи.

Для спрощення конструкції стрілочного переводу виконано заміну кінематичної ланки передачею «гвинт-гайка», за допомогою якої перетворюється обертальний рух гвинта в поступальну ходу гайки. Така передача дозволяє істотно підвищити зусилля переводу, не збільшуючи потужності електродвигуна [15]. Передачі цього типу мають додаткові витрати на тертя, але ця проблема вирішується за рахунок використання кульково-гвинтової пари «гвинт-гайка» (рис. 5), яка має кращі показники і застосовується для більш точних переміщень гостряків, ніж звичайна гвинтова.

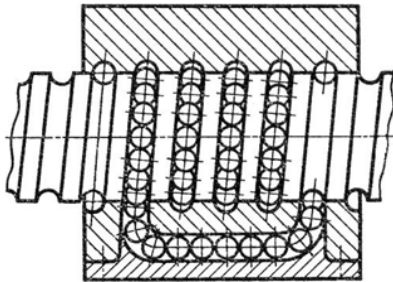


Рис. 5. Кульково-гвинтова пара «гвинт-гайка»

Перевагами такої пари є те, що вона працює з малими витратами на тертя (за рахунок кочення), високим ККД передачі, оскільки обертальний момент від гвинта на гайку передається через кульки в гайці. Обертання гвинта приводить до пересування гайки з кульками в горизонтальній площині. Гайка пов'язана з кареткою, котра в свою чергу через взрізний пристрій, який підпружинений кулькою, пересуває шибер.

Модернізація також полягає в тому, що автори статті пропонують електродвигун постійного або змінного струму замінити вентильно-індукторним двигуном (ВІД) [16, 17]. Оскільки порівняно з асинхронним двигуном ВІД має більш високий пусковий момент, а з електродвигуном постійного струму – не потребує періодичного обслуговування і заміни щіток в колекторно-щітковому вузлу, бо він відсутній. Отже, ВІД має конс-

труктивні та експлуатаційні переваги, які дозволяють робити прогноз, що такі машини допоможуть не тільки спростити механічну частину приводу і систему контролю гостряків, а й підвищити його надійність і швидкість. Крім того, вони найдешевші у виробництві.

Функціональна схема ВІД наведена на рис. 6, до складу якої входять три блоки: електромеханічний перетворювач енергії (ЕМП), електронний комутатор (ЕК) та блок керування (БК) у складі блоку управління (БУ) і датчик положення ротора (ДПР) у складі блоку допоміжного обладнання, який здійснює контроль за переміщенням гостряків. Блок управління здійснює захист двигуна від перевантажень (струмових, температурних) та управляє електронним комутатором.

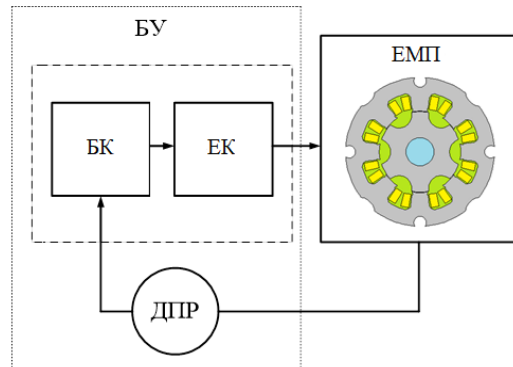


Рис. 6 Функціональна схема електроприводу з ВІД

За основу було вибрано 4-фазний ВІД з геометрією 8/6, його математична модель описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = AA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_A + AB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_B + \\ + AC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_C + AD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_D + \\ + KA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot \omega + LAA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_A R_A + \\ + LAB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_B R_B + LAC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_C R_C + \\ + LAD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_D R_D; \\ \frac{di_B}{dt} = BA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_A + BB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_B + \\ + BC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_C + BD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_D + \\ + KB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot \omega + LBA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_A R_A + \\ + LBB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_B R_B + LBC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_C R_C + \\ + LBD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_D R_D; \\ \frac{di_C}{dt} = CA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_A + CB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_B + \\ + CC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_C + CD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_D + \\ + KC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot \omega + LCA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_A R_A + \\ + LCB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_B R_B + LCC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_C R_C + \\ + LCD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_D R_D; \\ \frac{di_D}{dt} = DA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_A + DB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_B + \\ + DC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_C + DD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot u_D + \\ + KD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot \omega + LDA(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_A R_A + \\ + LDB(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_B R_B + LDC(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_C R_C + \\ + LDD(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) \cdot i_D R_D; \\ M_{em} = FM(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma); \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_l, \end{cases}$$

