

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

СМІРНОВ ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 621.382.2/3

**СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ЯК
БАГАТОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
доцент кафедри автоматизованих
систем електричного транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Науково-технічний центр магнетизму
технічних об'єктів Національної академії
наук України, завідувач відділу проблем
управління магнітним полем

кандидат технічних наук, доцент
Кутовий Юрій Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Захист відбудеться "18" листопада 2012 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "14" вересня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливими критеріями ефективності роботи транспорту є швидкість і пропускна здатність. На залізницях передових у технічному відношенні країн їх вдалося істотно підвищити, впровадивши високошвидкісний електричний транспорт та керуючі електротехнічні комплекси.

Основним виконавчим елементом систем залізничної автоматики, що забезпечує пропускну здатність, є стрілочний перевод. Поліпшення роботи станцій і підвищення безпеки руху в умовах швидкісного сполучення в ряді країн досягнуто завдяки використанню систем мікропроцесорного керування (МПЦ) диспетчеризації. Перспективним є частотне керування, що дозволяє значно розширити функціональні можливості стрілочного переводу. У сучасній промисловості широко застосовується практика використання регульованого приводу з частотним керуванням взамін існуючого нерегульованого, або регульованого з використанням систем Г-Д чи ТП-Д. Використання існуючого конструктиву дозволить знизити капітальні витрати на впровадження як систем МПЦ в цілому, так і у випадку встановлення окремих приводів в релейні схеми.

Таким чином, запропонований шлях модернізації стрілочних переводів, що експлуатуються на залізницях, є актуальним з точки зору необхідності створення сучасної елементної бази систем автоматики, що визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту Міністерства освіти, науки, молоді та спорту України з урахуванням концептуальних положень підпрограми 02.5: «Залізничний транспорт»; концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період до 2020 року (Наказ МТЗ №764 від 05.11.2001р.), а також згідно з держбюджетною НДР МОНмолодьспорту України «Нестационарні режими роботи перспективних систем стрілочного електропривода» (ДР № 0110U002484), де здобувач був відповідальним виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи - синтез системи керування електропривода стрілочного перевода як багатомасової електромеханічної системи для розширення функціональних можливостей залізничної автоматики на основі використання частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких основних завдань:

- аналіз і теоретичне узагальнення наукових робіт в області конструктивної бази стрілочних переводів з точки зору сучасних вимог функціональності, керованості і можливості експлуатації в умовах швидкісного руху;
- розробка математичної моделі роботи електропривода стрілочного перевода і дослідження за її допомогою основних режимів його роботи;
- оцінка впливу різних типів навантажень на стійкість роботи електромеханічної системи стрілочного перевода;
- розробка алгоритмів визначення параметрів перетворювача частоти, які забезпечують оптимальне керування по заданому критерію;

- поліпшення динаміки оптимізованого електроприводу стрілочного перевodu шляхом застосування нетрадиційних налаштувань регуляторів швидкості;
- застосування методів синтезу систем керування, інваріантних стосовно до різних типів навантаження;
- створення діючого зразка частотно-керованого електропривода стрілочного перевodu і експериментальна перевірка його роботи.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в електроприводі стрілочного перевodu при різних поєднаннях задаючих та збурюючих впливів.

Предмет дослідження – методи синтезу системи керування електропривода стрілочного перевodu як багатомасової електромеханічної системи шляхом застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування, на базі яких були побудовані математичні моделі робочого циклу нелінійних електромеханічних систем; на основі теорії електропривода враховані пружності з'єднувальних елементів кінематичних ланок і характеристики навантаження об'єкта. Метод інтегрального мінімуму теорії оптимального керування, метод найменших квадратів теорії ймовірності та метод поліноміальних рівнянь застосовано для синтезу систем керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблена математична модель роботи стрілочного перевodu з урахуванням пружних зв'язків і характеристики навантаження як об'єкта керування швидкістю переміщення стрілочних гостряків;
- отримали подальший розвиток теоретичні розробки щодо застосування методу оптимального керування, запропонованого в роботах Ю.М.Резнікова;
- досліджено вплив параметрів системи керування перетворювача частоти на динамічні характеристики стрілочного перевodu;
- обґрунтовано необхідність врахування впливу характеристики навантаження на роботу стрілочного перевodu;
- для синтезу оптимального керування розроблено алгоритм визначення параметрів системи керування перетворювача частоти для досягнення заданого показника якості роботи;
- для визначення однозначності коефіцієнтів при використанні поліноміальною методу в процесі синтезу регулятора швидкості розроблено чисельний алгоритм.

Практичне значення одержаних результатів. Для автоматизації Розроблено привід стрілочного перевodu з частотним керуванням, що забезпечує розширення функціональних можливостей залізничної автоматики. Створено дослідний зразок, що пройшов експлуатаційні випробування на станції Основа Південної залізниці (м. Харків).

Представлені в дисертації теоретичні розробки рекомендуються для практичного використання в науково-дослідних і проектних інститутах, які займаються проектуванням систем керування залізничної автоматики.

Теоретичні результати, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи, впроваджені в навчальний процес в Українській державній академії залізничного транспорту на Навчально-науковому інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них:

- здійснення системного аналізу існуючих конструктивних рішень щодо використання електричного приводу стрілочних переводів, що експлуатуються на вітчизняних залізницях;
- розробка математичної моделі робочих режимів стрілочного переводу марки СП-6м як електромеханічної системи з урахуванням конструктивних особливостей і характеристики навантаження;
- розробка алгоритму визначення параметрів перетворювачів частоти для досягнення заданого критерію якості керування;
- розробка алгоритму отримання аналітичних залежностей критеріїв оптимізації;
- синтез передавальної функції астатичного регулятора швидкості шляхом застосування поліноміальною методу, що дозволяє звести до мінімуму негативні наслідки нестационарних режимів роботи стрілочного переводу;
- розробка логічної схеми керування перетворювачем частоти в складі стрілочного переводу;
- створення діючого лабораторного стенду з перетворювачем частоти Micromaster 410.
- проведення фізичних експериментів на діючому обладнанні, обробка і узагальнення отриманих результатів дослідів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Миколаївка, 2008 р.; м. Алушта, 2010р.; м. Одеса, 2011р.); VII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2009р.); щорічних семінарах Національної академії наук України «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту» (м. Харків, 2010р.)

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковані у 11 наукових працях у фахових наукових виданнях України.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає 219 сторінок, з них 47 рисунків на 42 сторінках, 60 рисунків по тексту; 5 таблиць по тексту; 2 додатків на 8 сторінках, 107 найменувань використаних джерел на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи та відображений її зв'язок із науковими програмами, сформульована мета й основні задачі дослідження, наведені нові наукові результати, які виносяться на захист, вказана практична цінність отриманих результатів, а також рівень апробації результатів роботи, наведено кількість публікацій за темою роботи і особистий внесок здобувача.

В першому розділі проведено аналіз стану питання синтезу системи керування електромеханічної системи стрілочного переводу. Показано, що основою вітчизняних виконавчих елементів систем автоматики є розроблені в минулому сторіччі релейно-контакторні схеми керування двигунами постійного або змінного струму. У результаті критичного аналізу конструктивних рішень щодо використання електричного приводу на вітчизняних стрілочних переводах визначено, що застосований технологічний зазор в кінематичній схемі, необхідний для поліпшення умов прямого пуску асинхронного двигуна, призводить до значних ударів у кінематичному вузлі шибера-тяги, і прискорює рост зазорів в шплінтових з'єднаннях всіх подальших вузлів з'єднання кінематичних ланок. Фрікційна муфта, що застосовується для захисту двигуна від перевантажень, потребує сезонного переналагодження та постійної уваги обслуговуючого персоналу, адже регулює максимальне зусилля для здійснення переводу рейок.

