

Міністерство освіти і науки України  
Національний гірничий університет

Мазур Руслан Анатолійович

УДК: 621.316.718:621.337.4

ПОЛІПШЕННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОМОТОРНОГО АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КОКСОВИХ МАШИН

05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі автоматизації і комп'ютерних систем Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
Соседка Вілій Лукич,  
доцент кафедри автоматизації і комп'ютерних систем  
Національного гірничого університету Міністерства  
освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Сінолиций Анатолій Пилипович,  
завідувач кафедри електропривода і автоматизації  
промислових установок Криворізького технічного  
університету Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук, доцент  
Казачковський Микола Миколайович,  
професор кафедри електропривода Національного  
гірничого університету Міністерства освіти і науки  
України (м. Дніпропетровськ).

Захист відбудеться „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному гірничому університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Автореферат розісланий „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, канд. техн. наук, доцент

О. О. Азюковський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Сьогодні в гірничо-металургійному комплексі України, враховуючи позанормативний термін експлуатації, необхідна модернізація понад 54% коксових батарей, включаючи машини і механізми, що їх обслуговують. До сучасних коксових машин висувається низка нових вимог: висока стабільність відтворення заданої тахограми при підвищенні продуктивності машин за рахунок одночасного зростання максимальної швидкості пересування і покращення точності керування на низьких «повзучих» швидкостях; забезпечення надійної цілорічної роботи в умовах високих температур, загазованості й запиленості при скороченні часу на обслуговування і ремонт, зменшенні масогабаритних показників.

Цим вимогам найбільш повно відповідає реалізація електричної частини тягового привода механізму пересування коксової машини (МПКМ) на базі безконтактної апаратури перетворення енергії і керування, індивідуального привода коліс від асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором (АКЗ). Система автоматичного керування (САК) такого привода повинна компенсувати негативний вплив на якість керування МПКМ нестаціонарність умов зчеплення ходових коліс з рейками, яка викликана низькою якістю рейкового шляху, впливом вітрового навантаження, зміною центру мас металоконструкції коксової машини через виконання сумісних в часі технологічних операцій.

Синтез САК такого електропривода ускладнений, що обумовлено як різноманіттям структур багатомоторного тягового електропривода (ТЕП), так і традиційним зведенням сил і моментів рівнянь тягового балансу до центру мас коксової машини, відсутністю врахування несиметрії тягових і дисипативних сил у відомих описах МПКМ, як об'єкта керування.

Багато питань щодо покращення якості керування розглянуто в роботах, що присвячені локомотивному ТЕП рейкового транспорту. Але положення даних робіт складно застосувати до багатомоторного електропривода МПКМ, оскільки вони справедливі для тягового привода, рушієм якого є колісні пари, базуються на припущенні, що ходові колеса пар за рахунок збільшеної, порівняно з коксовими машинами, зчіпної маси та ефективної роботи протибуксовочних систем котяться у сталому режимі, тягові сили не перевищують граничні сили зчеплення, не враховуються такі особливості МПКМ як індивідуальний привід коліс від АКЗ, кількість яких залежить від типу машини і може варіюватися у межах від 4 до 12, нестаціонарність умов зчеплення.

Через розрив між теоретичними положеннями та практичною реалізацією коксових машин, спроектованих 20-30 років тому, і новими напрямками у теорії автоматичного керування і електропривода, прогресом в області комп'ютерних технологій, розвитком напівпровідникової елементної бази, актуальним є питання поліпшення регулювальних та енергетичних характеристик багатомоторного асинхронного електропривода у відповідності до сучасних технологічних вимог до керованості, економічності й надійності МПКМ.