де $i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma$ – струми фаз A, B, C, D відповідно та кут повороту ротора; u_A, u_B, u_C, u_D – фазні напруги; $AA, AB, AC, AD, BA, BB, BC, BD, CA, CB, CC, CD, DA, DB, DC, DD$ – коефіцієнти фазних напруг; KA, KB, KC, KD – коефіцієнти кутової швидкості обертання; $LAA, LAB, LAC, LAD, LBA, LBB, LBC, LBD, LCA, LCB, LCC, LCD, LDA, LDB, LDC, LDD$ – коефіцієнти фазних струмів; R_A, R_B, R_C, R_D – активні опори відповідних фаз двигуна; FM – коефіцієнт моменту двигуна; J – момент інерції ротора; ω – кутова швидкість двигуна; M_{em}, M_l – електромагнітний момент двигуна та статичний момент навантаження, відповідно.

Всі розглянуті коефіцієнти – це складні функції, які залежать від струмів фаз та кута обертання ротора електродвигуна.

Застосування нового типу електродвигуна в поєднанні з кульково-гвинтовою парою дозволяє розмістити всю конструкцію приводу в порожнистій шпалі, що знижує витрати в редукторі, зменшує розмір стрілочного переводу і спрощує завдання його установки або заміни, а також підвищує надійність і знижує експлуатаційні витрати. Конструкція такого стрілочного переводу наведена на рис. 7, де відокремлено пунктиром ВІД (1) з електромеханічним перетворювачем енергії (2), електронним комутатором, який входить до складу блоку управління (3) і датчиком положення ротора, який розташований в блоці допоміжного обладнання (4).

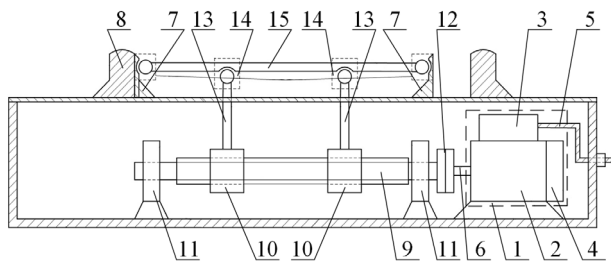


Рис. 7. Конструктивна схема стрілочного переводу моношпального типу

Залежно від сигналу датчика положення ротора, електронний комутатор підключає фазу двигуна до джерела живлення через кабель (5). При цьому електромеханічний перетворювач енергії (2) здійснює перетворення електричної енергії в механічну, приводячи в рух вал машини (6). Кульково-гвинтова пара «гвинт-гайка» перетворює обертальний рух гвинта (9) в поступальну ходу гайок (10). Гвинт закріплений на опорних підшипниках (11) і з'єднаний з валом двигуна, через муфту (12). Гайки через вертикальні тяги (13), шарніри (14) і подовжню тягу (15) передають зусилля гострякам (7), які здійснюють своє переміщення між рамною рейкою (8) [18].

Для дослідження процесів, що відбуваються у механічній частині стрілочного переводу моношпального типу, за конструктивною схемою (рис. 7) створено математичну імітаційну модель (рис. 8), з урахуванням усіх елементів, параметрів та зв'язків між ними.

На відміну від [8], де кінематична лінія стрілочного переводу розглядалася двомасовою та тримасовою системами, механічна частина стрілочного переводу моношпального типу розглядається як єдина електромеханічна система, тобто одномасова (рис. 9). Такою її можна

вважати з огляду на те, що зусилля до поздовжньої тяги від гайок передається через дві вертикальні тяги (зусилля до поздовжньої тяги прикладається в двох точках), а також знехтувати зазорами в з'єднаннях, оскільки вони з'являються тільки в процесі їх вироблення.

