

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МАСЛІЙ АРТЕМ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.382.2/3

**МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИЙ  
ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ МОНОШПАЛЬНОГО  
ТИПУ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки 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  
**Волянський Роман Сергійович**,  
Дніпродзержинський державний  
технічний університет,  
кафедра електротехніки та електромеханіки

Захист відбудеться "5" листопада 2014 р. о 14<sup>30</sup> 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 "1" жовтня 2014 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток систем автоматики і вдосконалення технології її обслуговування значною мірою сприяє підвищенню безпеки руху та покращенню економічних показників діяльності залізниць. Особлива роль при цьому відводиться системам автоматики і телемеханіки, тому що основні технологічні операції з приймання, відправлення та переробці поїздів виконуються на станціях. Ефективність функціонування цих систем багато в чому залежить від якості виконавчих пристроїв, важливе місце серед яких займають стрілочні переводи. Впровадження в життя швидкісного руху в Україні ставить завдання переходу на нові більш ефективні, швидкодіючі і надійні типи стрілочних переводів, як одним з найважливіших виконавчих елементів залізничної автоматики, що забезпечує пропускну здатність станцій. Одним із шляхів підвищення інтенсивності руху є створення стрілочних переводів, що дозволяють скоротити час переводу гостряків. Іншим важливим аспектом інтенсифікації руху є автоматизація процесу підбиття баласту спеціальними автоматизованими комплексами, які працюють у безперервному режимі руху по магістралі. Найкоротшим шляхом вирішення цього завдання стосовно до стрілочного переводу є впровадження приводів моношпального типу.

Таким чином, запропонований в роботі шлях створення перспективних стрілочних переводів є актуальним з точки зору необхідності переходу до нової, сучасної елементної бази систем автоматики.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту згідно з НДР МОН України «Нестационарні режими роботи перспективних систем стрілочного електропривода» (ДР № 0110U002484), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи - створення мікропроцесорного регульованого вентильно-індукторного електроприводу стрілочного переводу моношпального типу для розширення функціональних можливостей залізничної автоматики на основі використання систем керування з нечіткою логікою.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення завдань:

- аналіз існуючих конструкційних рішень електроприводів стрілочних переводів, які експлуатуються на залізницях з точки зору сучасних вимог функціональності, керованості і можливості експлуатації в умовах швидкісного руху;
- розробка математичної моделі вентильно-індукторного електромеханічного перетворювача з урахуванням взаємного впливу магнітних потоків різних фаз;
- створення математичної моделі багатомасової електромеханічної системи стрілочного переводу з урахуванням впливу зовнішніх факторів;
- визначення геометричних розмірів і параметрів вентильно-індукторного двигуна, системи управління, порівняння і вибір найбільш перспективних напрямків модернізації, розробка комплексу технічних рішень, спрямованих на збільшення швидкості переводу і надійності;
- синтез дискретних регуляторів швидкості системи керування вентильно-індукторним двигуном та оцінка якості їх роботи;

- розробка і створення мікропроцесорної системи управління, що дозволяє здійснювати процес перевodu з плавним доводом гостряків до рамної рейки, захист двигуна від перевантажень, а також контроль положення гостряків;

- створення математичної моделі вентильно-індукторного електроприводу моношпального типу; проведення досліджень та оцінка якості електромеханічних процесів у системі;

- проведення лабораторних випробувань на базі розробленого мікропроцесорного електроприводу стрілочного перевodu.

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

*Предмет дослідження* – мікропроцесорна система керування електроприводом стрілочного перевodu з використанням фазі-логіки.

**Методи дослідження.** Метод поліномів Чебишева застосовано для отримання неперервних залежностей поточозчеплень та електромагнітного моменту вентильно-індукторного двигуна; завдяки генетичного методу отримана бажана форма фазного струму вентильно-індукторного двигуна; на базі метода Зіглера-Нікольса синтезовані регулятори швидкості; на основі теорії електропривода розроблені моделі кінематичних ланок, а також враховані характеристики навантаження об'єкта за наявності пружності з'єднувальних елементів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- ідентифіковані параметри математичних моделей вентильно-індукторних двигунів для приводів стрілочних переводів з урахуванням взаємного впливу магнітних потоків фаз;

- досліджено вплив форми фазного струму вентильно-індукторного двигуна на величину пульсацій моменту;

- синтезовані дискретні П-, ІІ- та ІІД-регулятори, а також регулятор з нечіткою логікою для системи управління стрілочним вентильно-індукторним електроприводом моношпального типу;

- розроблений алгоритм управління стрілочним переводом моношпального типу з вентильно-індукторним двигуном на базі мікропроцесорної системи з можливістю вибору широкого спектра режимів процесу перевodu.

**Практичне значення одержаних результатів.** Для залізничного транспорту розроблено електропривод стрілочного перевodu моношпального типу з мікропроцесорним управлінням на базі фазі-логіки, що забезпечує більшу швидкодію і надійність процесу перевodu. Створено макет стрілки з новим типом електроприводу в масштабі 1:2, який повністю підтверджує перспективність запропонованої системи управління (подана заявка на патент України *U 201407676*)

Результати, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи, впроваджені в навчальний процес Української державної академії залізничного транспорту на Навчально-науковому інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів, а також на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту.

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведений системний аналіз існуючих конструкційних рішень електроприводів стрілоч-

них переводів; розроблені математичні моделі трьохфазного та чотирьохфазного індукторного перетворювачів енергії; отримано бажану криву фазного струму вентильно-індукторного двигуна; розроблено модель стрілочного переводу типу СП-6 з використанням в якості приводного вентильно-індукторного двигуна; розроблено математичну модель електронного комутатора; синтезовано ПІ- та ПІД-регулятори швидкості, а також регулятор з нечітким керуванням; розроблено одномасову математичну модель стрілочного переводу моношпального типу; побудовано алгоритм управління вентильно-індукторним електроприводом стрілочного переводу моношпального типу на базі мікропроцесорної системи управління; розроблено макетний зразок електроприводу стрілочного переводу моношпального типу, проведені фізичні експерименти, виконано аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 2010р., 2013р.; м.Одеса, 2011р.; с.м.т. Миколаївка, 2012 р.) та щорічних семінарах Наукової Ради Національної академії наук України «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту» (м. Харків, 2011–2012р.р.) та «Проблеми перетворення електроенергії в системах електричного транспорту» (м. Харків, 2013–2014р.р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 12 наукових публікаціях, з них: 11 - у наукових фахових виданнях України (1 - у виданні, включеного до міжнародних наукометричних баз), 1 - у закордонному періодичному фаховому виданні.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 192 сторінки, з них 34 рисунки та 11 таблиць по тексту; 70 рисунків на 56 сторінках; 5 таблиць на 2 сторінках; список використаних джерел із 107 найменувань на 13 сторінках; 5 додатків на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**У вступі** обґрунтована актуальність роботи та відображений її зв'язок із науковими програмами; сформульована мета й основні задачі дослідження; наведені 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 регульованого вентильно-індукторного електроприводу моношпального стрілочного переводу. Показано, що загальні вимоги до стрілочних переводів як для звичайного, так і високошвидкісного руху зводяться до забезпечення максимальної надійності та безпеки, при яких витрати на поточне утримання мінімальні, до зменшення часу на встановлення стрілочного переводу, зниження енергоспоживання, розширення функцій приводу, таких, як автовозврата і плавний довід гостряка до рамної рейки. Визначено, що застосований технологічний зазор в кінематичній схемі стрілочного переводу, необхідний для поліпшення умов прямого пуску двигуна, призводить до значних

ударів у кінематичному вузлі шиббер-тяга. Фрикційна муфта, що застосовується для захисту двигуна від перевантажень, потребує сезонного переналагодження та постійної уваги обслуговуючого персоналу, адже регулює максимальне зусилля для здійснення переводу рейок.

Сьогодні розвиток мікросхемотехніки дає можливість створення мікропроцесорних систем управління, а також розширення функціональних можливостей приводу, використання безконтактних датчиків нового покоління, застосування електронної перетворювальної техніки, захисту двигуна під час переводу без використання фрикційного зчеплення. Використання вентильно-індукторного двигуна дасть можливість відмовитись від технологічного зазору, спростити кінематичну ланку стрілочного переводу та забезпечити первинний контроль за положенням го-стряків завдяки датчику положення ротора.

Отже, визначено необхідність модернізації існуючих систем стрілочних приводів саме засобами електроприводу.