*Наукова задача* дисертаційної роботи полягає у встановленні закономір-

ностей взаємодії елементів багатозв'язної електромеханічної системи механізму пересування коксової машини з індивідуальним приводом коліс, що дозволяє нормалізувати зчеплення ведучих коліс з рейковим шляхом, підвищити точність відпрацювання керуючого впливу електропривода на низьких швидкостях, знизити енерговитрати у тягових асинхронних електродвигунах (ТАД). Розв'язання цієї задачі дозволить інтегрувати коксові машини до складу системи керування технологічним процесом, що забезпечує автоматичну роботу і регулювання технологічних параметрів коксових печей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації виконувалися на кафедрі автоматизації і комп'ютерних систем Національного гірничого університету відповідно до Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу до 2011 року (постанова Кабінету Міністрів № 967 від 28 липня 2004 р.) і планами науково-дослідницької роботи Національного гірничого університету за темою ГП326 «Розробка моделей і алгоритмів керування вантажопотоків гірничих підприємств» (№ держреєстрації 0103U001297).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є покращення продуктивності при підвищенні точності керування, надійності та безпеки, енергетичної ефективності коксової машини за рахунок синтезу системи автоматичного керування багатомоторного асинхронного електропривода механізму пересування, який враховує збурюючий вплив умов зчеплення ведучих коліс з рейками.

Для досягнення мети у дисертації поставлені й вирішені такі задачі:

- дослідження електромеханічної взаємодії елементів МПКМ і розвиток його математичного опису як об'єкта керування, що змінює свою структуру залежно від умов зчеплення, створення математичної моделі багатозв'язної електромеханічної системи МПКМ;
- дослідження на математичній моделі динамічних режимів взаємозв'язаних електроприводів механізму пересування з метою обґрунтування структури системи автоматичного керування, що найповніше відповідає вимогам технології;
- розробка алгоритму керування силовими ключами напівпровідникового перетворювача частоти, який підвищує точність керування на низьких швидкостях і дозволяє діагностувати режим зчеплення ведучих коліс з рейковою колією без використання датчиків, що механічно з'єднані з тяговими двигунами або колесами;
- розробка алгоритму, що забезпечує зменшення енерговитрат у тяговому АКЗ в умовах неповної інформації про можливі зміни умов зчеплення;
- розробка методики синтезу САК і визначення алгоритму функціонування окремих блоків електропривода через його реалізацію засобами мікропроцесорної техніки.

**Об'єкт дослідження** – процеси електромеханічної взаємодії елементів багатозв'язної системи механізму пересування рейкового типу (на прикладі ко-

ксової машини).

**Предмет дослідження** – закони керування асинхронним частотним електроприводом механізму пересування рейкового типу з індивідуальним приводом коліс з урахуванням зміни умов зчеплення.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань застосовувалися аналіз і узагальнення відомих за літературними джерелами способів керування механізмом пересування рейкового типу – під час вибору напряму досліджень, обґрунтування структурного синтезу системи керування; загальні методи теорії керування (операторний метод, методи простору станів, теорії узагальненого вектора, цифрової обробки сигналів) - при математичному описі механізму пересування як об'єкту керування, визначенні структури і параметрів функціональних блоків САК; метод імітаційного моделювання - для перевірки роботи, як окремих блоків, так і синтезованої системи в цілому на відповідність теоретичним положенням.

#### **Наукові положення**

1. Динамічний зв'язок змінних багатомоторної електромеханічної системи коксової машини «рейки – ведучі колеса – тягові асинхронні електродвигуни» враховується диференціальними рівняннями двигунів у нерухомій відносно статора системі координат, в яких глибина перехресних зв'язків приймається пропорційною лінійній швидкості механізму пересування за умови нормального зчеплення, або лінійній швидкості колеса, яке пов'язане з даним електродвигуном, якщо тягова сила перевищує силу критичного зчеплення, що враховує нестационарність умов зчеплення та забезпечує підвищення точності керування лінійною швидкістю механізму пересування.

2. Нелінійне обмеження модуля потокозчеплення ротора, що враховує частоту напруги живлення та величину моментоутворюючої складової струму статора, забезпечує підтримку екстремального (максимального) значення квадрата відношення корисної потужності до повної, яка споживається з мережі, що дозволяє зменшити енерговитрати тягового асинхронного електропривода.