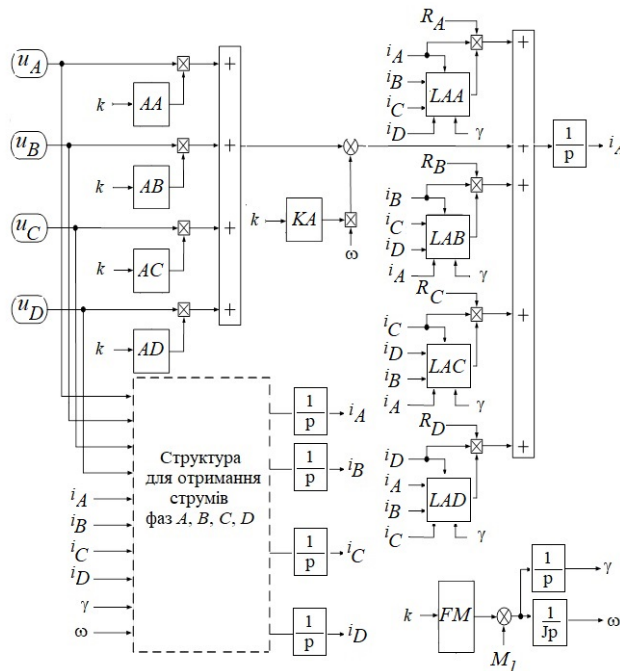


Рис. 8. Структурна схема стрілочного переводу моношпального типу

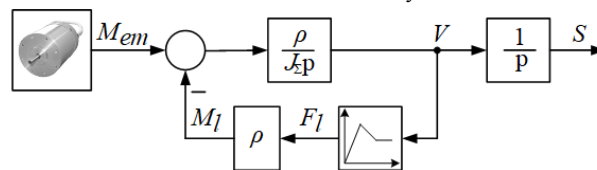


Рис. 9. Структурна схема механічної передачі стрілочного переводу моношпального типу

Структурна схема на рис. 9 має сумарний приведений момент інерції до електродвигуна J_{Σ} , який складається з моментів інерції ротора ВІД, передачі «гвинт-гайка» та мас гостряків. У зворотному зв'язку системи є блок навантаження $V = f(F_l)$, який відображає характеристику тертя, оскільки стрілочні переводи працюють за різних погодних умов під впливом випадкових факторів (опале листя, дощ, сніг, речовини, які висипаються з вагонів, тощо). Середні величини коефіцієнта тертя по поверхні рейка-подушка (сталь-сталь) приведені в табл. 1.

Таблиця 1

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

Система управління стрілочного переводу моношпального типу розглядається як система підлеглого регулювання координат з ПІД та нечітким ПІД регуляторами швидкості, яка спільно з ВІД зведена до загальної імітаційної моделі на рис. 10, а на рис. 11 наведено схему механічної частини.

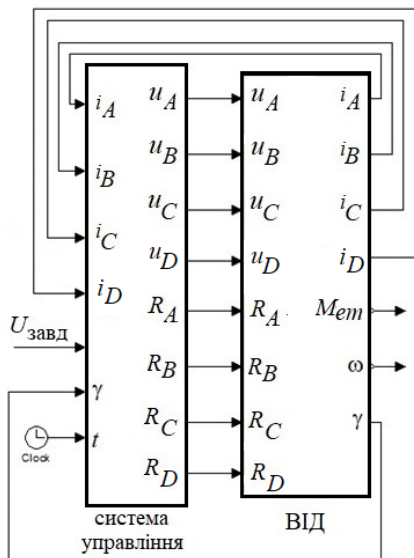


Рис. 10. Узагальнена імітаційна модель ВІД з системою управління

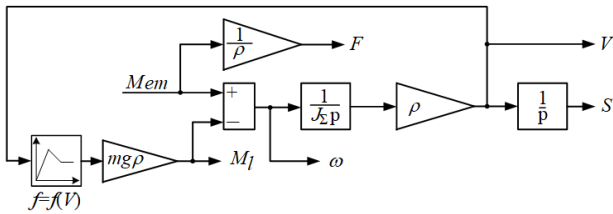


Рис. 11. Імітаційна модель механічної частини стрілочного переводу моношпального типу

Робота стрілочного переводу моношпального типу досліджувалась при сталому навантаженні з урахуванням характеристики тертя, що найбільш негативно впливає на процес переводу гостряків. В результаті імітаційного моделювання кінематичної лінії стрілочного переводу отримано осцилограми розподілу тягового зусилля на гостряках $F = f(t)$, швидкості руху їх переведення $V = f(t)$ та переміщення $S = f(t)$, які наведені на рис. 12.