Також існує значна номенклатура релейних схем керування стрілкою, що викликає певні ускладнення в експлуатації. Обслуговуючий персонал повинен знати особливості схемних рішень у випадку живлення двигуна постійним чи змінним струмом, одинарної чи спареної системи гостряків і т.н. В умовах впровадження швидкісного руху та мікропроцесорного керування станцією необхідно мати таку систему виконавчого механізму, що може бути легко інтегрована у нижній (або верхній рівень за умови невеликої кількості абонентів мережі) рівень автоматизації. Саме тому на перетворювач частоти, що має різні інтерфейси промислового зв'язку (Profibus, Ethernet, DRIVE-CLIQ та ін.) в пропонованій системі модернізації покладено функції буферного пристрою, що здатен пов'язати в одному пристрої експлуатуємий конструктив стрілочних переводів з одного боку та елементи мікропроцесорної централізації з іншого. Тим самим забезпечується уніфікація схемних рішень щодо системи керування стрілочним переводом.

Отже, визначено необхідність модернізації існуючих систем стрілочних приводів для впровадження швидкісного руху саме засобами електроприводу.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі роботи електромеханічної системи стрілочного переводу як основного інструменту при дослідженні режимів роботи об'єкта керування. В результаті аналізу електромеханічних процесів у системі була сформована розрахункова схема механічної частини, представлена на рис. 1.

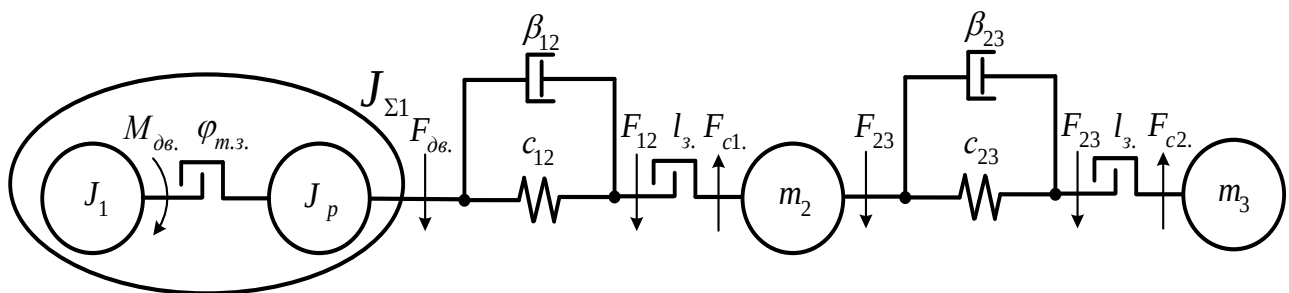


Рис. 1 Тримасова розрахункова схема механічної частини стрілочного переводу, де J_1 - момент інерції ротора двигуна; J_p - момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна; $M_{\partial\partial}$, $F_{\partial\partial}$ - електромагнітний момент та сила тяги двигуна відповідно; $\varphi_{m.з.}$, $l_з.$ - технологічний зазор та зазор в кріпленнях тяг відповідно; F_{12} , F_{23} - пружні сили в робочій та міжгостряковій

тягах відповідно; F_{c1} , F_{c2} - сили опору першого та другого гостряка відповідно; C_{12} , C_{23} - пружність робочої та міжгострякової тяг відповідно; β_{12} , β_{23} - коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя робочої та міжгострякової тяг відповідно; $J_{\Sigma 1}$ - сумарний момент інерції першої маси; m_2, m_3 - маси другої та третьої мас відповідно.

Запропонована модель враховує конструктивні особливості стрілочного електропривода, а саме технологічний зазор та зазори в місцях кріплення тяг між собою та шиббером.

Пропонується замінити існуючі на стрілках двигуни постійного струму на асинхронні з частотним керуванням. Для дослідження роботи такої системи використовується математична модель роботи стрілки з традиційним поданням векторної системи керування перетворювача частоти (рис.2).

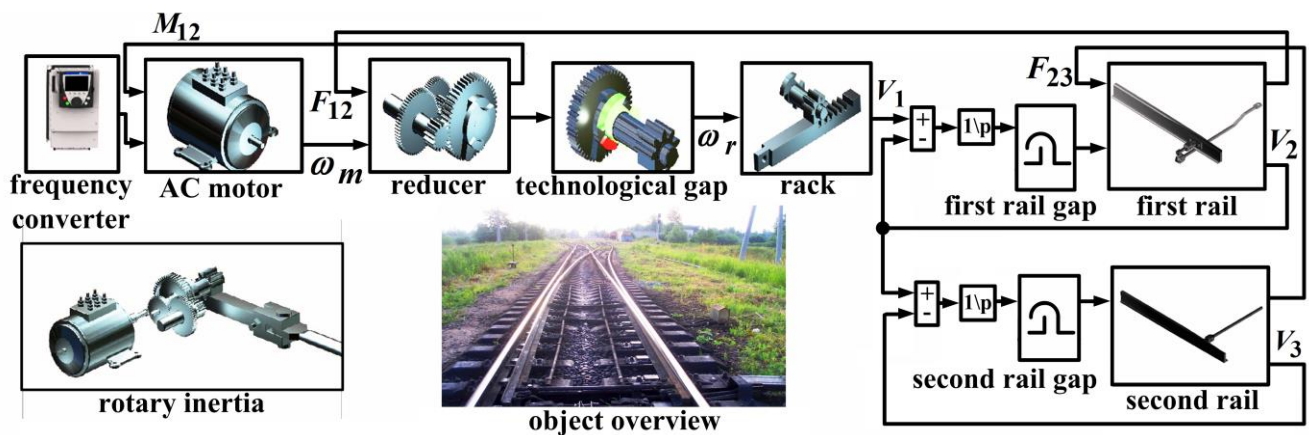


Рис. 2. Зовнішній вигляд тримасової моделі роботи стрілочного переводу з асинхронним двигуном в середовищі розробки Simulink.

Комп'ютерна модель роботи стрілочного переводу, що наведена на рис.2, базується на обчисленні рішень диференціальних рівнянь, складених згідно з розрахунковою схемою рис.1 за законами збереження енергії, законами Кірхгофа, Ампера, другого закону Ньютона та понятті узагальненого вектора.

На базі лабораторії автоматики Української державної академії залізничного транспорту проведені експерименти по використанню мікропроцесорного приводу з частотним керуванням. В ході експериментів в лабораторних умовах перевірено можливість використання ПЧ в складі стрілочного переводу та застосовано функціональні можливості цифрового перетворювача для покращення експлуатаційних параметрів стрілочного переводу (наприклад, зменшено час руху гостряків майже вдвічі). Також проведено перевірку адекватності математичного моделювання реальному об'єкту.

Порівняльні осцилограми з отриманими раніше результатами математичного моделювання приведені на рис. 3.