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Отримані математичні залежності, які обумовлюють поведінку нестационарної багатозв'язної електромеханічної системи багатомоторного механізму пересування коксової машини, що вперше дозволило врахувати одночасний вплив на якість керування нестационарність зміни коефіцієнтів зчеплення ведучих коліс з рейками, несиметрію тягових сил.

2. Встановлено, що порушення умов зчеплення ведучого колеса призводить до зміни комплексного коефіцієнта передачі у каналах моменто- і потокоутворюючої складових струму статора тягового асинхронного електродвигуна. Це діагностується за фактично вимірною лінійною швидкістю машини і швидкістю обертання ротора двигуна, яка обчислюється непрямим способом за рекурентним алгоритмом, вхідними змінними якого є миттєві значення фазних струмів і напруг тягового електродвигуна, що дозволяє відмовитись від електромеханічних датчиків, які з'єднані з колесами.

3. Встановлена аналітична залежність тривалості керуючих імпульсів просторової широтно-імпульсної модуляції від завдання на амплітуду і фазу узагальненого вектора напруги, яка, на відміну від відомих, забезпечує зниження коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги живлення двигуна за рахунок зменшення на періоді модуляції ділянки з нульовою напругою до зчетвереної тривалості «мертвої зони», яка визначається комутаційними властивостями силових напівпровідників, що дозволяє знизити нерівномірність обертання ротора тягового асинхронного електродвигуна під час пересування коксової машини на малих швидкостях.

4. Отримана залежність модуля потокозчеплення ротора від частоти напруги живлення статора і величини моментотворюючої складової струму статора тягового асинхронного двигуна, яка дозволяє зменшити його енерговитрати.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Розроблена векторно-матрична математична модель нестационарної електромеханічної системи механізму пересування коксової машини з індивідуальним приводом коліс, яка враховує умови зчеплення з рейками ведучих коліс. Це дозволяє скоротити час на дослідження електромеханічних процесів, сформулювати технічні вимоги до електропривода механізму пересування, розробити рекомендації з покращення умов його роботи.

Розроблена функціональна схема складової системи автоматичного керування електропривода дозволяє ідентифікувати умови зчеплення колеса за вимірюваною лінійною швидкістю машини, сигналами датчиків фазних струмів, тривалістю керуючих імпульсів автономного інвертора напруги асинхронного тягового електропривода.

Обґрунтовані технічні вимоги до окремих функціональних блоків та розроблений мікропроцесорний пристрій, що реалізує алгоритм двополярної просторової широтно-імпульсної модуляції.

Запропонована схемно-технічна реалізація блока нелінійного регулювання модуля потокозчеплення ротора залежно від величини завдання на швидкість пересування коксової машини, що дозволяє зменшити енергоспоживання на низьких швидкостях.

Для багатомоторного асинхронного електропривода МПКМ розроблені функціональні схеми і методика синтезу дискретної САК, яка характеризується єдністю алгоритмів роботи регуляторів, що дозволяє скоротити час пусконаладжувальних і сервісних робіт.

Отримана програмна модель дискретного стаціонарного регулятора з керованим обмеженням вихідної координати, що характеризується простотою реалізації, не вимагає потужних обчислювальних пристроїв і яку можливо застосовувати в системах керування різними об'єктами.

У галузі освіти отримані результати використовуються для покращення змісту учбових дисциплін «Сучасна теорія управління» і «Комп'ютерне моделювання процесів і систем» на кафедрі автоматизації та комп'ютерних систем

Національного гірничого університету.

*Ступінь готовності практичних результатів.* Результати роботи у вигляді математичної моделі, методики синтезу САК багатомоторного електропривода механізму пересування, дискретного керуючого пристрою впроваджено в діяльності ВАТ «Інтерпайп-НТЗ» (м. Дніпропетровськ), ДВТП «Укрчормета-автоматика» (м. Дніпропетровськ), ТОВ «Укрелектроремонт» (м. Дніпродзержинськ) під час виконання дослідницьких, проектних і пусконаладжувальних робіт з модернізації електроприводів механізмів пересування гільзових візків ТПЦ-4 ВАТ «Інтерпайп-НТЗ», вулканізатора 200” ТОВ «УЗ СКГШ» (м. Дніпропетровськ), коксовиштовхувачів ВАТ «Дніпродзержинський коксохімічний завод», що підтверджено відповідними актами впровадження.