**Другий розділ** присвячений розробці математичної моделі трьохфазного вентильно-індукторного двигуна для електроприводу стрілочного переводу з урахуванням взаємного впливу магнітних потоків фаз. За об'єкт дослідження прийнятий двигун марки ЭМСУ-0,25-160В, який розроблений під керівництвом д.т.н. проф. Ростовського державного університету шляхів сполучення Петрушина А. Д. Для такої електромеханічної системи застосовувалось рівняння Лагранжа II роду. В результаті отримані три рівняння електричного та одне рівняння механічного балансів двигуна:

$$\frac{d\Psi_A(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{dt} + \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \left( \int_0^{i_B} \Psi_B(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_B + \int_0^{i_C} \Psi_C(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_C \right)}{\partial i_A} \right] = e_A - r_A i_A, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_B(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{dt} + \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \left( \int_0^{i_A} \Psi_A(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_A + \int_0^{i_C} \Psi_C(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_C \right)}{\partial i_B} \right] = e_B - r_B i_B, \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_C(i_A, i_B, i_C, \gamma)}{dt} + \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \left( \int_0^{i_A} \Psi_A(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_A + \int_0^{i_B} \Psi_B(i_A, i_B, i_C, \gamma) di_B \right)}{\partial i_C} \right] = e_C - r_C i_C, \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_{дв}(i_A, i_B, i_C, \gamma) - \alpha\omega - M_C)}{J}, \quad (4)$$

де  $e_A, e_B, e_C$  – напруга джерела живлення;  $i_A, i_B, i_C$  – струми відповідних фаз;  $r_A, r_B, r_C$  – активні опори відповідних фаз;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$  – потокозчеплення відповідних фаз;  $M_{дв}$  – електромагнітний момент двигуна;  $J$  – момент інерції двигуна;  $\omega$  – частота обертання двигуна;  $\gamma$  – кут повороту ротора;  $\alpha$  – коефіцієнт тертя в підшипниках двигуна;  $M_C$  – момент опору двигуна.

Для ідентифікації параметрів запропоновано здійснювати розрахунок магнітного поля двигуна в двовимірній постановці з використанням методу кінцевих елементів завдяки програмному комплексу FEMM. Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемній зоні при неузгодженому і узгодженому положеннях, а також значення магнітної індукції для різних областей машини (показані в таблицях праворуч від моделей) при включеній фазі А представлені на рис.1.

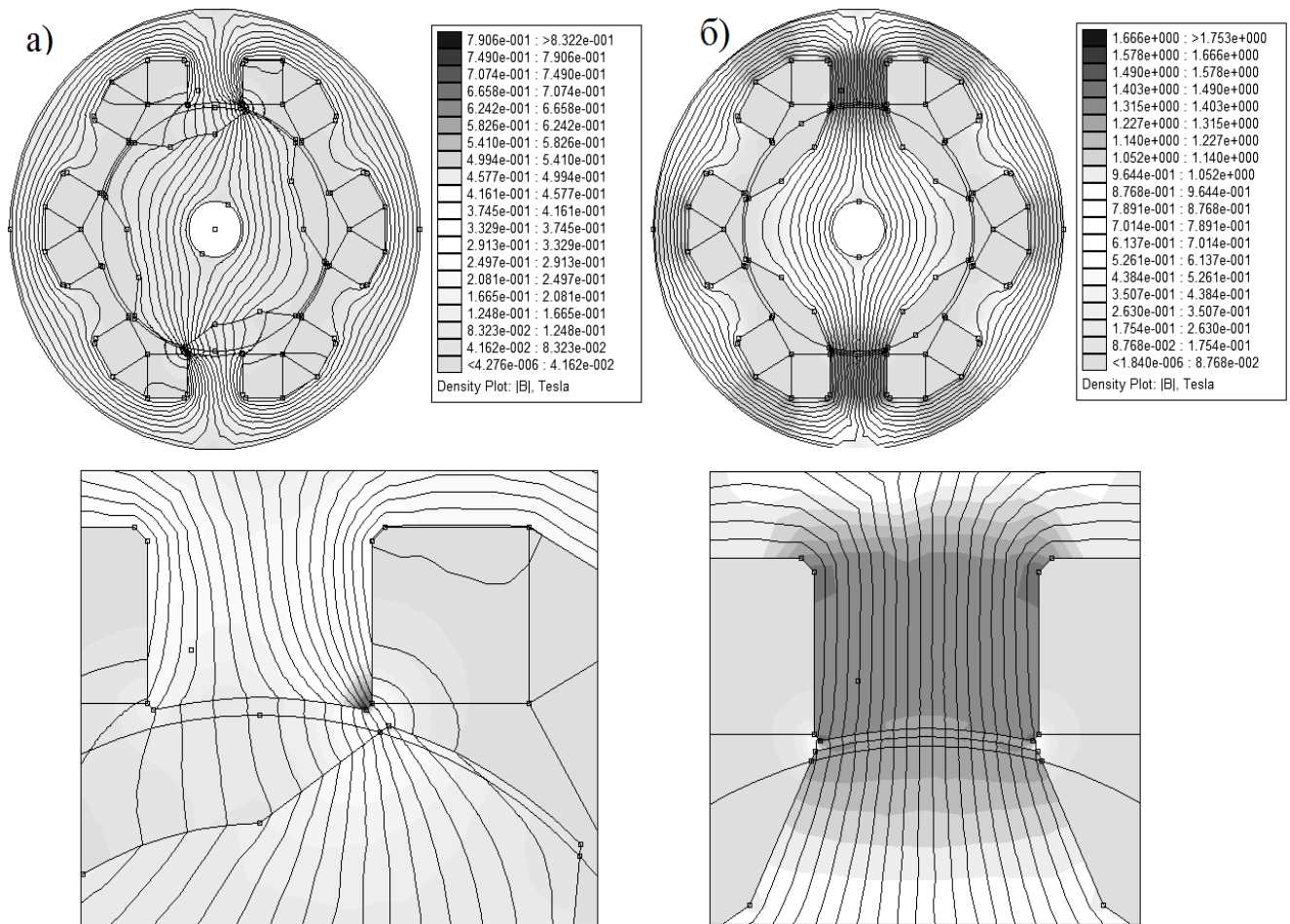


Рисунок 1 – Зображення розподілу магнітного поля:

а) – неузгоджене положення та б) – узгоджене положення

Розрахунок магнітного ланцюга в середовищі FEMM проведено з урахуванням взаємного впливу поточкозчеплень трьох фаз. Для отримання безперервних залежностей поточкозчеплень та електромагнітного моменту двигуна результати цифрового моделювання апроксимовані безперервними функціями наступного виду

$$f(i_A, i_B, i_C, \gamma) = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a_{ijk} \cdot i_A^i \cdot i_B^j \cdot i_C^k \right) \times \right. \\ \left. \times \cos(l\gamma) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n b_{ijk} \cdot i_A^i \cdot i_B^j \cdot i_C^k \right) \sin(l\gamma) \right] + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c_{ijk} \cdot i_A^i \cdot i_B^j \cdot i_C^k, \quad (5)$$

де  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$  – коефіцієнти поліномів;  $l$  – номер гармоніки.

Для визначення коефіцієнтів  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$  застосовувався метод поліномів Чебишева. Використані поліноми, що включають в себе струми 3 ступеня і містять 29 гармонік при величині похибки, що не перевищувала 3%.

Після ряду перетворень, проведених з рівняннями (1-3), отримана система диференціальних рівнянь вентильно-індукторного двигуна (5), якій відповідає структурна схема представлена на рис.2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = F_A(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{di_B}{dt} = F_B(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{di_C}{dt} = F_C(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_{ДВ}(i_A, i_B, i_C, \gamma) - \alpha\omega - M_C)}{J}, \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega. \end{array} \right. \quad (6)$$

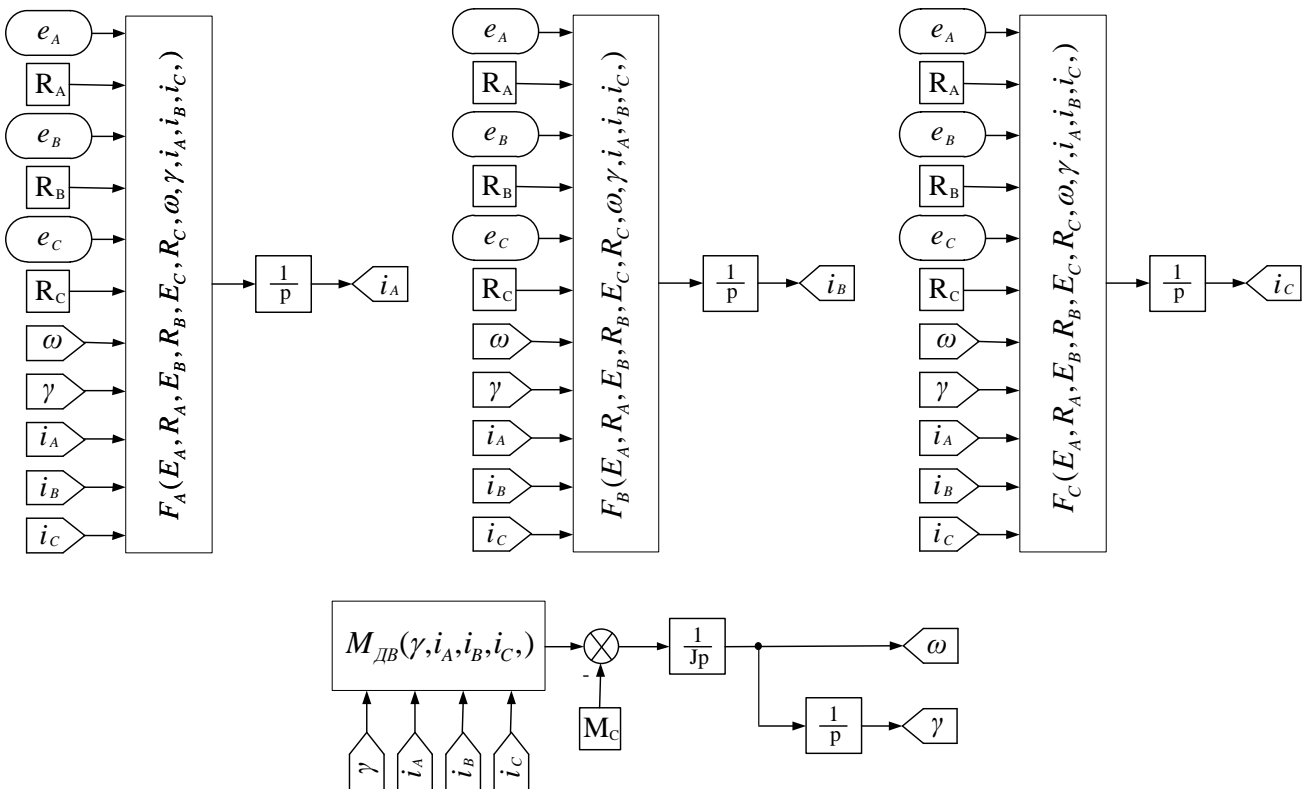


Рисунок 2 – Структурна схема трьохфазного вентильно-індукторного двигуна

На підставі (6) при відповідних початкових умовах проводилось моделювання пуску машини. Інтегрування (6) здійснювалось на основі пакету MATLAB. Розрахункові осцилограми роботи вентильно-індукторного двигуна представлені на рис.3.