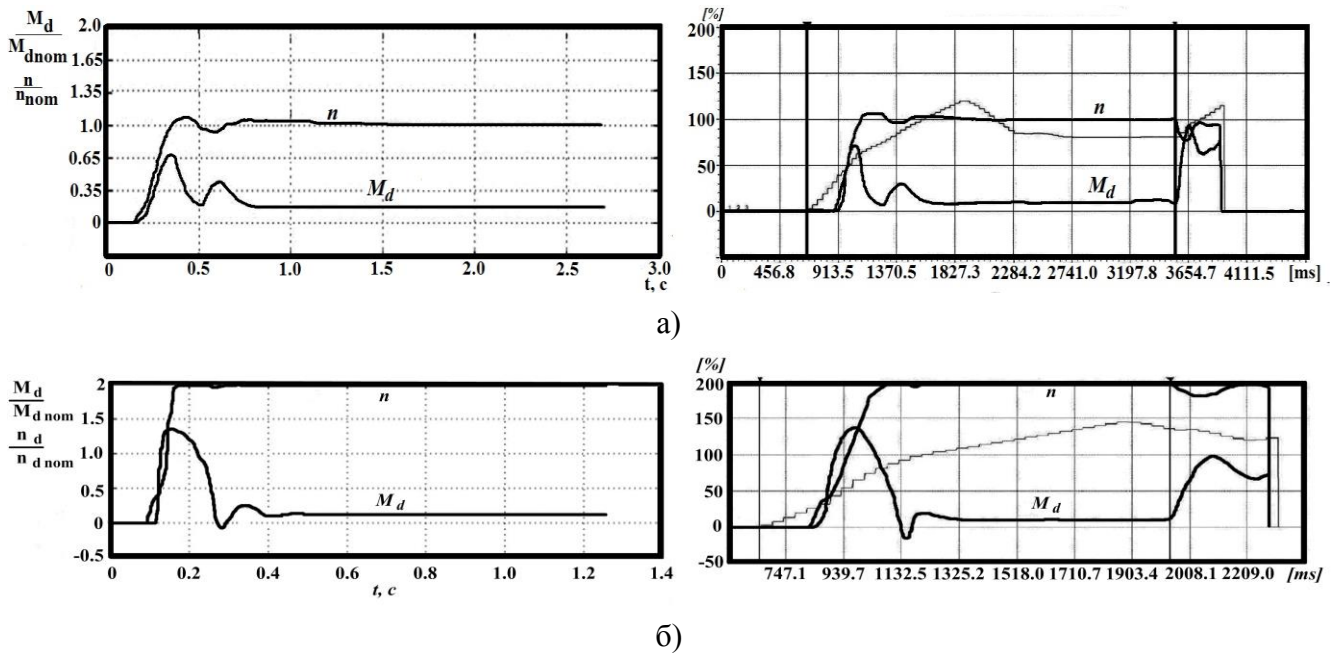


Рис. 3 Осцилограми швидкості та моменту двигуна на моделі та стенді при завданні частоти 60 Гц (а) та 110 Гц (б)

Похибка по основним координатам процесу перевода складає менше 5%.

В третьому розділі в результаті аналізу динамічних режимів роботи СП на моделях розроблено практичні рекомендації щодо застосування перетворювачів частоти для модернізації стрілочних переводів запропонованим шляхом використання частотного регулювання.

Встановлено вплив характеристики навантаження на динаміку роботи стрілочного переводу. Визначено параметри кривої тертя, при яких відбувається зародження і розвиток коливальних процесів з різними видами самозбудження.

Оптимальне керування стрілочним переводом виконувалося згідно з теоретичними розробками Резнікова Ю.М. щодо даного напрямку. Електричними параметрами синтезованої системи керування є форма кривої напруги завдання і його чисельне значення. (рис. 4).

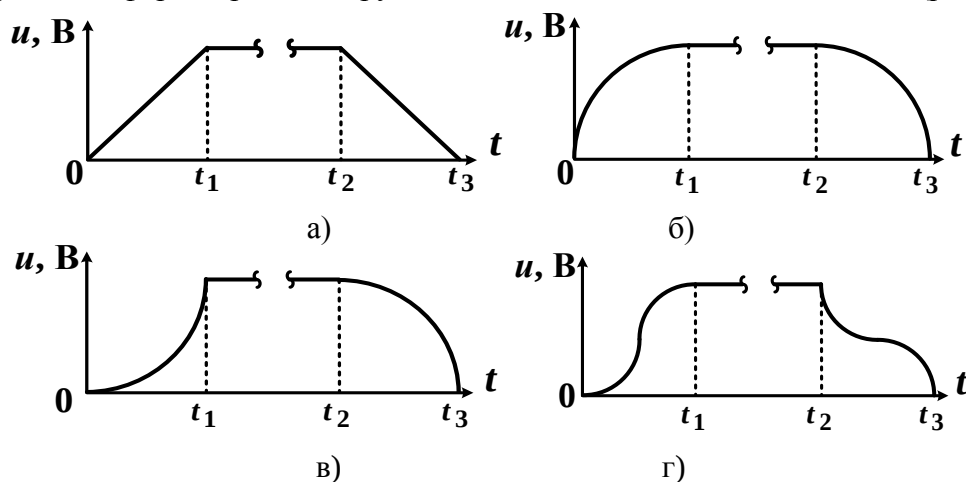


Рис. 4. Деякі види тахограм, що застосовані в дослідженнях. а) – трапецеїдальна; б) – експоненціальна; в) – параболічна; г) – S – образна

За допомогою моделі з векторною системою керування (рис. 2), можна оптимізувати роботу стрілочного переводу, виходячи з критеріїв якості переводу стрілки. Для такої оцінки визначено два параметри: час руху остяків та електричні втрати в двигуні. Однак час переводу безпосередньо залежить від процесів, що відбуваються на початку (розгін) і наприкінці (гальмування) руху рейок при управлінні стрілкою. Тому вводяться ще два критерії: величина пружної сили при вибірці технологічного зазору, що побічно характеризує удар спочатку і момент імпульсу рейок, непрямо відображає величину удару в кінці переводу. Таким чином, по відношенню до існуючих приводів вводиться 4 фізичних параметра для оцінки керування стрілкою: мінімальний повний час переводу гостряків (t_s), максимум пружної сили, що виникає при вибірці технологічного зазору (F_{12}), мінімум моменту імпульсу гостряків при зіткненні з рамною рейкою (M_i), мінімум електричних втрат (P_i) в двигуні стрілочного приводу, як основний вид втрат у системі

$$ts = \int_0^{t_3} v_3(t) dt, \quad (4)$$

$$F_{12} = F_d - m \frac{dV_1}{dt}, \quad (5)$$

$$M_i = (m_1 + m_2 + m_{12}) \cdot v_2, \quad (6)$$

$$P_i = \int_0^{ts} (I_S^2 \cdot R_S + I_R^2 \cdot R_R) dt. \quad (7)$$

Далі в роботі для зручності обчислень змінна t_1 (рис.4), що характеризує темп розгона, позначена, як t . Змінна t_2 , що характеризує темп гальмування, за своїм фізичним сенсом може бути як деяким часом, по закінченню якого здійснюється гальмування, так і деякою відстанню, по проходженні якої здійсниться гальмування. В другому випадку полегшується практична реалізація тахограми, оскільки сигнал пройденого шляху легко отримати з датчика положення, або інтегруючи швидкість руху. Тому далі змінна t_2 позначена як l і має фізичний сенс відстані, пройденої гостряками з моменту начала переводу, від якого починається гальмування. Величина напруги завдання перетворювача частоти позначена як U_z .

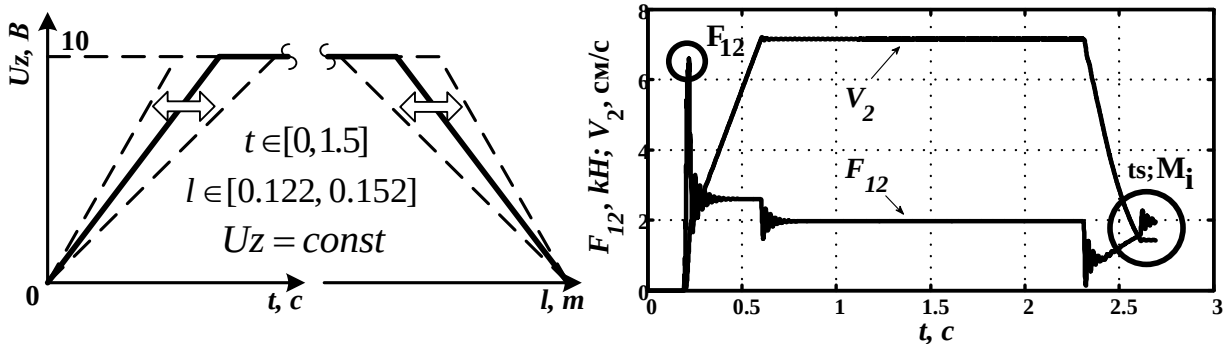


Рис. 5. Аналіз динамічних процесів за критеріями оптимізації при зміні керуючого сигналу перетворювача

Зі значень керуючих сигналів на перетворювач та відповідних їм значень критеріїв оптимізації, отриманих в результаті досліджень по оптимальному керуванню, формувались масиви даних. Такі масиви оброблялись за допомогою побудови тривимірних поверхонь (рис.6), що потім аналізувались візуально. Слід зазначити, що не завжди параметр керуючого сигналу має вплив на критерій оптимізації. Так, наприклад, момент початку гальмування не впливає на пружну силу, що виникає при вибірці зазорів на початку переводу. При такому випадку замість поверхні (рис 6а) отримується стрічка (рис. 6б).