**Достовірність** отриманих у роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується положеннями теорії автоматичного керування та електромеханічного перетворення енергії, коректністю застосованого математичного апарату, відповідністю даних теоретичних розрахунків, математичного моделювання і експериментальних досліджень, позитивними результатами, отриманими від впровадження роботи в промисловість, апробацією наукових положень і висновків на науково-практичних конференціях.

**Апробація результатів.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології у сфері освіти, науки та виробництва» (м. Дніпропетровськ, 2006, 2007), «Інтегровані системи управління в гірничо-металургійному комплексі» (ІСУГМК-2006, р. Кривий Ріг), науково-технічних семінарах кафедри автоматизації і комп'ютерних систем Національного гірничого університету.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковані 14 праць, серед яких: 7 статей у виданнях, що входять до переліку фахових наукових видань України, 1 деклараційний патент на винахід, 3 - матеріали конференцій, 3 – інші видання.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 191 сторінці основного тексту та складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел (172 найменування на 17 сторінках), п'яти додатків на 51 сторінці.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і основні завдання дослідження, наведені загальна характеристика роботи і основні положення, що виносяться на захист.

**У першому розділі** виконано аналіз принципів побудови і методів дослідження електропривода МПКМ, способів формування напруги машин змінного струму, шляхів підвищення економічності асинхронного ТЕП за матеріалами вітчизняної і зарубіжної науково-технічної і патентної літератури. Коксові машини, тяговий електропривод, процеси взаємодії колеса з рейкою, асинхронний частотно-керований електропривод, широтно-імпульсна модуляція напруги розглядаються в роботах Г.Г. Півняка, А.М. Бабицькова, О.С. Бешти, Ф. Блашке, О.О. Булгакова, О.В. Волкова, О.І. Вольдека, О.Л. Голубенко, Ю.М. Гусяцько-

го, Л. Джюджи, І.І. Епштейна, Ю.С. Забродина, В.І. Калашникова, В.Б. Клепікова, М.М. Казачковського, М.П. Костенко, І.Л. Непомнящего, Ф. Паліса, Б. Пелі, В.В. Рудакова, О.В. Садового, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатова, А.П. Сіноліцего, В.Д. Тулупова, Р.Т. Шрейнера та інших вітчизняних і закордонних вчених. У результаті аналізу наведено загальну оцінку стану досліджуваних питань, сформульовані мета і задачі дослідження дисертаційної роботи.

У другому розділі виконано математичний опис МПКМ з індивідуальним приводом ведучих коліс від АКЗ як об'єкта керування, досліджено варіанти реалізації скалярних і векторних багатомоторних асинхронних ТЕП.

Запропоновано представити рівняння, що описують взаємодію і-го ведучого колеса з рейкою, у векторно-матричній формі зі змінною структурою

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_{Ki}}{dt} \\ F_{Ti} \end{bmatrix} = A_i \times \begin{bmatrix} M_{Ki} \\ k_{Ri} Q_0 \\ \frac{dv_0}{dt} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $v_{Ki}$  – лінійна швидкість колеса;  $F_{Ti}$  – тягова сила, що прикладається до машини з боку колеса;  $M_{Ki}$  – момент, що передається колесу від двигуна;  $k_{Ri} = zR_{Zi} / Q_0$  – коефіцієнт динамічного перерозподілу навантажень;  $R_{Zi}$  – нормальна реакції рейкового шляху і-го колеса;  $z = n+k$  – сумарна кількість коліс;  $n$  – кількість ведучих коліс;  $k$  – кількість ведених коліс;  $Q_0$  – нормальна складова ваги коксової машини;  $v_0$  – лінійна швидкість машини;

$$A_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{r_{Ki}} & -\frac{c}{r_{Ki}}(f + \mu r_C) & -\frac{J_i}{r_{Ki}^2} \end{bmatrix}, \text{ якщо } (M_{Ki} \leq M_{K \max}) \wedge (s_{\delta i} \leq s_{\delta \max}); \\ \begin{bmatrix} \frac{r_{Ki}}{J_i} & -\frac{r_{Ki}}{J_i}(\varphi r_{Ki} + c(f + \mu r_C)) & 0 \\ 0 & \varphi & 0 \end{bmatrix}, \text{ інакше.} \end{cases}$$