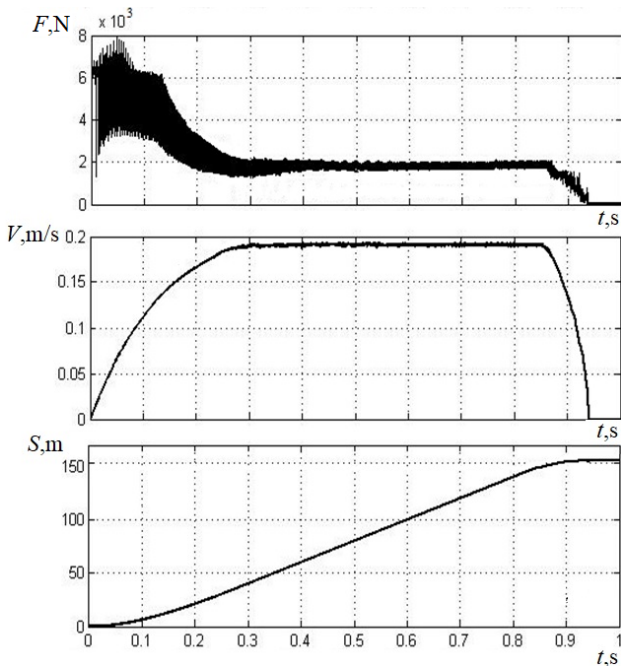


Рис. 12. Перехідні процеси у механічній передачі стрілочного переводу моношпального типу

Отримані результати показують, що у кінематичній лінії стрілочного переводу присутні коливання тягового зусилля, амплітуда яких у порівнянні з традиційним стрілочним переводом знизилась в 5,5-6 разів [8]. Такі коливання у більшій мірі залежать від характеру поведінки електромагнітного моменту.

На рис. 13 та рис. 14 наведено перехідні процеси роботи електропривода, а саме електромагнітного моменту та швидкості з ПІД регулятором швидкості (рис. 13) та з нечітким ПІД регулятором швидкості (рис. 14) з додатковим сталим навантаженням в $t = 0,6$ с.

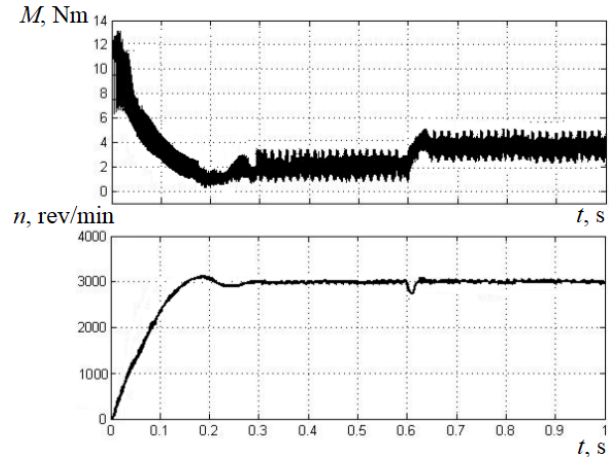


Рис. 13. Перехідні процеси у стрілочному переводі моношпального типу з ПІД регулятором швидкості

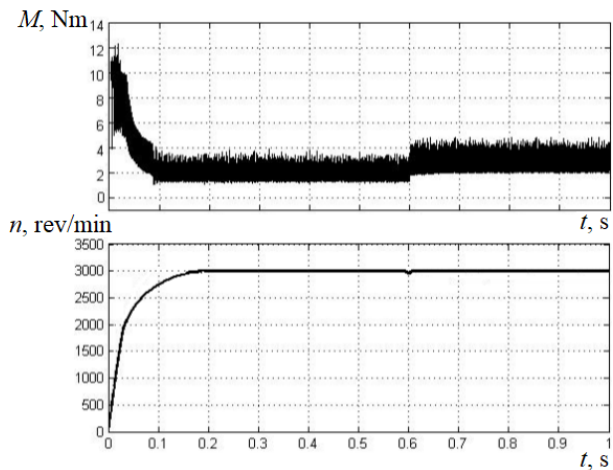


Рис. 14. Перехідні процеси у стрілочному переводі моношпального типу з нечітким ПІД регулятором швидкості

З отриманих графіків перехідних процесів встановлено, що найбільш якісний перехідний процес відповідає системі з нечітким ПІД регулятором швидкості (рис. 14), оскільки швидкість електродвигуна виходить на сталий рівень без перерегулювання на відміну від використання ПІД регулятора швидкості (рис. 13). Основні показники якості регуляторів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні показники якості процесів регулювання

Показник якості	ПІД регулятор	Нечіткий ПІД регулятор
Перерегулювання, σ_{\max} , %	4,2	0
Час регулювання, t_s , с	0,27	0,17
Число коливань, N	1	0

Крім того, запропонований тип стрілочного переводу відпрацьовує задане переміщення гостряків за

час до 1 с, що є надважливим за умов його використання для швидкісного рейкового транспорту.

Висновки.