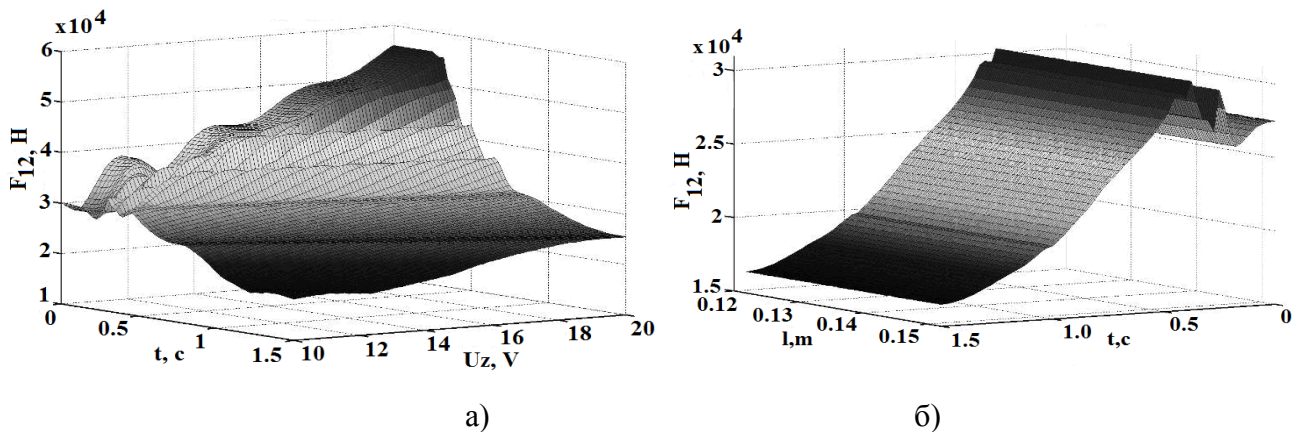


Рис. 6. Поверхні розподілення критеріїв оптимізації в залежності від параметрів керуючого сигналу на перетворювач; а) – $U_z, t = \text{var}, l = \text{const}$; б) – $t, l = \text{var}, U_z = \text{const}$

За допомогою аналізу даних, отриманих в ході дослідження у вигляді рис.6 визначено значення керуючих сигналів перетворювача, при яких досягаються певні покращені значення критеріїв оптимізації у порівнянні з прямим пуском. Таким способом сформовано практичні рекомендації щодо використання перетворювачем частоти для перспективних систем стрілочних переводів у вигляді таблиць (табл. 1).

Таблиця 1

Практичні рекомендації щодо використання перетворювачей частоти

	Параметр тахограми			Значення критерія оптимізації			
	t, c	l, m	U_z, B	F_{12}, H	$M_i, \text{кгм/с}$	P_i, Bm	ts, c
Оптимізовані значення	0.75	0.137	14	24800	73	175	1.5
Значення при прямому пуску	0	0.152	-	27500	515	397	1.5
Ефект, %				9,81	85,8	55,91	0

Існує проблема роботи стрілочного переводу в умовах забруднення переводних поверхонь в результаті попадання частинок перевезених вантажів (вугільний пил, рудний пил, мазут, т.д.) або впливу погодних факторів (впале сухе листя, дощ, сніг). При збігу певних випадкових обставин характеристика навантаження (сили тертя) має нелінійний характер.

Якщо для більшості промислових механізмів режим проковзування є аварійним (приводу прокатних станів, тягового рухомого складу і т.д.), то для стрілочного переводу це процес нормальної роботи, тому що гостряк в результаті обертання вала приводного двигуна ковзає по переводній поверхні. Швидкістю ковзання в даному випадку можна вважати лінійну швидкість відповідної маси.

Необхідні дослідження процесу пересування стрілочних гостряків при подібних умовах, тобто в нестационарних режимах роботи проведено за допомогою математичної моделі, структурна схема якої приведена на рис. 7

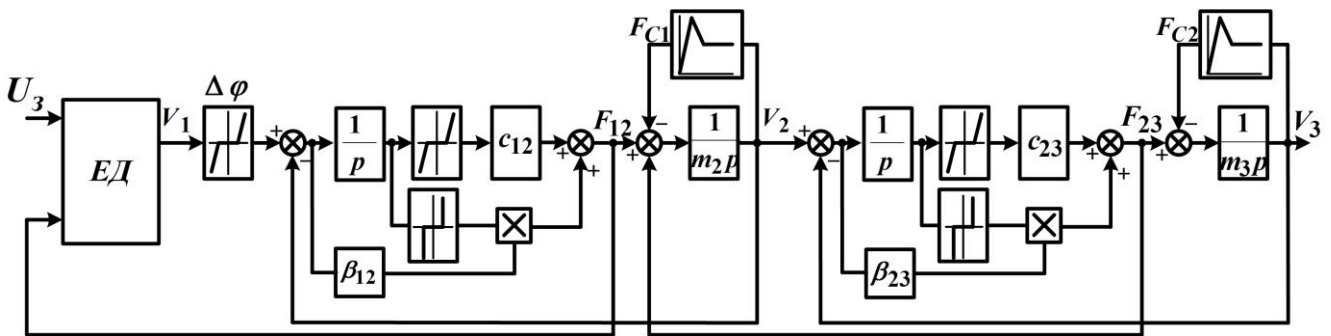
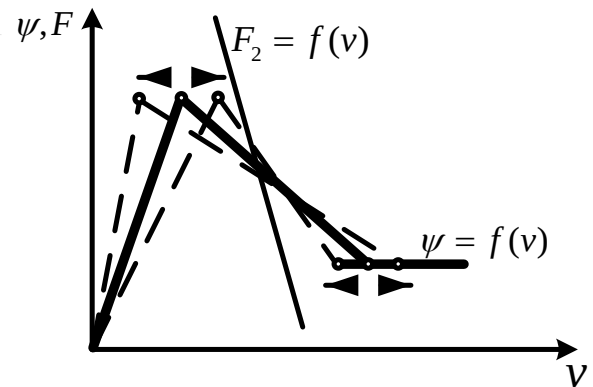


Рис. 7. Структурна схема тримасової моделі механічної частини ЕП стрілочного переводу з урахуванням характеристики навантаження. $\Delta\varphi$ - технологічний зазор; F_{12} , F_{23} - пружні сили в робочій та міжгостряковій тягах відповідно; F_{c1} , F_{c2} - сили опору першого та другого гостряка відповідно; c_{12} , c_{23} - пружність робочої та міжгострякової тяг відповідно; β_{12} , β_{23} - коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя робочої та міжгострякової тяг відповідно; m_2 , m_3 - маси другої та третьої мас відповідно; V_1 , V_2 , V_3 - лінійні швидкості першої, другої та третьої мас відповідно.

При дослідженнях на математичній моделі за структурною схемою рис. 7 виявлено, що при деяких параметрах характеристики навантаження (рис. 8) в кінематичній лінії стрілочного переводу можуть виникати фрикційні коливання швидкості і пружної сили в тягах. На рис. 9 видно автоколивальний процес пружної сили в тягах F_{12} .



а)



б)

Рис. 8. Характеристика навантаження. а) – теоретичний вигляд за Полухінім П.І.; б) – засоби зміни характеристики навантаження, застосовані в роботі