матриця, що змінює структуру залежно від умов зчеплення;  $r_{Ki}$  – радіус і-го ходового колеса;  $c$  – коефіцієнт, що враховує нерівності шляху;  $f_i$  – коефіцієнт опору коченню колеса;  $\mu_i$  – коефіцієнт тертя кочення підшипників осі колеса;  $r_{Ci}$  – радіус цапфи ходового колеса;  $J_i$  – момент інерції колеса;  $\varphi$  – коефіцієнт зчеплення опорної поверхні рейки з колесом;

$M_{K \max i} = (\varphi r_{Ki} + c(f_i + \mu_i r_{Ci}))R_{Zi} + \frac{J_i}{r_{Ki}} \frac{dv_{Ki}}{dt}$  – максимальне значення моменту, що може бути реалізований ведучим колесом за умовами зчеплення;

$$s_{\delta i} = \begin{cases} \frac{v_{Ki} - v_0}{v_{Ki}}, \text{ якщо } v_{Ki} > v_0; \\ \frac{v_0 - v_{Ki}}{v_0}, \text{ інакше.} \end{cases} \quad \text{- коефіцієнт ковзання, що визначає умови зчеплення}$$

колеса з рейкою;  $s_{\delta \max}$  – критичний коефіцієнт ковзання (для коксових машин



$s_{\delta_{\max}} = 0.1 \dots 0.15$ ).

Обчислена за (1) результуюча подовжніх тягових зусиль ведучих коліс  $\sum_{i=1}^n F_{Ti}$  за вирахуванням сил опору руху ведених коліс  $k_{Ri} Q_0 \sum_{i=1}^k c \frac{f + \mu r_{Ci}}{r_{Ki}}$  і тиску вітру  $S_0 p_B$ , забезпечує рух коксової машини

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{\delta_{02} m_0} \left( \sum_{i=1}^n F_{Ti} - S_0 p_B - Q_0 \text{sign}(v_0) \sum_{i=1}^k c \frac{f + \mu r_{Ci}}{r_{Ki}} k_{Ri} \right), \quad (2)$$

де  $\delta_{02} = 1 + \sum_{i=1}^k J_i / m_0 r_{Ki}^2$  - коефіцієнт врахування обертаючих мас ведених коліс;  $S_0$  – підвітряна площа бічної поверхні коксової машини;  $p_B$  – тиск вітру.

Математичне представлення механічної частини механізму пересування у вигляді (1-2) дозволяє досліджувати збуджуючі чинники, що безпосередньо впливають на якість керування: нерівномірність розподілу тягових зусиль між ведучими колесами, масово-геометричні властивості, динамічну зміну коефіцієнтів зчеплення ходових коліс з рейками. Необхідне значення окружного моменту  $M_K$  тягового АКЗ визначається відомими рівняннями Парка-Горєва. Структура моделі МПКМ, що дозволяє провести комплексне дослідження з урахуванням динамічних процесів в об'єкті керування наведена на рис.1, де  $U_{11} - U_{1n}$  – миттєві значення напруги живлення ТАД.