1. За розробленою математичною моделлю стрілочного переводу моношпального типу з вентиляційно-індукторним двигуном та кульково-гвинтовою парною виконано дослідження динаміки переміщення гостряків в середовищі MATLAB. Результати показали, що перехід від традиційного стрілочного переводу до моношпального типу обґрунтований. На відміну від електродвигунів, що експлуатуються сьогодні, ВІД має конструктивні переваги для спрощення механічної частини приводу, а також системи контролю гостряків. Це дозволило поліпшити якість динаміки роботи стрілочного переводу, що забезпечує надійність та безпеку як звичайного, так і високошвидкісного руху рейкового транспорту.

2. Конструктивне спрощення кінематичної передачі виконано шляхом виключення проміжного редуктора у існуючого сьогодні стрілочного переводу ЕВІ Switch 2000, що приводить до зниження витрат часу на укладку та обслуговування стрілочного переводу, а також робить конструкцію більш надійною.

3. Перехід до стрілочному переводу моношпального типу дозволяє більш ефективно застосувати мікропроцесорну систему управління, створити перспективні засоби захисту електродвигуна та забезпечити контроль положення гостряків.

4. Використання в системі керування ПІД та нечіткого ПІД регуляторів швидкості з урахуванням нелінійної характеристики тертя, показали поліпшення динаміки роботи стрілочного переводу. В системі з нечітким ПІД регулятором не тільки збільшилась швидкість переводу, але і спостерігається більш якісний процес роботи стрілочного переводу моношпального типу з ВІД.

Конфлікт інтересів. Автори 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: 20.10.2020).
2. Міністерство інфраструктури України. Інформація про українські залізниці. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (Дата звернення: 20.10.2020).
3. 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>.
4. 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>.
5. Buriakovskiy S., Smirnov V., Asmolova L., Obruch I., Rafalskiy O., Maslii A. Analysis of optimization criteria for the process of switch displacement in a DC railroad turnout. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Dec. 2019, vol. 6, no. 2 (102), pp. 58-69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187580>.
6. 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, p. 700. doi: <https://doi.org/10.3390/en13030700>.

7. 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: 20.10.2020).
8. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pasko O.V., Smirnov V.V. Mathematical modelling of transients in the electric drive of the switch – the main executive element of railway automation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 17-23. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.03>.
9. 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>.
10. 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>.
11. Моисеенко В.И., Поддубняк В.И. *Автоматика и компьютерные системы на станциях*. К.: Транспорт Украины, 1999. – 142 с.
12. 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>.
13. Sokol Y.I., Buryakovskiy S.G., Masliy Ar.S. Energy-efficient electric drive of multifunctional turnout. *Problemy Kolejnictva*, 2014, no. 165, pp. 99-107. Режим доступу: http://atena.ikolej.pl/images/PDF/165_8.pdf (Дата звернення: 20.10.2020).
14. Buriakovskiy S., Maslii A., Pasko O., Denys I. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 69-79. doi: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.7>.
15. Li F., Jiang Y., Li T., Du Y. An improved dynamic model of preloaded ball screw drives considering torque transmission and its application to frequency analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 7, p. 168781401771058. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017710580>.
16. Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskiy B., Maslii A., Karpenko N., Pomazan D., Maslii A., Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1, no. 2 (91), pp. 68-75. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122422>.
17. 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>.
18. Буряковський С.Г., Маслій Ар.С., Маслій Ан.С. Електропривід стрілочного переводу. Патент України № 95497, 2014.

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 20.10.2020). (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-zaliznici.html> (Accessed 20.10.2020). (Ukr).
3. 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>.
4. 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>.

5. Buriakovskiy S., Smirnov V., Asmolova L., Obruch I., Rafal'skiy O., Maslii A. Analysis of optimization criteria for the process of switch displacement in a DC railroad turnout. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Dec. 2019, vol. 6, no. 2 (102), pp. 58-69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187580>.

6. 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, p. 700. doi: <https://doi.org/10.3390/en13030700>.

7. 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://ecsr.dit.edu.ua/article/view/51291> (Accessed 20.10.2020). (Rus).

8. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pasko O.V., Smirnov V.V. Mathematical modelling of transients in the electric drive of the switch – the main executive element of railway automation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 17-23. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.03>.

9. 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>.

10. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdii 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>.

11. Moiseenko V.I., Poddubnyak V.I. *Avtomatika i kompiuternye sistemy na stantsiakh* [Automation and computer systems in stations]. Kiev, Transport of Ukraine Publ., 1999. 142 p. (Rus).