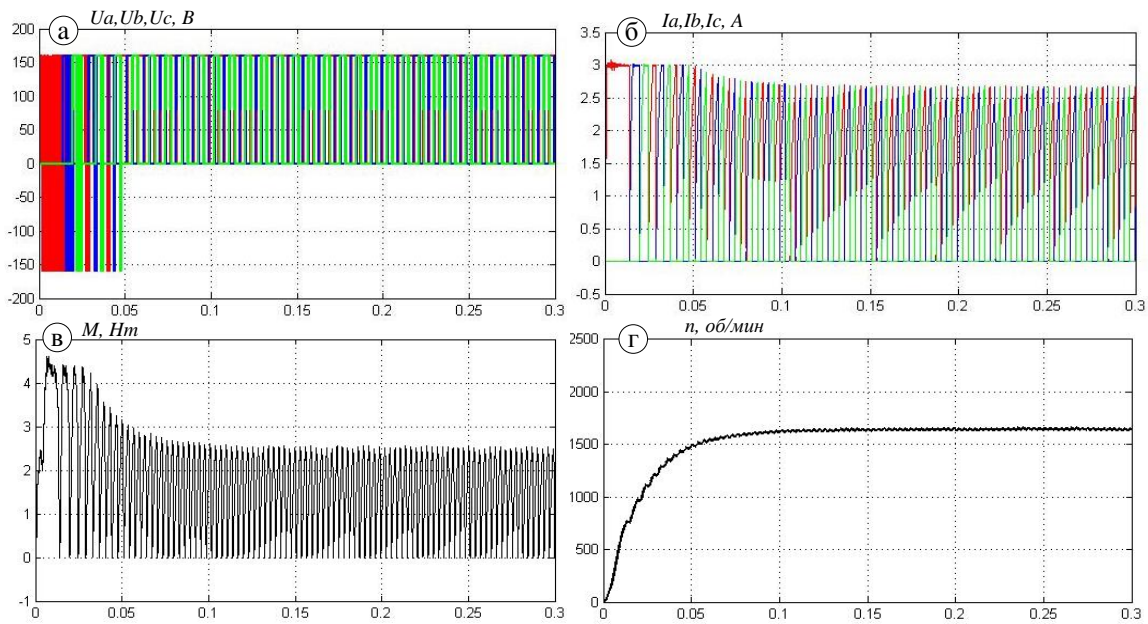


Рисунок 3 – Осцилограми роботи вентильно-індукторного двигуна:  
а) - фазна напруга; б) - фазні струми; в) - електромагнітний момент;  
г) - швидкість обертання

В третьому розділі проведений аналіз динамічних процесів в кінематичній ланці електроприводу стрілочного переводу.

Сформована розрахункова схема механічної частини у вигляді тримасової системи, структурна схема якої представлена на рис. 4.

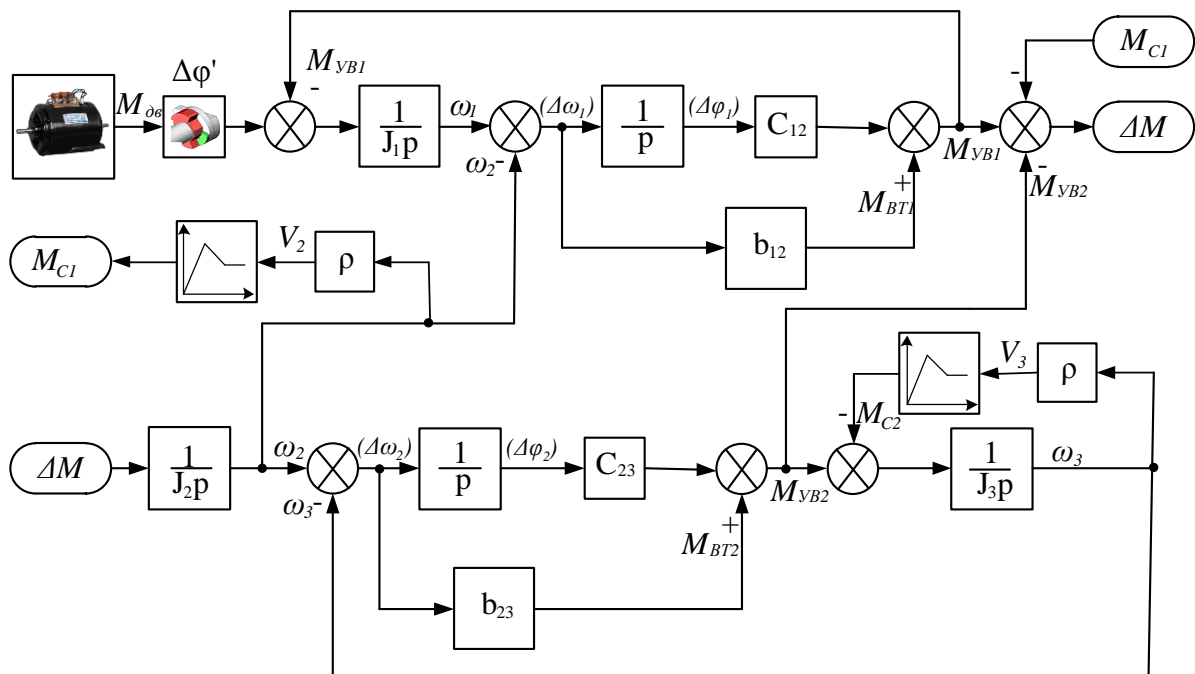


Рисунок 4 – Структурна схема механічної частини стрілочного переводу

В структурній схемі (рис. 4) використані два види двигуна: двигун постійного струму - МСП-0,25, і вентильно-індукторний електродвигун марки ЕМСУ-0,25-160В. В якості навантаження застосовувалась характеристика тертя по поверхні сталь-сталь. Величина коефіцієнта тертя при цьому може знаходитись в межах від 0,05 до 0,8 і залежить від стану стрілки: якості змащення стрілочних по-

душок, чистоти обробки їх поверхонь, підшов гостряків, кількості контактних поверхонь та інших факторів. При моделюванні прийнята характеристика тертя представлена на рис. 5.

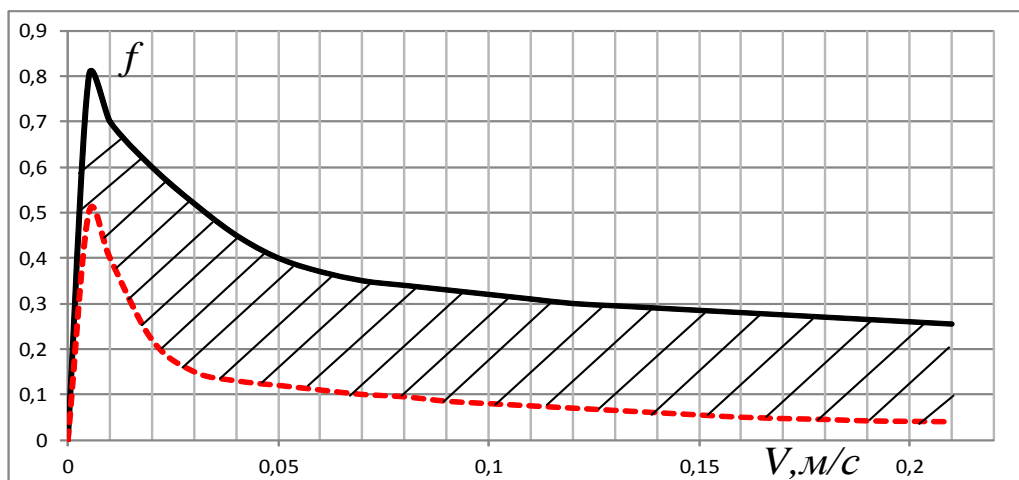


Рисунок 5 – Область зміни характеристики тертя

При роботі стрілочного переводу коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь може знаходитися в заштрихованій області, обмеженою двома кривими (рис. 7). У процесі моделювання задавалися різні варіанти, в результаті чого отримані перехідні процеси в кінематичній лінії стрілочного переводу. Для визначення умов виникнення і розвитку автоколивальних режимів роботи стрілочного переводу проведено дослідження, в ході якого змінювалася жорсткість характеристики тертя (рис. 5). На рис. 6 представлений характер розподілу максимуму пружних сил.