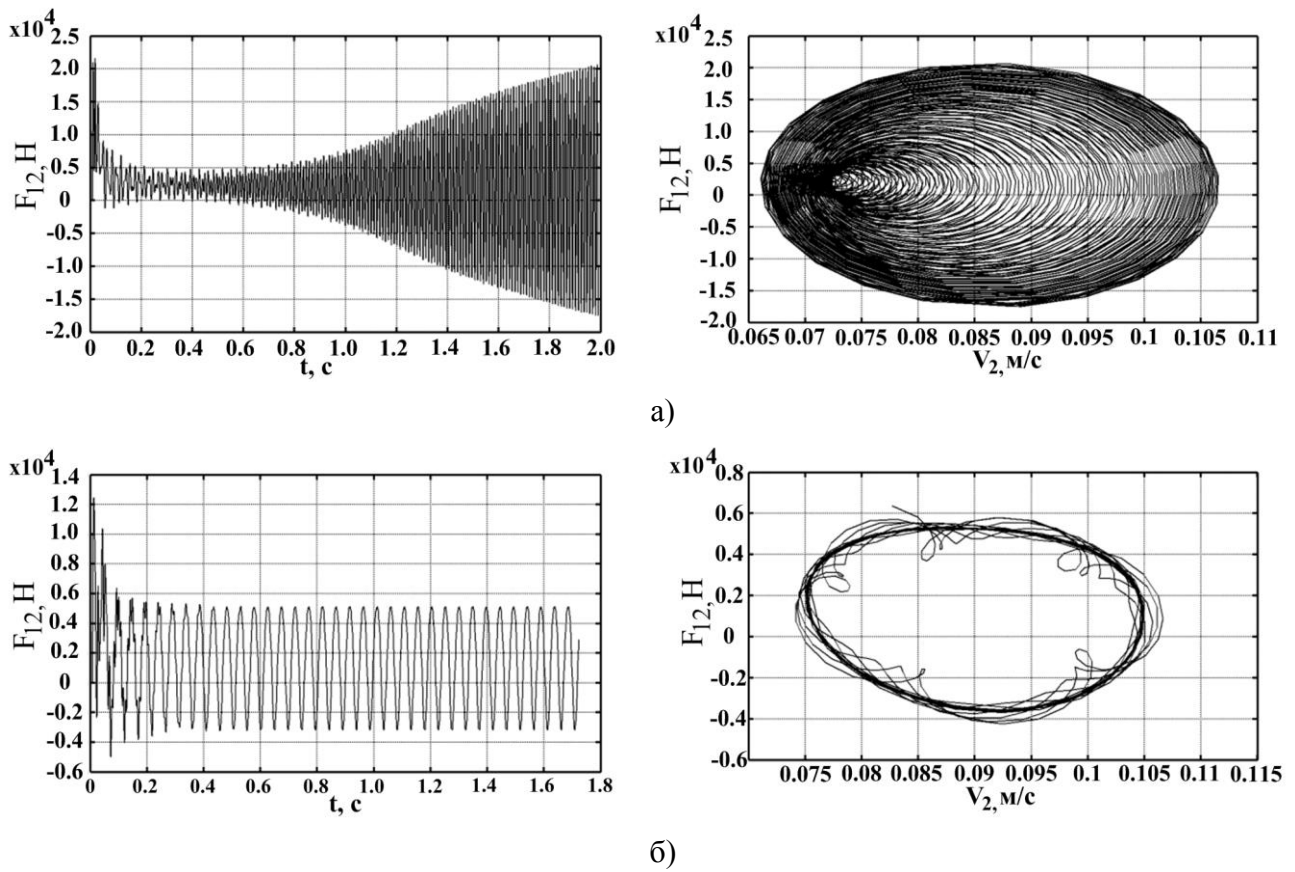


Рис.9. Автоколивальні процеси в кінематичній ланці стрілочного перевода з двигуном постійного (а) та змінного струму (б) на основі математичного моделювання

Для визначення умов для виникнення і розвитку автоколивальних режимів роботи СП, було проведено дослідження, в ході якого змінювалися параметри характеристики навантаження (рис.8). Для визначення коливань пружної сили запропоновано використовувати амплітудний і частотний критерії:

$$\delta_f = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 0, & \text{sign}(\frac{dF_i}{dt}) + \text{sign}(\frac{dF_{i-1}}{dt}) \neq 0, \\ 1, & \text{sign}(\frac{dF_i}{dt}) + \text{sign}(\frac{dF_{i-1}}{dt}) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\delta_A = \sum_{i=1}^n \frac{|F_i| - F_{norm}}{F_{norm}}, \quad (9)$$

де n - крок розрахунку моделі; F_i - значення пружної сили в i -тій точці, Н; F_{norm} - значення заданої сили опору руху, Н.

Дослідження показали, що існує певна теоретична зона параметрів характеристики навантаження, при яких можливий розвиток автоколивальних процесів в кінематичній ланці стрілочного переводу, як з м'яким, так і з жорстким самозбудженням. Істотний вплив має абсциса початкової точки ділянки з негативним в'язким тертям.

Визначено, що найбільш небезпечні кути нахилу падаючої ділянки характеристики навантаження за умови використання ДПТ - $10-20^0$, при використанні асинхронного двигуна - до $40-50^0$. Частота коливань лежить в межах $30 \dots 80\text{Гц}$ і залежить від кута нахилу падаючої ділянки кривої тертя.

У четвертому розділі застосовано існуючий теоретичний апарат регресійного аналізу для алгоритму отримання формули критерію оптимізації в залежності від керуючих впливів на перетворювач та синтез регулятора швидкості методом поліноміальних рівнянь, здатного звести до мінімуму негативні наслідки автоколивальних режимів в кінематичної лінії стрілочного переводу.

В результаті проведення ряду двофакторних експериментів на математичній моделі отримані масиви статистичних даних. В якості факторів (аргументів) досліджу виступали фізичні величини часу розгону, моменту початку гальмування і напруги завдання перетворювача частоти - t, l, uz . У результаті проведення n дослідів ці змінні брали значення $t_1, t_2, \dots, t_n, l_1, l_2, \dots, l_n, uz_1, uz_2, \dots, uz_n$. Залежний від них результат - критерій оптимізації - має фізичний зміст пружної сили в тягах F_{12} (тут і далі як приклад буде використовуватися ця величина), моменту імпульсу стрілки M_i , часу переводу ts і електричних втрат в двигуні P_i . Її конкретні значення при значеннях, наприклад, uz , рівних $uz_1, uz_2, \dots, uz_n$ і t , рівних $t_1, t_2, \dots, t_n$ будуть відповідно $f_{12_1}, f_{12_2}, \dots, f_{12_n}$. З точки зору теорії ймовірностей вони є реалізаціями випадкової величини F_{12} , що залежить від детермінованих аргументів uz і t

$$F_{12} = f_{12}(uz, t, B_1, B_2, \dots, B_m). \quad (10)$$

Визначено статистичні характеристики величин $B_1, B_2, \dots, B_m$, що забезпечують появу значень f_{12_i} , при заданих uz_i і t_i

В якості базисної функції прийнято степеневий поліном типу $y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4x^2 + \dots + b_mx^n + b_{m+1}y^n$; де $1 \leq m \leq 7$. Хід дослідження передбачає отримання виразів 1 ... 7 ступеня, що описують поведінку об'єкта, для проведення порівняльного аналізу якості апроксимації в різних випадках.

В результаті по отриманих формулах визначених критеріїв, як, наприклад

$$\begin{aligned} F_{12_7}(Uz, t) = & 372.3 \cdot t^2 + 12056.4 \cdot Uz^2 \cdot t + 208.8 \cdot Uz \cdot t^2 - 1830.6 \cdot Uz^2 \cdot t^2 - \\ & - 12.3 \cdot t^3 + 112.3 \cdot Uz^3 \cdot t^3 - 2401.1 \cdot Uz^4 \cdot t^2 + 55.2 \cdot Uz^4 \cdot t^3 - \\ & - 2.3 \cdot Uz^4 \cdot t^4 + 4794.6 \cdot Uz^5 \cdot t^2 - 238.4 \cdot Uz^5 \cdot t^3 + 3.58 \cdot Uz^5 \cdot t^4 - \\ & - 22351 \cdot Uz^6 \cdot t + 130.5 \cdot Uz^6 \cdot t^2 + 18.2 \cdot Uz^6 \cdot t^3 - 51075.18 \cdot Uz^7 \end{aligned} \quad (11)$$

за допомогою запропонованого алгоритму січної площини (12) формуються діапазони значень керуючих впливів, що дозволяють досягти заданого значення певного критерію оптимізації, чи одразу оптимізації по декількох критеріях. Такий діапазон позначений темним відтінком на рис. 10.

$$F_{12}(Uz, t)_{cr} = (\max(F_{12}(Uz, t) - \min(F_{12}(Uz, t))) \cdot \frac{cr}{100\%} + \min(F_{12}(Uz, t))) \quad (12)$$

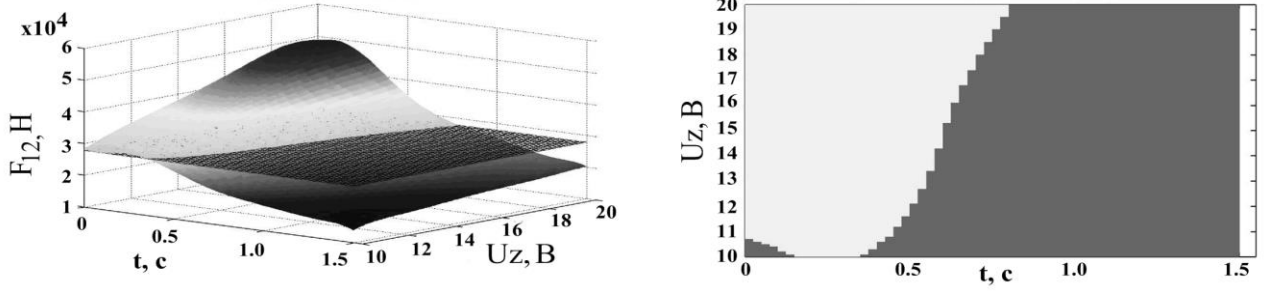


Рис. 10 Графічний сенс алгоритму січної площини.