12. 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>.

13. Sokol Y.I., Buryakovskiy S.G., Maslii Ar.S. Energy-efficient electric drive of multifunctional turnout. *Problemy Kolejnictwa*, 2014, no. 165, pp. 99-107. Available at: http://atena.ikolej.pl/images/PDF/165_8.pdf (Accessed 20.10.2020).

14. Buriakovskiy S., Maslii A., Pasko O., Denys I. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 69-79. doi: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.7>.

15. Li F., Jiang Y., Li T., Du Y. An improved dynamic model of preloaded ball screw drives considering torque transmission and its application to frequency analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 7, p. 168781401771058. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017710580>.

16. Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskiy B., Maslii A., Karpenko N., Pomazan D., Maslii A., Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1, no. 2 (91), pp. 68-75. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122422>.

17. 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>.

18. Buriakovskiy S.H., Maslii Ar.S., Maslii An.S. *Elektroprivid strilochnoho perevodu* [Electric switch point drive]. Patent UA, no. 95497, 2014. (Ukr).

Надійшла (Received) 20.01.2021
 Прийнята (Accepted) 22.02.2021
 Опублікована (Published) 05.04.2021

Буряковський Сергій Геннадійович¹, д.т.н., проф.,
 Маслій Артем Сергійович², к.т.н., доц.,
 Асмолова Лариса Валеріївна³, к.т.н.,
 Гончарук Наталія Трохимівна⁴, д.держ.упр., проф.,

¹ Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61013, Харків, вул. Шевченка, 47, e-mail: sergbytr@i.ua

² Український державний університет залізничного транспорту, 61050, Харків, майдан Фейєрбаха, 7, e-mail: a.masliy@ukr.net

³ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, e-mail: asmolova_larisa@ukr.net

⁴ Дніпропетровський регіональний інститут державного управління Національної академії державного управління при Президенті України, 49044, Дніпро, вул. Гоголя, 29, e-mail: goncharuknt@gmail.com

S.G. Buriakovskiy¹, A.S. Maslii², L.V. Asmolova³, N.T. Goncharuk⁴

¹ Research and Design Institute «Molnija»

of National Technical University

«Kharkiv Polytechnic Institute»,

47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² Ukrainian State University of Railway Transport,

7, Feieryakh Square, Kharkiv, 61050, Ukraine.

³ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

⁴ Dnipropetrovsk Regional Institute for Public Administration,

National Academy for Public Administration

under the President of Ukraine,

29, Gogol Str., Dnipro, 49044, Ukraine.

Mathematical modelling of transients in the electric drive of the turnout of the mono-sleeper type with switched-inductor motor.

Introduction. The study is devoted to the development of the functionality of a railway track switch by introducing a switched-inductor electric drive. This solution justifies simplifying the mechanical part of the switches by changing the gearbox to a ball-screw and locating the all kinematic line of the switches on the mono-sleeper type. **Goal.** A study of the mono-sleeper turnout type behaviour to meet modern traffic safety requirements and improve operational reliability factors. **Methodology.** Based on electric drive theory, a kinematic line of a mono-switch turnout type with nonlinear friction characteristic is presented. Using differential equation theory and Laplace transformation, a mathematical description of a four-phase switched-inductor motor with ball-screw in a mechanical line of a single-mass electromechanical system has been made. A simulation mathematical model of the electric drive of mono-sleeper turnout type as the control system with a switched-inductor motor and nonlinear friction characteristic was built in MATLAB. **Results.** Simulation modelling of a mathematical model of a mono-sleeper turnout type with a switched-inductor motor and ball-screw gear has been developed and implemented. Studies of dynamics of turnout point movement have shown that, in contrast to the motors used today, the switched-inductor motor makes it possible to simplify the mechanical part of the drive, which leads to reduced time spent on laying and maintenance of turnout points, and therefore makes the design more reliable. The application of PID controller and fuzzy speed controller has shown improved dynamics of turnout point, while the fuzzy PID controller provides better performance of the set values and turnout point movements. **Originality.** First developed a mathematical model of the electric drive of the mono-sleeper turnout type, taking into account nonlinear friction characteristic, as an object of speed control of turnout point movement, is developed. **Practical value.** The developed mathematical model of a railway track turnout of the mono-sleeper type with a switched-inductor motor and ball-screw gear enables more efficient use of a microprocessor control system, creation of promising electric motor protection means and control of a turnout point. References 18, table 2, figure 14.

Key words: switched-inductor electric drive, electromechanical system, control system, fuzzy speed controller.