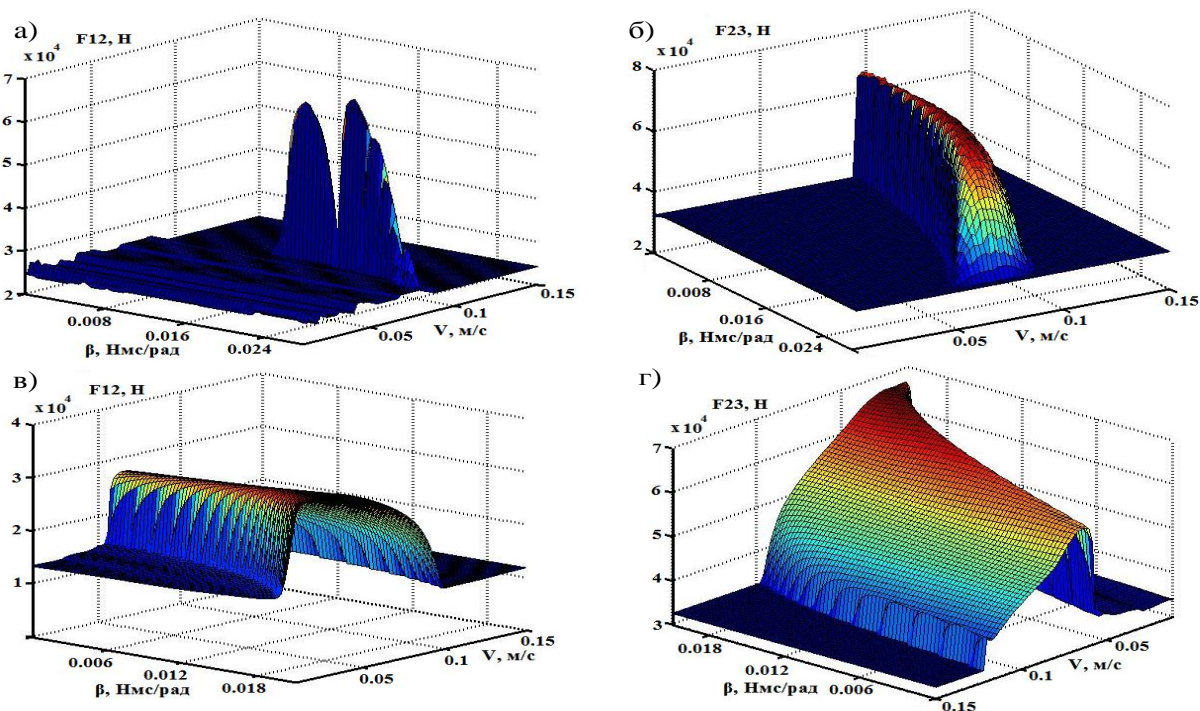


Рисунок 6 – Поверхні, що відображають розподілення максимуму пружних сил першого і другого гостряків: а) та б) – з двигуном постійного струму; в) та г) – з вентильно-індукторним двигуном

За отриманими перехідними процесами визначені області характеристики тертя і швидкостей руху гостряків, які найбільш негативно впливають на процес переводу і можуть призвести до незворотних наслідків. У діапазоні жорсткостей характеристики тертя (0,01 ... 0,02) Нмс/рад і швидкостей переводу (0,05 ... 0,1) м/с спостерігаються піки максимумів пружних сил як для першого так і другого гостряків. При використанні вентиляльно-індукторного приводу ці максимуми в 1,5-2 рази нижче в порівнянні з приводом постійного струму, що в свою чергу підтверджує можливість і доцільність в якості приводного для стрілочного переводу використання вентиляльно-індукторного приводу.

У четвертому розділі проводилась розробка регульованого вентиляльно-індукторного електроприводу. Основними завданнями при цьому було спрощення кінематичної лінії стрілочних переводів старих типів, а також методом Зіглера-Нікольса синтез ПІ, ПІД регуляторів швидкості та нечіткого регулятора на базі фазі-логіки.

Виникнення автоколивальних процесів в кінематичній лінії стрілочного переводу в основному залежить від складності конструкції. Тому для мінімізації цього явища запропоновано спростити механічну частину шляхом використання пари «гвинт-гайка». Така передача створює великі зусилля, а також забезпечує точні переміщення. Застосування такого типу редуктора дозволяє розмістити всю конструкцію приводу в порожнистій шпалі, що, в свою чергу, не тільки зменшує габарит стрілочного переводу, а й спрощує завдання його установки, або заміни. Запропонована конструкція електроприводу стрілочного переводу моношпального типу має вигляд представлений на рис. 7.

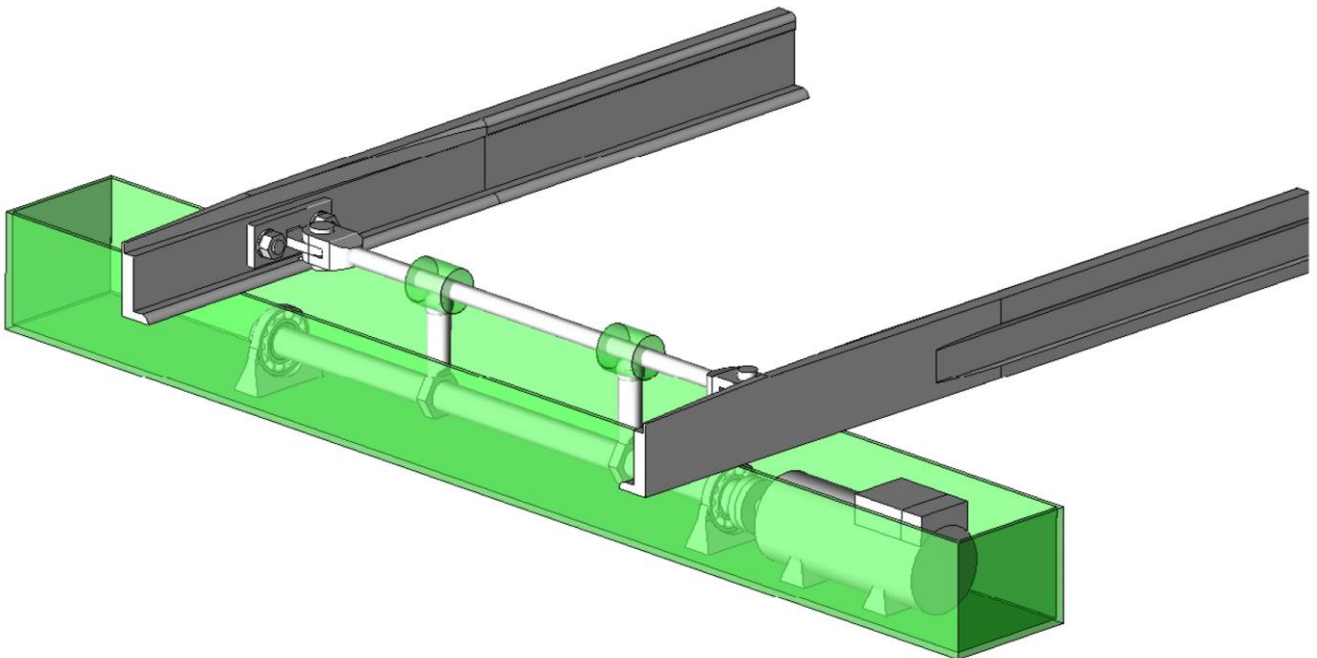


Рисунок 7 – Кінематична схема електропривода стрілочного переводу моношпального типу

В якості двигуна застосовано – чотирифазний вентиляльно-індукторний, який в порівнянні з трифазним має менші пульсації електромагнітного моменту. Вживаний в цій машині датчик положення ротора, на первинному етапі здійснює кон-

троль за положенням гостряків. 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 нехтуючи зазорами в з'єднаннях (оскільки ці зазори з'являються в процесі вироблення), запропоновану кінематичну схему (рис. 7) представлено в вигляді абсолютно жорсткої одномасової системи, структурна схема якої показана на рис. 8.