З огляду визначеної раніше можливості розвитку автоколивальних процесів виконано дослідження, спрямовані на поліпшення динаміки за рахунок синтезу поліноміальним методом та реалізації передавальної функції астатичного регулятора швидкості (РШ) для електромеханічної системи СП, основу якого становить система перетворювач частоти – асинхронний двигун з істотною нелінійністю механічної характеристики навантаження. Важливо відзначити, що механічна характеристика навантаження електроприводу, що має залежні від швидкості провали моменту, призводить систему до вихідної статичної та динамічної нестійкості.

Передавальна функція об'єкта керування

$$W_{об}(p) = \frac{U_K(p)}{U_{PC}(p)} = \frac{\frac{3/2 \cdot Z_p \cdot K_r \cdot \Psi_r \cdot K_{ДС}}{K_{ДТ} \cdot |\beta_C|} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} p + 1 \right)}{(2T_\mu p + 1) \left(\frac{T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_c p - 1 \right)}, \quad (13)$$

де K_T - коефіцієнт датчика струму, K_r - коефіцієнт зв'язку ротора, $K_{ДС}$ - коефіцієнт датчика швидкості, Ψ_r - потокозчеплення ротора, Вб, $K_{РТ}$ - коефіцієнт підсилення контура струму; $T_{РТ}$ - стала часу контура струму; $K_{ПЧ}$ - коефіцієнт підсилення перетворювача частоти; T_μ - мала стала часу контура струму, с, $J_\Sigma = J_1 + J_2$ - сумарний приведений до валу двигуна момент інерції привода, кгм², Z_p - кількість пар полюсів двигуна; $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ - параметр, що характеризує відношення мас; $\Omega_{12}^2 = C_{12} \gamma / J_2$ - резонансна частота пружних коливань, с⁻¹; $T_c = (J_1 + J_2) / |\beta_c|$ - механічна стала часу, с; $|\beta_c|$ - коефіцієнт в'язкого тертя механічної характеристики навантаження на падаючому відрізьку, Нмс.

На підставі методу поліноміальних рівнянь передавальна функція РШ синтезується у вигляді

$$W_{пу}(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)M(p)}{K_0 P_{\kappa+}(p)N(p)p^{\nu-s}}, \quad (14)$$

де $v=2$ прийнятий порядок астатизму замкнутої системи регулювання швидкості; $M(p)$, $N(p)$ - невідомі поліноми:

$$\begin{aligned} M(p) &= m_i p^i + m_{i-1} p^{i-1} + \dots + m_0, \\ N(p) &= n_j p^j + n_{j-1} p^{j-1} + \dots + n_0. \end{aligned} \quad (15)$$

При нелінійності механічної характеристики навантаження виникає задача визначення однозначності коефіцієнтів полінома $M(p)$, яка розв'язана за допомогою запропонованого в роботі чисельного алгоритму визначення значень середньгеометричного кореня, що забезпечує при його максимумі однозначність коефіцієнтів поліномів $M(p)$ і $N(p)$.

$$\begin{cases} \omega_0 = \omega_{0i}, & n_{0i} > 0 \wedge m_{21i} > 0 \wedge m_{22i} > 0 \wedge \omega_{0i} \neq \omega_{0end}; \\ \omega_0 = 0, & n_{0i} > 0 \vee m_{21i} > 0 \vee m_{22i} > 0 \vee \omega_{0i} = \omega_{0end}, \end{cases} \quad (16)$$

де ω_{0end} - останнє значення з масиву $\omega_{0i}, i \in [1:1000]$.

Елемент масиву ω_0 , при якому можливе перетинання $m_{21} = f(\omega_0)$ і $m_{22} = f(\omega_0)$, визначається з умови його рівності мінімального значення середньквадратичного відхилення

$$\omega_{0i} = \min \left((m_{22i} - m_{21i})^2 \right). \quad (17)$$

Отже, згідно (14) отримано передавальну функцію астатичного регулятора швидкості

$$W_{PC}(p) = \frac{(2 \cdot T_\mu p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{T_H p (T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)}, \quad (18)$$

де сталі часу $T_H = \frac{n_0 K_O}{m_0}$; $T_1 = \frac{m_1}{m_0}$; $T_2^2 = \frac{m_2}{m_0}$; $T_3^2 = \frac{n_2}{n_0}$; $T_4 = \frac{n_1}{n_0}$.

Регулятор з такою передавальною функцією спроможний компенсувати статичну та динамічну нестійкість даного об'єкта керування (рис.11).

Існуючий технологічний зазор в редукторі, що використовувався для поліпшення процесу пуску двигуна на початку переводу, за умов використання частотного приводу пропонується виключити з кінематичної схеми привода стрілочного переводу. На осцилограмах (рис. 11в, г) видно покращення динаміки та зменшення максимуму пружної сили (удару) в початковий момент переводу.

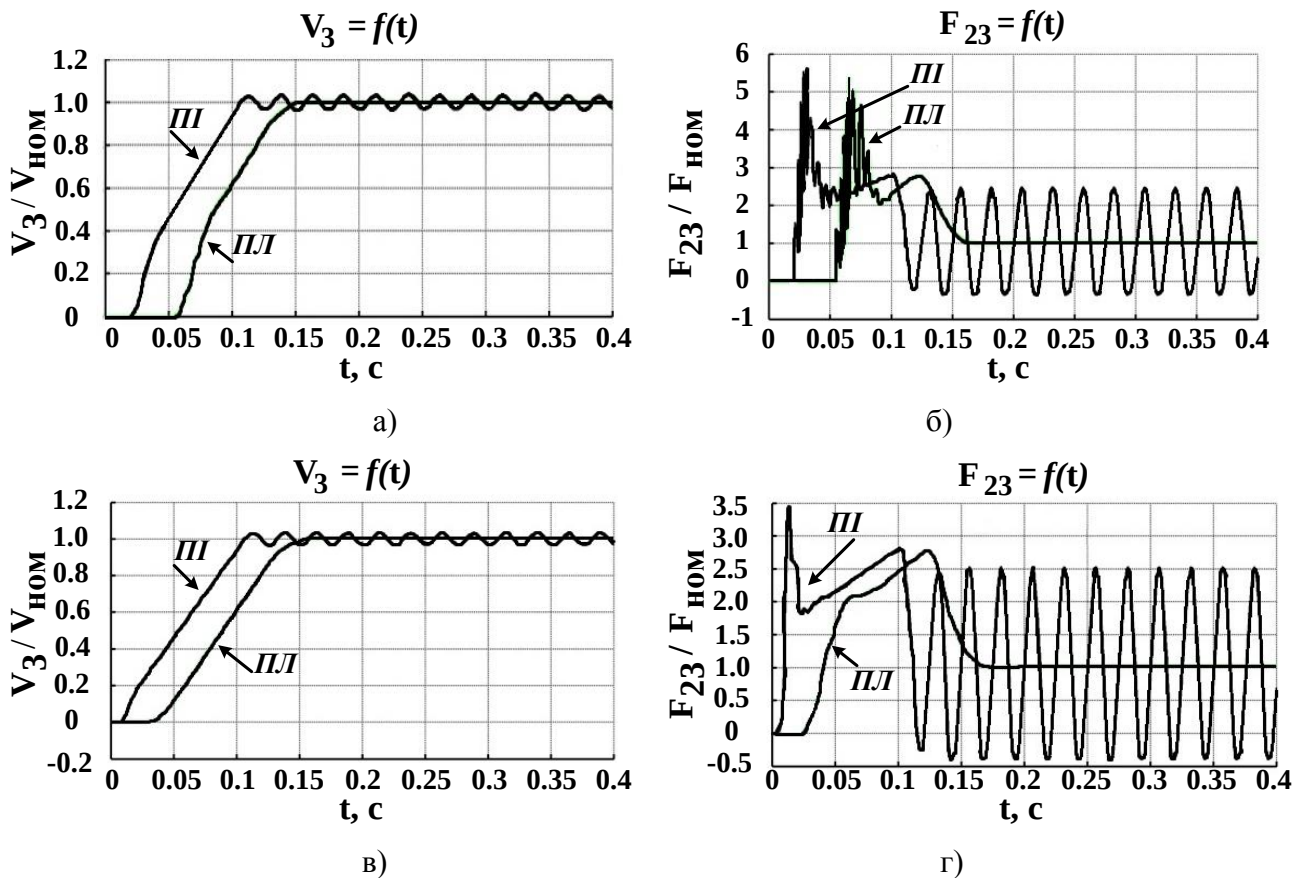


Рис. 11. Порівняння перехідних процесів з ПІ- та ПЛ-регулятором в тримасовій системі.

В п'ятому розділі розглянуті питання практичної реалізації результатів дослідження.

Експерименти проводилися в лабораторії систем автоматики факультету «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» і лабораторії електроприводу кафедри АСЕТ механічного факультету Української державної академії залізничного транспорту, а також на стрілочному переводі № 530 станції Основа Південної залізниці. Дослідження були спрямовані на вивчення можливості та особливостей застосування перетворювачів частоти в системах СЦБ, а також перевірку розроблених алгоритмів керування.

Основну увагу в практичній роботі було приділено рішенням, направленим на якомога меншу кількість змін у стрілочних приводах, що знаходяться в експлуатації при модернізації шляхом впровадження перетворювача частоти.

Розроблено логічну схему керування ПЧ для стрілочного переводу; схему електричну принципову релейного модуля стикування з існуючою системою та схему безпосередньо частотного приводу. Розроблено плату перетворювача, що наряду з прибором промислового виробництва застосовувався в дослідженнях.

В результаті експерименту, проведеного на діючому стрілочному переводі №530 станції Основа Південної залізниці визначено доцільність використання перетворювача частоти в складі стрілочного переводу, отримано зменшений час переводу до 1.5 с проти 3...5 с за інструкцією, за рахунок керованого процесу руху гостряків покращено експлуатаційні показники, зокрема, щодо ремонту та перевірки двигунів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи закладені науково-практичні засади модернізації стрілочного переводу шляхом застосування асинхронного частотно-регульованого електроприводу. Конструктивною перевагою запропонованої системи є застосування всіх вузлів і деталей, у тому числі і електричного двигуна, з існуючих штатних систем.

1. Проведено теоретичне узагальнення наукових робіт та практичних розробок щодо напрямків розвитку та сучасного технічного рівня стрілочних електроприводів. Результати вказали на недостатню функціональність експлуатованих вітчизняних стрілочних переводів в умовах швидкісного руху.

2. Розроблено математичну модель роботи електромеханічної системи стрілочного переводу з урахуванням конструктивних особливостей. Модель дозволяє аналізувати динамічні режими роботи СП як при штатних, так і при нестационарних режимах роботи.

3. Прискорене зростання зазорів в місцях з'єднання стрілочних тяг можна пояснити явищем фрикційних коливань пружної сили.

4. За допомогою математичних моделей і запропонованого алгоритму знаходження оптимальних параметрів дані практичні рекомендації до використання ПЧ. За сукупністю критеріїв оптимізації параметри ПЧ рекомендується вибирати наступні: час розгону - 0,8 сек, відстань до початку гальмування - 0,138 м., напруга завдання - 13,5 В. Застосування рекомендованих значень уставок ПЧ дозволяє скоротити час переводу при зменшенні ударів в кінематичній лінії.

5. Введено поняття критеріїв оптимізації, що представляють собою основні технологічні параметри стрілочного переводу. Означені фізичні величини дозволяють наочно оцінити ефективність керування рухом гостряків.

6. Отримана передавальна функція астатичного регулятора швидкості першого і другого порядків, що дозволяє шляхом її застосування в регуляторі поліпшити динаміку стрілочного переводу як в штатних, так і нестационарних режимах роботи. Обґрунтовано рекомендації щодо зміни конструкції модернізованого СП, а саме виключення технологічного зазору 46^0 в редукторі. Така зміна дозволить значно знизити силу удару на початку переводу і зменшити навантаження на шплінтові з'єднання кінематичної лінії.

7. За підсумками проведених досліджень розроблено дослідний зразок, в якому реалізовані запропоновані логічні алгоритми керування СП. Польові випробування показали можливість зменшення часу переведення до 1.5 с замість 3 ... 5 с, визначених технічними інструкціями для даного типу переводу.

8. Теоретичні результати досліджень впроваджені в навчальний процес в Українській державній академії залізничного транспорту на Навчально-науковому інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Смирнов В.В. Исследование динамических свойств электропривода стрелочного перевода с частотным управлением / С.Г. Буряковский, А.А. Рафальский,

В.В. Смирнов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. - 2007. – Ч.2, вип. 4. (45). - С.10-12

Здобувач розробив структурну схему модернізованого стрілочного переводу, за допомогою неї проаналізував динамічні процеси руху гостряків. Ним також проведено порівняння результатів моделювання з лабораторними дослідженнями.

2. Смирнов В.В. Модернизация стрелочных переводов постоянного тока путем применения частотно-управляемого привода / С.Г. Буряковский, В.И. Моисеенко, А.А. Рафальский, В.В. Смирнов //: Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2007. – Тематичний вип. - С. 338 – 339

Здобувачу належить підготовка та аналіз технічних даних щодо використання частотних перетворювачей в системах залізничної автоматики.

3. Смирнов В.В. Результаты эксплуатационных испытаний системы управления электроприводом стрілочного перевода / С.Г. Буряковский, В.И. Мойсеенко, В.В. Гаєвський, В.В. Смирнов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 324-325

Здобувачу належить розробка релейного модуля стиковки схеми керування стрілочного переводу та перетворювача частоти, частково проведення монтажних робіт. Здобувач розробив логічну схему керування стрілочним переводом за допомогою частотного перетворювача.

4. Смирнов В.В. Математическая модель электропривода стрелочного перевода с учетом характеристики трения / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 329-330

Здобувач розробив математичну модель стрілочного електропривода, за допомогою якої можна дослідити динамічні процеси в механічній частині стрілочного електропривода в нестационарних режимах його роботи.

5. Смирнов В.В. Дослідження роботи стрілочного електропривода з урахуванням характеристики навантаження / С.Г. Буряковский, І.В.Обруч, В.В. Смирнов // Електроінформ. – Львів: ТОВ «Екоінформ». – 2009. - №2. – С.10

Здобувачем запропоновано алгоритм виявлення автоколивальних процесів за допомогою запропонованого частотного критерія.

6. Смирнов В.В. Исследование на математической модели электромеханической системы стрелочного перевода с учетом конструктивных особенностей / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. - 2009. – Ч.1, вип. 4 (57). - С.183-186

Здобувачу належить розробка математичної моделі, що враховує наявність технологічного зазору в редукторі та зазорів в елементах з'єднання тяг.

7. Смирнов В.В. Перспективные системы управления железнодорожной автоматики / С.Г. Буряковский, В.И. Моисеенко, В.В. Смирнов // Электроинформ. – Львів: ТОВ «Екоінформ». – 2009. – Тематичний вип. – С. 205-206

Здобувачем проведено аналіз сучасних систем керування стрілочними переводами та запропоновано новий підхід щодо підвищення функціональності систем керування СП.