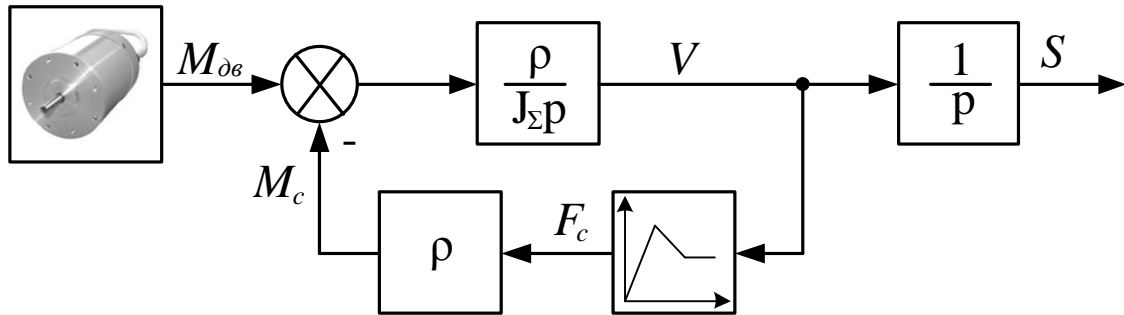


Рисунок 8 – Структурна схема механічної частини електроприводу стрілочного переводу моношпального типу

Електронний комутатор у вентильно-індукторному приводі необхідний для підключення фаз двигуна до джерела живлення залежно від сигналу датчика положення ротора. Так як робота двигуна не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній застосовується полумостова (однонапівперіодна) схема. При цьому число силових елементів зростає пропорційно числу фаз, що призводить до подорожчання перетворювача. Тому для живлення чотирифазного вентильно-індукторного двигуна запропонована схема Міллера (рис. 9)

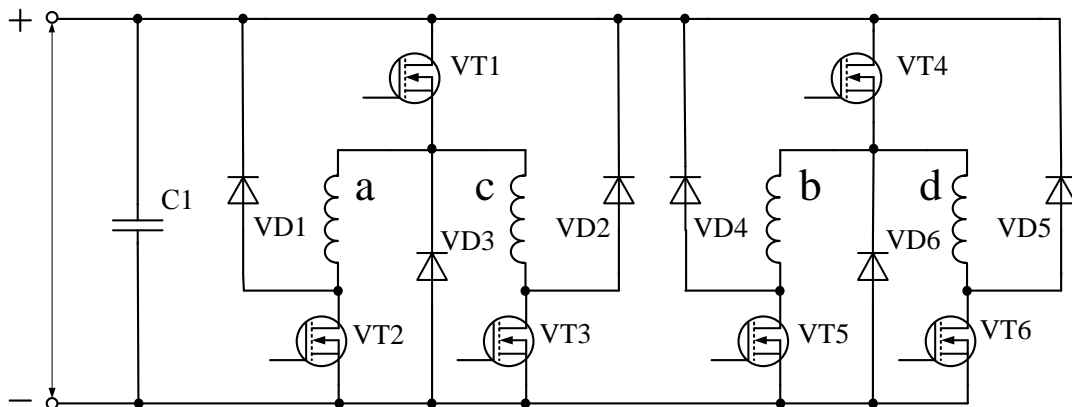


Рисунок 9 – Схема електронного комутатора для живлення чотирифазного вентильно-індукторного двигуна

Завдяки такій схемі реалізована одиночна симетрична комутація фаз з регулюванням струму шляхом ШІМ з частотою 50 кГц. Обмеження максимального струму фази двигуна прийнято на рівні 20А, що відповідає режиму струмообмеження при триразовому перевантаженні по моменту. При моделюванні роботи перетворювача використані технічні дані польового транзистора IRFP4137 і діодів 25F40M.. Джерело живлення в моделі представлено ідеальним джерелом напруги.

Система управління вентильно-індукторним приводом представляє собою систему підлеглого регулювання координат з можливістю використання П, ПІ і ПІД регуляторів швидкості. Цифрова реалізація цих регуляторів отримана шля-

хом дискретної апроксимації операцій інтегрування і диференціювання. Для похідної за часом використано правило зворотної різниці (7), а інтегрування апроксимоване за допомогою формули прямокутників (8)

$$u[n] = \frac{e[n] - e[n-1]}{T_0}, \quad (7)$$

де  $T_0$  – період квантування;  $n=0,1,2\dots$  – поточний період квантування.

$$u[n] = u[n-1] + T_0 e[n]. \quad (8)$$

На основі z-перетворення отримана передавальна функція цифрового ПІД-регулятора

$$W_p(z) = K_p + K_i \frac{T_0 z}{z-1} + K_d \frac{z-1}{T_0 z}, \quad (9)$$

де  $K_p$  - коефіцієнт передачі пропорційної складової;  $K_i$  - коефіцієнт передачі інтегральної складової;  $K_d$  - коефіцієнт передачі диференціальної складової

На підставі цієї передавальної функції отримане різницеве рівняння, що описує алгоритм роботи дискретного ПІД-регулятора

$$u[n] = K_p e[n] + K_i (u[n-1] + T_0 e[n]) + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) = K_p e[n] + K_i T_0 e[n] + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) + K_i u[n-1]. \quad (10)$$

Знаходження і настройка коефіцієнтів регуляторів проводилась з використанням раніше отриманої математичної моделі об'єкта регулювання та метода Зіглера-Нікольса. Цей метод базується на запасі стійкості. Використовуючи результати експериментального дослідження системи, що складається з ПІ-регулятора і заданого об'єкта регулювання знайдені коефіцієнт передачі регулятора  $K_p'$ , при якому система знаходиться на границі стійкості та період сталих коливань  $T'$ . Значення параметрів регулятора обраного типу розраховувались за формулами, наведеними в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахунок параметрів регулятора за методом Зіглера-Нікольса

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<b>П-регулятор</b>	$0,5K_p'$	-	-
<b>ПІ-регулятор</b>	$0,45K_p'$	$0,54K_p' / T'$	-
<b>ПІД-регулятор</b>	$0,6K_p'$	$2K_p' / T'$	$0,075K_p' T'$

Після знаходження коефіцієнтів  $K_p, K_i, K_d$  отримана структурна схема дискретного ПІД-регулятора, яка представлена на рис. 10

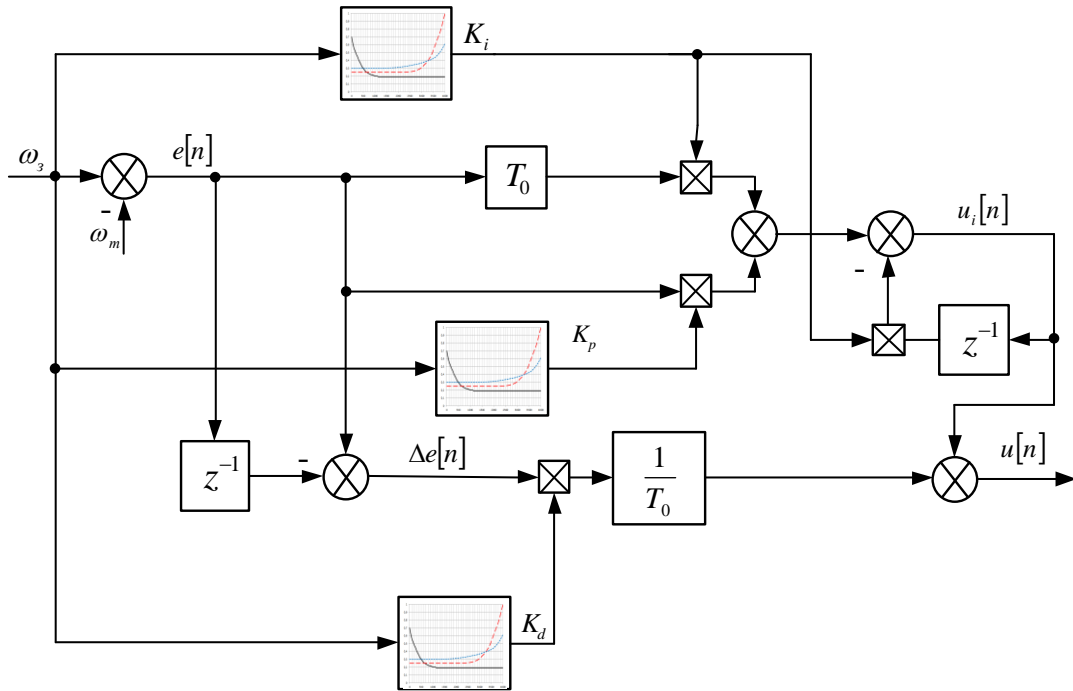


Рисунок 10 – Структурна схема дискретного ПІД-регулятора

З використанням математичної моделі вентильно-індукторного двигуна та коефіцієнтів ПІД-регулятора отримані коефіцієнти нечіткого ПІД-регулятора, які представляють собою тривимірні функції (рис. 11)

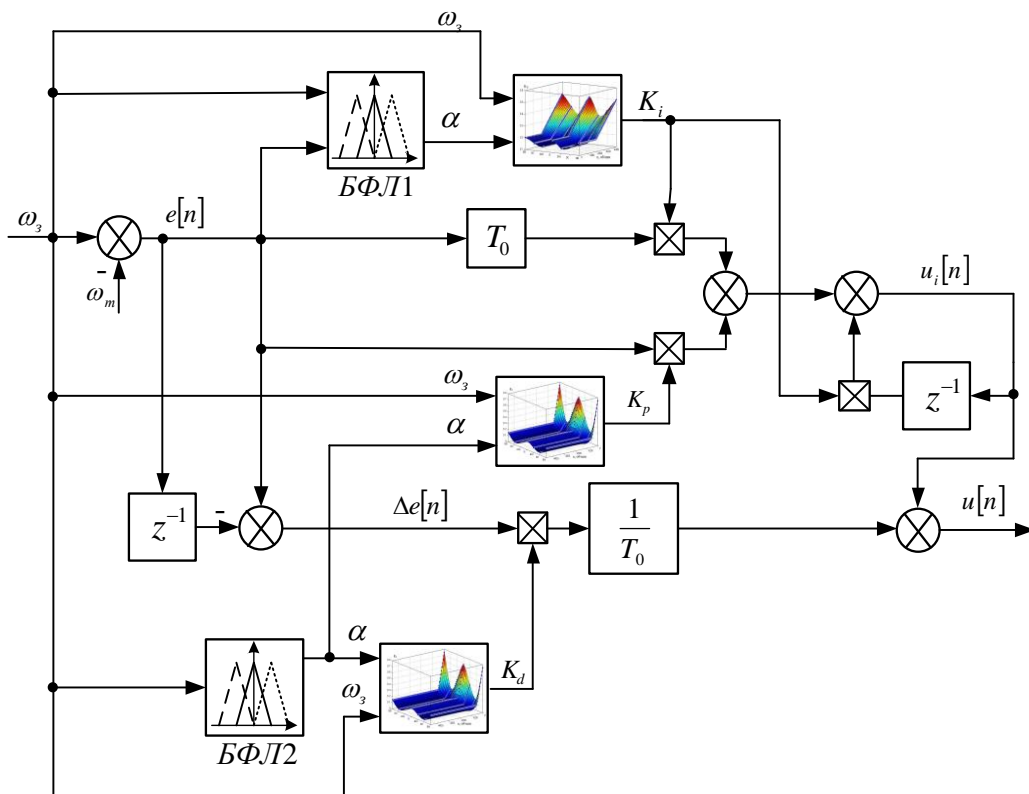


Рисунок 11 – Структурна схема нечіткого ПІД-регулятора швидкості

Для аналізу роботи отриманих регуляторів швидкості створені математичні моделі, на підставі яких отримані осцилограми роботи електропривода (фазний струм, електромагнітний момент і швидкість) з ПІ, ПІД та нечітким регуляторами швидкості при сталому навантаженні (рис. 12).

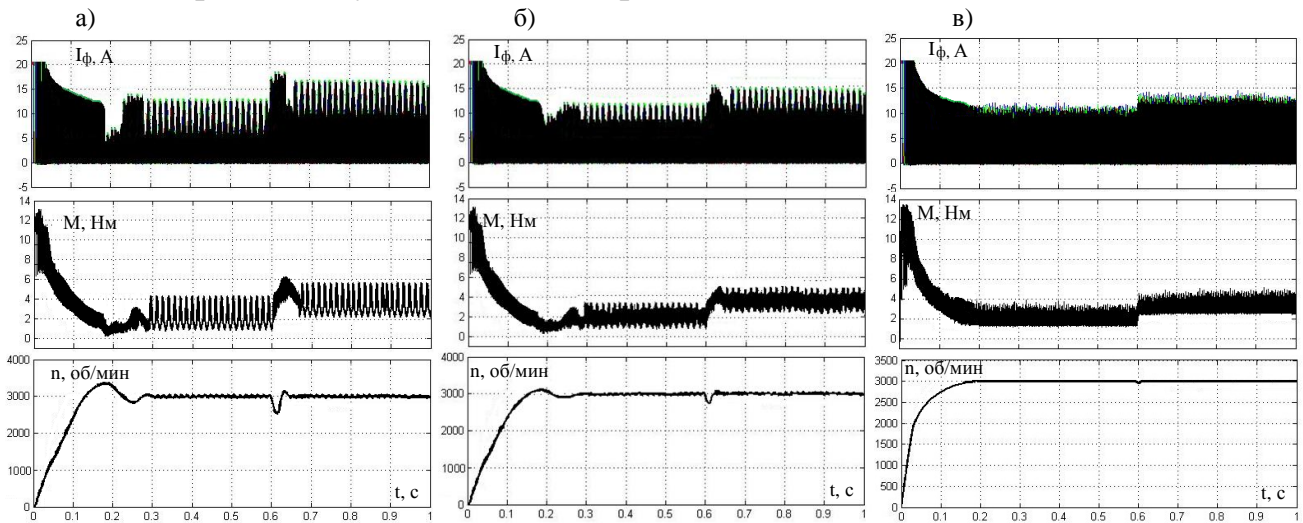


Рисунок 12 – Осцилограми роботи вентиляно-індукторного електроприводу: а) – з ПІ-регулятором; б) – з ПІД-регулятором; в) – з нечітким регулятором

В момент часу 0,6 с. до машини прикладався додатковий момент опору, чому відповідає просадка по швидкості. За отриманими осцилограмами встановлено, що найбільш якісний перехідний процес відповідає нечіткому регулятору швидкості.

Для дослідження динамічних процесів, в кінематичній лінії стрілочного переводу моношпального типу створена математична модель, яка дозволила отримати осцилограми тягового зусилля на гостряках та їх швидкості руху з характеристиками тертя, що найбільш негативно впливають на процес переводу (рис. 13).

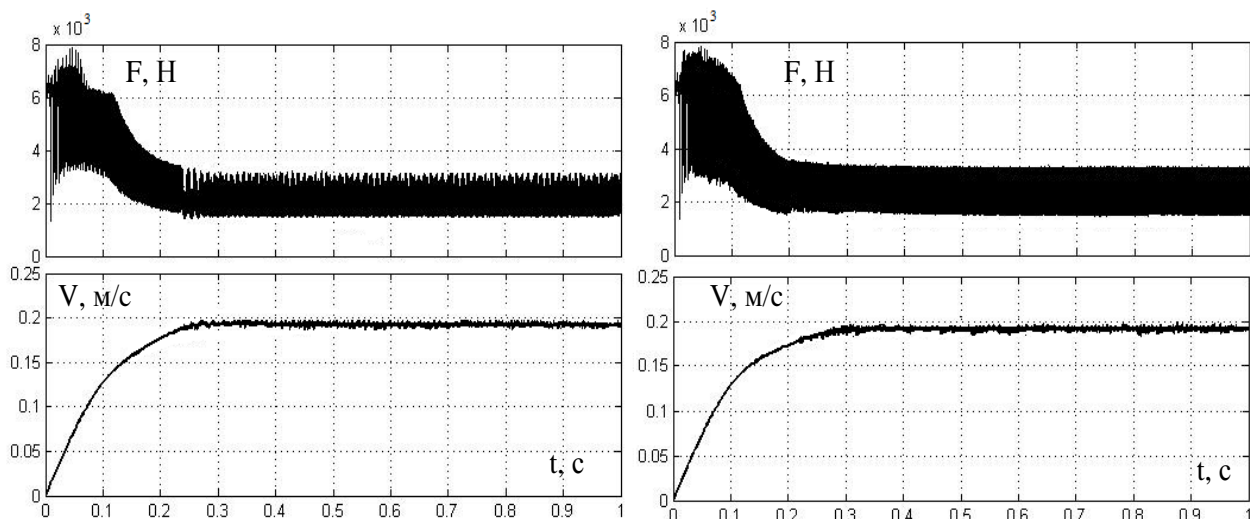


Рисунок 13 – Нестационарний процес в кінематичній лінії електропривода стрілочного переводу моношпального типу

Отримані результати показали, що навіть при вкрай негативному стані перевідних поверхонь в кінематичній лінії присутні коливання тягового зусилля, але

їх амплітуда по порівнянню зі стрілочним переводом старого типу знизилася в 5,5-6 разів.

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

Дослідження спрямовані на розробку системи управління вентильно-індукторним електроприводом, перевірку ефективності системи управління з різними типами регуляторів швидкості, а також на отримання осцилограм роботи електропривода стрілочного переводу моношпального типу. Експерименти проводилися на макетному зразку, який показаний на рис. 14.