8. Смирнов В.В. Регулируемый стрелочный электропривод / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Міжнародний інформацій науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: корпорація «Техностандарт». – 2010. – №7. – С.8-9

Здобувачу належить обґрунтування необхідності використання асинхронного частотно-регульованого електроприводу стрілочного перевода.

9. Смирнов В.В. Системы скалярного и нейросетевого управления электроприводом стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, И.В. Обруч, В.В. Смирнов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вып. 28. – С. 574-576

Здобувачу належить розробка математичної моделі скалярної системи керування стрілочним електроприводом та порівняння її роботи з системою з нейроконтролером. Здобувачем запропоновано нові критерії оптимізації роботи стрілочного перевода.

10. Смирнов В.В. Применение метода наименьших квадратов в исследованиях по оптимизации процесса работы стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. -2011. – № 03 (79). – С.159-160

Здобувачем запропоновано апроксимувати статистичні дані з математичних моделей за допомогою базисних функцій у вигляді полінома 1-7 степені. Ним проведено поліфакторний експеримент на моделі та отримані аналітичні залежності критеріїв оптимізації роботи стрілочного перевода.

11. Смирнов В.В. Улучшение динамики железнодорожного стрелочного перевода с частотно-регулируемым электроприводом при нестационарных режимах работы / Л.В. Акимов, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, В.В. Смирнов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2012. – № 05(81). – С.22-30

Здобувачу належить розробка чисельного алгоритму визначення однозначності коефіцієнтів при нелінійному моменті опору при синтезі регулятора швидкості методом поліноміальних рівнянь. Здобувач також порівняв роботу традиційної системи з ПІ-регулятором швидкості та розробленої разом зі співавторами системи з ПЛ-регулятором.

АНОТАЦІЇ

Смірнов В.В. Синтез системи керування регульованого електропривода стрілочного перевода як багатомасової електромеханічної системи. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – НТУ «ХПІ», Харків, 2012р.

Дисертація присвячена розширенню функціональності залізничного стрілочного переводу шляхом впровадження асинхронного частотно-керованого електропривода. Розроблено математичну модель стрілочного переводу з урахуванням конструктивних особливостей, а також характеристики навантаження. Запропоновано технологічні критерії оптимізації процесу руху гостряків, розроблено алгоритм по визначенню практичних рекомендацій щодо оптимального використання перетворювача частоти у складі стрілочного переводу згідно цих критеріїв за допомогою метода найменших квадратів. Дана спроба пояснити швидкий зріст зазорів в деяких стрілках та специфічні хвилеобразні деформації переводних поверхонь наявністю автоколивальних процесів в кінематичній лінії, що підтвердилася на математичній моделі. Поліпшено динаміку руху гостряків шляхом синтезу та застосування передавальної функції астатичного регулятора швидкості методом поліноміальних рівнянь як в системах з сталим моментом опору, так і при функції його від швидкості руху.

Ключові слова: електромеханічна система, система керування, асинхронний частотно-керований електропривід, автоколивальні процеси, астатичний регулятор швидкості.

Смирнов В.В. Синтез системы управления регулируемого электропривода стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. Диссертация посвящена расширению функциональности железнодорожного стрелочного перевода путем внедрения асинхронного частотно-управляемого электропривода. Данное техническое решение позволяет интегрировать существующие системы железнодорожной автоматики в комплекс микропроцессорного управления станцией с минимумом переделок и позволяет унифицировать широкую номенклатуру эксплуатируемых в настоящее время релейных систем управления приводов как постоянного, так и переменного тока.

Стрелочный перевод является основным исполнительным элементом систем железнодорожной автоматики. Базовые конструктивные и технические решения эксплуатируемых в настоящее время основных железнодорожных электроприводов СП6 и СП-6м были разработаны в 70-80 гг. прошлого века на основании имеющейся тогда элементной базы. Сейчас, в виду развития полупроводниковой и микропроцессорной цифровой техники, назрела необходимость создания современного стрелочного перевода. Однако, для замены эксплуатируемых переводов на новые, необходимы значительные капитальные затраты; поэтому предлагается использовать существующее оборудование – кабельные трассы, двигатель, редуктор, а взамен устаревших узлов (например, фрикционная муфта) установить преобразователь частоты. Такая модернизация позволит получить при минимуме затрат получить полноценную функциональность цифровой аппаратуры. Это определило направление диссертационного исследования.

Стрелочный перевод рассмотрен как двух- и трехмассовая электромеханическая система с последовательным либо параллельным соединением масс. Разработана математическая модель стрелочного перевода с учетом конструктивных особенностей – технологического зазора и зазоров в местах соединения тяг, а также характеристики нагрузки. Проведена стендовая проверка адекватности моделирования работы стрелочного перевода реальному объекту. Сравнение проводилось с использованием преобразователя частоты Simovert фирмы Siemens, погрешность по основным координатам составила менее 5%.

Предложены технологические критерии оптимизации процесса движения острых. Проанализировано применение возможностей преобразовательной техники для нужд процесса перевода стрелки. Разработан алгоритм по определению практических рекомендаций по оптимальному использованию преобразователя частоты в составе стрелочного перевода согласно этим критериям с помощью метода наименьших квадратов. С помощью данного алгоритма составлены практические рекомендации в виде таблиц по параметрированию преобразователей частоты. Возможно создание баз эксплуатационных данных стрелочных переводов из таких таблиц и их конвертирование в любой доступный формат для дальнейшего использования в системах микропроцессорной централизации, либо в качестве справочных материалов для обслуживающего персонала.

Дана попытка объяснить быстрый рост зазоров в некоторых стрелках и специфические волнообразные деформации переводных поверхностей наличием автоколебательных процессов в кинематической линии, что подтвердилось на математической модели. Для определения наличия колебательных процессов исследуемых координат в рамках данных исследований введены амплитудный и частотный критерии колебательности. В результате исследований определено, что наиболее опасные (с точки зрения амплитуды упругой силы) углы наклона – $30...40^0$ для СП с двигателями постоянного тока и $10-20^0$ для СП с двигателями переменного тока.

Улучшена динамика движения острых путем синтеза и применения передаточной функции астатического регулятора скорости методом полиномиальных уравнений как в системах с постоянным моментом сопротивления, так и при его функции от скорости движения. При синтезе передаточной функции регулятора скорости разработан численный алгоритм для определения однозначности коэффициентов полиномов в случае нелинейного момента сопротивления. Обоснованы рекомендации по изменению конструкции модернизируемого СП, а именно исключение технологического зазора 46^0 в редукторе. Такое изменение позволит значительно снизить силу удара в начале перевода и уменьшить нагрузку на шпильковые соединения.

Разработан стендовый образец стрелочного перевода с использованием преобразователя частоты Micromaster 430 фирмы Siemens, а также образец с преобразователем частоты собственного производства, который проходил испытания на действующем стрелочном переводе №530 станции Основа Южной железной дороги. В ходе экспериментов испытана схема управления

стрелочным переводом, а также проработаны основные защитные и технологические режимы работы стрелки.

Ключевые слова: электромеханическая система, система управления, асинхронный частотно-управляемый электропривод, автоколебательные процессы, астатический регулятор скорости.

Smirnov V.V. Synthesis of control systems of a regulated electric drive as multimass electromechanical system. - As a manuscript.

Dissertation for the degree of Philosophies Doctor in specialty 05.09.03 - electrical complexes and systems.

The thesis is devoted to expanding the functionality of Railway turnouts by implementing asynchronous frequency-controlled drive. The mathematical model switches from considering design features and characteristics of the load. The technological process of movement optimization criteria studs, the algorithm for determination of practical recommendations for optimal use of the frequency converter in the crossing piece according to these criteria using the method of least squares. This attempt to explain the rapid growth of gaps in some switches and specific wave deformation rail surfaces the presence of auto-oscillatory processes in the kinematic line was confirmed by mathematical models. Improved driving dynamics studs through the synthesis and application of transfer function astatic speed controller by polynomial equations as in systems with constant load, and in its function of speed.

Keywords: electromechanical system, control system, frequency-controlled asynchronous drive, oscillating processes astatic regulator device.



Підписано до друку 31.08.2012 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman/
Умовн. друк. арк.1,9. Наклад 100 прим. Зам. №

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16