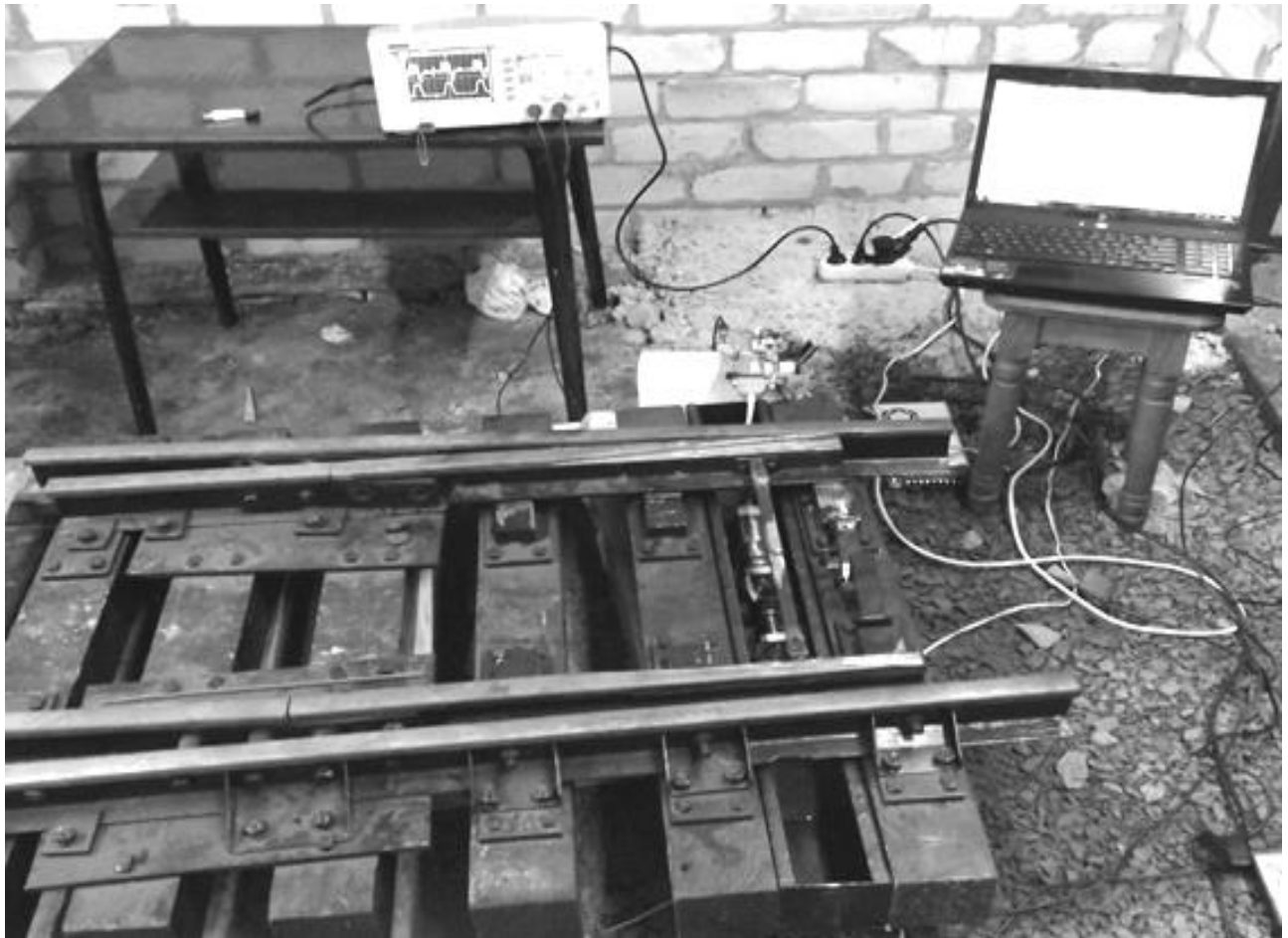


Рисунок 14 – Макетний зразок стрілочного переводу моношпального типу

В якості приводного застосований чотирьохфазний вентильно-індукторний двигун, розроблений науковим колективом під керівництвом д.т.н., професора Римши В.В. Сам стрілочний привід вмонтований в порожню металеву шпалу. Редуктор представляє собою тип гвинт-гайка (гвинт виготовлений зі сталі, а гайка - з бронзи) з кроком різьби - 1мм. Гайка з'єднана з тягою через обертовий механізм, а двигун за допомогою муфти - з гвинтом, встановленим на двох опорних підшипниках. Гостряки виготовлені з рамної рейки марки Р33 в масштабі 1:2. Також розроблений програмний алгоритм для управління представленим стрілочним переводом. У даному випадку застосовувались два типи регуляторів швидкості: ПД- і нечіткий ПД-регулятор. Результати експерименту приведені на рис. 15.



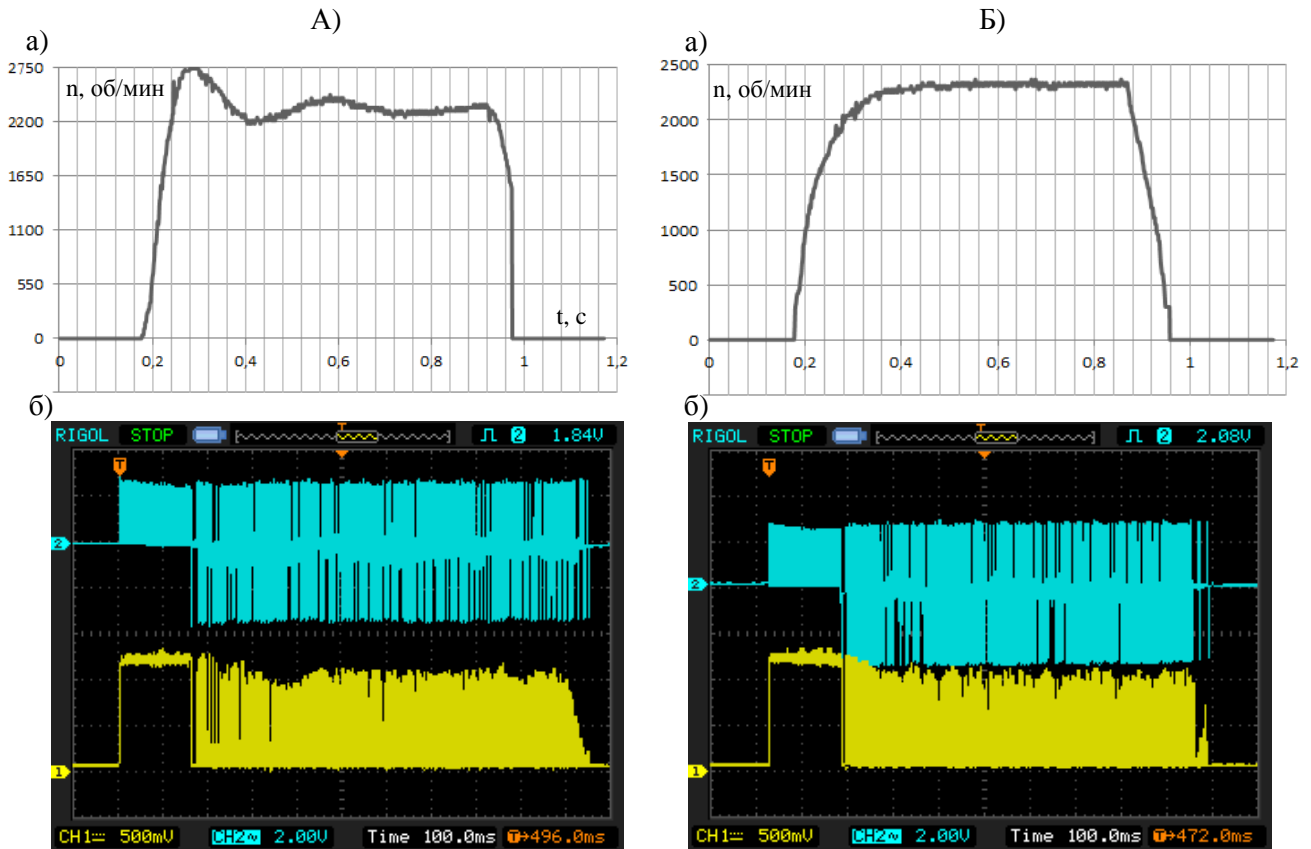


Рисунок 15 – Осцилограми процесу переходу: А) – з ПІД регулятором та Б) – з ФПІД регулятором; а) – швидкість та б) – напруга і струм фази

Проаналізувавши ці осцилограми, отримані основні показники якості для регуляторів швидкості. Перехідний процес з ПІД-регулятором має перерегулювання, яке повністю відсутнє із застосуванням нечіткої логіки. Досягнуто зменшення часу переходу до 0.8 сек. без форсування. Проведено дослідження роботи двигуна в процесі переходу у випадку виходу з ладу однієї з фаз (в перетворювачі штучно задавалося її відключення), яке підтвердило працездатність роботи розробленої системи в аварійних режимах.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційної роботи вирішена науково-практична задача модернізації стрілочного переходу шляхом застосування в якості приводного вентиляно-індукторного двигуна, а також створення регульованого електроприводу моношального стрілочного переходу. Конструктивною перевагою пропонованої системи є спрощення механічної частини, здатність контролю за положенням гостряків за допомогою датчиків нового покоління, а також застосування мікропроцесорної системи управління систем автоматизи.

1. Проведено аналіз наукових робіт і практичних розробок в частині спрямування розвитку сучасних електроприводів стрілочних переходів, який показав можливість покращення функціональності експлуатованих вітчизняних стрілочних переходів в умовах швидкісного руху.

2. Ідентифіковані параметри трифазного та чотирифазного вентиляно-індукторних двигунів, що дозволяє врахувати взаємний вплив потоків фаз.

3. Розроблено математичну модель роботи електромеханічної системи стрілочного переходу з урахуванням конструктивних особливостей і характеристики

навантаження, яка дозволяє аналізувати динамічні режими роботи стрілочного переводу при різних станах перекладних поверхонь.

4. Обґрунтовані рекомендації щодо зміни конструкції стрілочного переводу, а саме - повна зміна механічної частини шляхом переходу до моношпального типу, яке дозволить значно знизити коливальний процес в кінематичній лінії.

5. Синтезовані ПІ-, ПІД-, а також нечіткий ПІД-регулятори швидкості, що дозволяє поліпшити динаміку роботи електроприводу стрілочного переводу як в штатних, так і нестационарних режимах.

6. Перехід до стрілочному переводу шпального типу дозволяє застосувати мікропроцесорну систему управління, створити перспективні засоби захисту електродвигуна та забезпечити контроль положення гостряків, а також можливість вибору режиму роботи стрілочного переводу.

7. Розроблений макетний зразок, в якому реалізовані запропоновані алгоритми керування електроприводом стрілочного переводу моношпального типу, випробування якого показали можливість зменшення часу переведення до 1 сек., а також, при необхідності, забезпечення без ударного доводу гостряків до рамної рейки.

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

#### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Маслий А.С. Математическое моделирование электропривода стрелочного перевода с различными типами двигателей / С.Г. Буряковский, А.С. Маслий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С. 392-393.

*Здобувачем отримані характеристики роботи стрілочного переводу з характеристикою навантаження та різними типами двигунів.*

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

*Здобувач порівняв роботу традиційної системи частотно-керованого асинхронного електроприводу з ПІ-регулятором швидкості та розробленої разом зі співавторами системи з ПЛ-регулятором.*

3. Маслий А.С. Математическая модель реактивного индукторного трехобмоточного электромеханического преобразователя / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Н.А. Гордеева, А.С. Маслий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – вип. 19. – С. 95-104.

*Здобувач отримав систему диференційних рівнянь трифазного вентильно-індукторного двигуна.*

4. Маслий А.С. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек /

С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, А.С. Маслий // Електромеханічні і електрозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. - 2012. – вип. 3. - С.605-606.

*Використавши метод Чебишева, здобувач отримав неперервні залежності поточозчеплень фаз та електромагнітного моменту вентильно-індукторного двигуна.*

5. Маслий А.С. Математическое моделирование вентильно-индукторного привода для стрелочного перевода / Б.Г. Любарский, В.И. Мойсеевко, Н.П. Карпенко, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – №1(98). – С. 67-76.

*Здобувачем були ідентифіковані параметри вентильно індукторного двигуна для стрілочного переводу з геометричними параметрами б/4.*

6. Маслий Ар.С. Перспективы модернизации электроприводов стрелочных переводов / С.Г. Буряковский, Ан.С. Маслий, Ар.С. Маслий // Електромеханічні і електрозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. - 2013. – вип. 3(22). - С.124-127.

*Здобувач провів системний аналіз існуючих конструкційних рішень електроприводів стрілочних переводів, які експлуатуються на вітчизняних залізницях і в інших країнах світу та обґрунтував подальші перспективи їх можливої модернізації.*

7. Маслий Ар.С. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода/ С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону: РГУПС. – 2013. – № 2(50). – С. 61-67

*Здобувачем були отримані бажані форми фазного струму для зменшення пульсацій електромагнітного моменту трифазного вентильно-індукторного двигуна.*

8. Маслий Ар.С. Разработка и исследование системы управления вентильно-реактивным электродвигателем / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский, // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – вип. 36. – С. 195-197.

*Здобувач запропонував функціональну схему системи керування вентильно-індукторним електроприводом та отримав експериментальні результати роботи електродвигуна.*

9. Маслий Ар.С. Разработка электропривода стрелочного перевода с вентильно-индукторным электродвигателем и исследование на математической модели режимов его работы / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.Д. Петрушин, // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – вип. 36. – С. 198-201.

*Здобувач розробив математичну модель стрілочного електропривода на базі вентильно-індукторного двигуна, за допомогою якої можна дослідити динамічні процеси в механічній частині стрілочного електропривода при різних характеристиках навантаження.*

10. Маслий А.С. Скоростной подвижной состав требует модернизации стрелочных переводов / С.Г. Буряковський, Д.В. Ломотько, А.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – № 4 (додаток). – С. 95-96.

*Здобувачу належить обґрунтування необхідності використання вентиляно-індукторного електроприводу стрілочного переводу.*

11. Маслий Ар.С. Разработка и исследование системы управления вентиляно-индукторным электродвигателем / С.Г. Буряковський, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – №5(102). – С. 68-74.

*Здобувачем проведено дослідження синтезованих регуляторів швидкості для чотирифазного вентиляно-індукторного двигуна на базі дослідного макетного зразка.*

12. Маслий Ар.С. Синтез регуляторов скорости вентиляно-индукторного электропривода стрелочного перевода / С.Г. Буряковський, Ан.С. Маслий, Ар.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2014. – №1(104). – С. 31-40.

*Здобувачем розглянуті методи налаштування ПІ-, ПІД-регуляторів та нечіткого регулятора швидкості вентиляно-індукторного електроприводу, а також проведений аналіз якості роботи отриманих регуляторів.*

#### **АНОТАЦІЇ**

**Маслий А.С. Мікропроцесорний вентиляно-індукторний електропривод стрілочного переводу моношпального типу.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2014р.

Дисертація присвячена розширенню функціональності залізничного стрілочного переводу шляхом впровадження вентиляно-індукторного електропривода. Це стосується ідентифікації параметрів трьохфазного та чотирьохфазного вентиляно-індукторних двигунів, розробки математичної моделі електроприводу стрілочного переводу з урахуванням пружних зв'язків і характеристики навантаження з використанням в якості приводного вентиляно-індукторного двигуна. Для вирішення проблеми негативного впливу автоколивальних процесів в кінематичній ланці обґрунтовано перехід до стрілочного переводу моношпального типу. Вперше для вентиляно-індукторного приводу синтезовано регулятор швидкості на базі нечіткого керування. При цьому була розроблена математична модель, а також натурний зразок стрілочного переводу моношпального типу.

Всі запропоновані підходи і рішення підпорядковані основній меті роботи і сприяють підвищенню функціональних можливостей стрілочного переводу. У сукупності вони складають певний внесок у розвиток теорії виконавчих пристроїв залізничної автоматики.

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

**Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2014.

Диссертация посвящена расширению функциональности железнодорожного стрелочного перевода путем внедрения вентильно-индукторного электропривода. Данное техническое решение позволяет упростить механическую часть, обеспечить контроль за положением острияков с помощью датчиков нового поколения, а также применить микропроцессорную систему управления систем автоматики.

Стрелочный перевод является основным исполнительным элементом систем железнодорожной автоматики. Базовые конструктивные и технические решения эксплуатируемых в настоящее время основных железнодорожных электроприводов СПб и СП-6м были разработаны в 70-80 гг. прошлого века на основании имеющейся тогда элементной базы. Эти системы в многолетней практике работы показали себя с положительной стороны, но на сегодняшний день они не могут справиться с новыми проблемами, функциями и задачами, которые ставятся за рубежом. Сейчас, в виду развития полупроводниковой техники, назрела необходимость создания современного стрелочного перевода. Общие требования к стрелочным переводам как для обычного, так и высокоскоростного движения сводятся к обеспечению максимальной надежности и безопасности, при которых затраты на текущее содержание минимальны, а также к снижению затрат времени на укладку стрелочного перевода за счет отказа от предварительного монтажа на вспомогательной площадке, снижение энергопотребления. Современные стрелочные переводы оснащаются модифицированной и оптимизированной системой привода. Кроме того, развитие микросхемотехники даёт возможность создания микропроцессорных систем управления, а также расширение функциональных возможностей привода, использования бесконтактных датчиков нового поколения, применения электронной преобразовательной техники, защиты двигателя во время перевода без использования фрикционного сцепления.

Стрелочный перевод рассмотрен как трехмассовая электромеханическая система с последовательным соединением масс. Разработана математическая модель стрелочного перевода с учетом характеристики нагрузки. Идентифицированы параметры трехфазного и четырехфазного вентильно-индукторных двигателей для стрелочного перевода с учетом взаимного влияния магнитных потоков с целью дальнейшего её использования в качестве основного инструмента при исследовании режимов работы стрелочного перевода. Путем оптимизации методом генетического алгоритма получены желаемые формы фазного тока вентильно-индукторного двигателя, поддержание которых позволяет снизить пульсации электромагнитного момента в 5-6 раз.

Обоснованы рекомендации по изменению конструкции стрелочного перевода, а именно – полное изменение механической части путем перехода к моношпальному типу, которое позволило значительно снизить колебательный процесс в кинематической линии. Методом Зиглера-Никольса синтезированы ПИ-,

ПИД-, а также нечеткий ПИД-регуляторы скорости, который позволяет улучшить динамику работы электропривода стрелочного перевода как в штатных, так и нестационарных режимах.

Разработан макетный образец, в котором реализованы предложенные алгоритмы управления электроприводом стрелочного перевода моношпального типа, испытания которого показали возможность уменьшения времени перевода до 1 сек., а также, при необходимости, обеспечение без ударного довода остряка к рамному рельсу.

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный электропривод, электромеханическая система, система управления, автоколебательные процессы, нечеткий регулятор скорости.

**Masliy A.S Microprocessor switched-inductor sleeper type electric drive. -**  
On the manuscript.

Candidate of Technical Science's Thesis, Specialty 05.09.03 – Electromechanical complexes and systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2014.

Thesis is devoted to enhancing the functionality of the railway track switch by implementing switched-inductor electric. It concerns the identification of parameters and the four-phase switched-reluctance motor, the development of a mathematical model of the electric turnout considering elastic constraints and characteristics of the load using the drive as a switched-reluctance motor. To solve the problem of negative influence of self-oscillatory processes in the kinematic line, transition to turnouts sleeper type was justified. First time for switched-inductor drive, speed controller is synthesized based on fuzzy control. Herewith mathematical model and full-scale specimen turnout sleeper type were developed. All the proposed approaches and solutions serve the main purpose of work and promote the functionality of the turnout. Together, they make some contribution to the development of the theory of railway automation actuators.

*Keywords:* switched-inductor electric drive, electromechanical system, control system, oscillatory processes, fuzzy speed regulator.



Підписано до друку 22.09.2014 р. Формат паперу 60x90/16.  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 113

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
М. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354