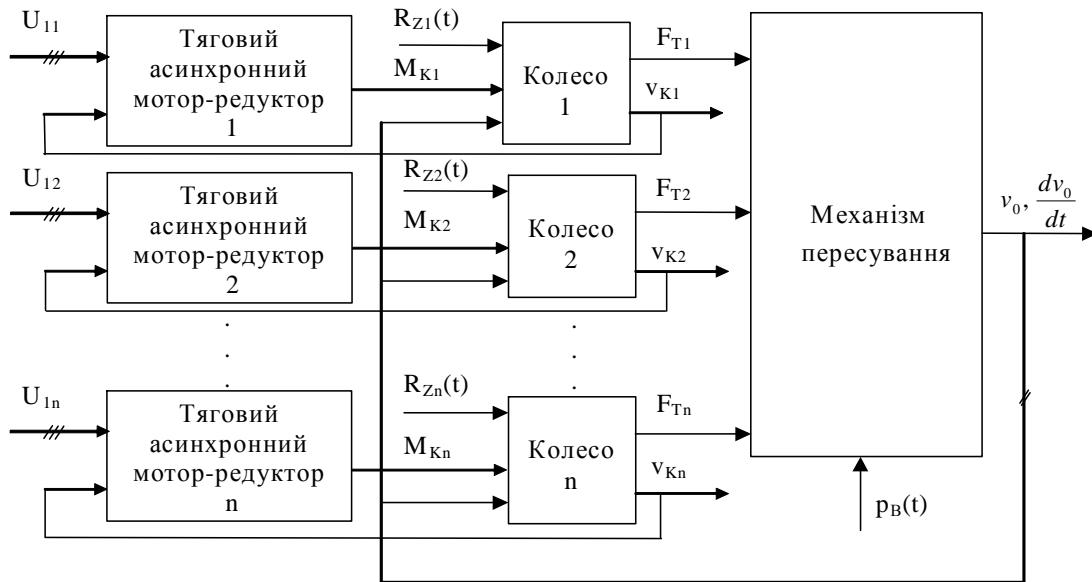


Рис.1. Модель механізму пересування коксової машини

На розробленій моделі досліджені структури багатомоторного асинхронного ТЕП з груповими й індивідуальними перетворювачами, скалярним і векторним керуванням. У результаті досліджень встановлено, що найповніше до технологічних вимог відповідає замкнена за лінійною швидкістю система керування із безпосереднім регулюванням електромагнітних моментів в залежності від режиму зчеплення коліс, що наведено на рис.2.

Потрібне під час розрахунку  $s_{\delta}$  значення лінійної швидкості ведучого колеса пропонується обчислювати непрямым чином за рекурентною формулою

$$v_{kj} = \frac{r_k}{i_R} \omega_{kj} = \frac{r_k}{i_R p_p} (\omega_{2j} - \beta_j), \quad (3)$$

де  $j$  – шаг квантування;  $i_R$  – коефіцієнт механічної передачі;  $p_p$  – кількість пар полюсів ТАД;  $\omega_{2j} = \frac{1}{T_{df}} \left[ \arctg \frac{\Psi_{2yj}}{\Psi_{2xj}} - \arctg \frac{\Psi_{2y,j-1}}{\Psi_{2x,j-1}} + (T_{df} - T_s) \omega_{2,j-1} \right]$  – кругова

швидкість поля ротору;  $\beta_j = L_0 \frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{I_{1yj} \Psi_{2xj} - I_{1xj} \Psi_{2yj}}{\Psi_{2xj}^2 + \Psi_{2yj}^2}$  – ковзання ротору;

$\Psi_{2xyj} = \Psi_{2xy,j-1} + \frac{L_2}{L_0} \left[ (U_{1xy,j-1} - I_{1xy,j-1} R_1) T_s + \frac{L_1 L_2 - L_0^2}{L_0} (I_{1xyj} - I_{1xy,j-1}) \right]$  – проекції

вектора потокозчеплення ротора на осі нерухомої, щодо статора, системи координат;  $U_{1xy}$ ,  $I_{1xy}$  – проекції узагальнених векторів, відповідно, напруги і струму статора на осі нерухомої системи;  $T_s$  – період дискретного перетворювання;  $T_{df}$  – постійна часу фільтра високих частот;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_0$  – власні індуктивності статора, ротора і взаємна між ними;  $R_1$ ,  $R_2$  – активні опори кіл статора і ротора.

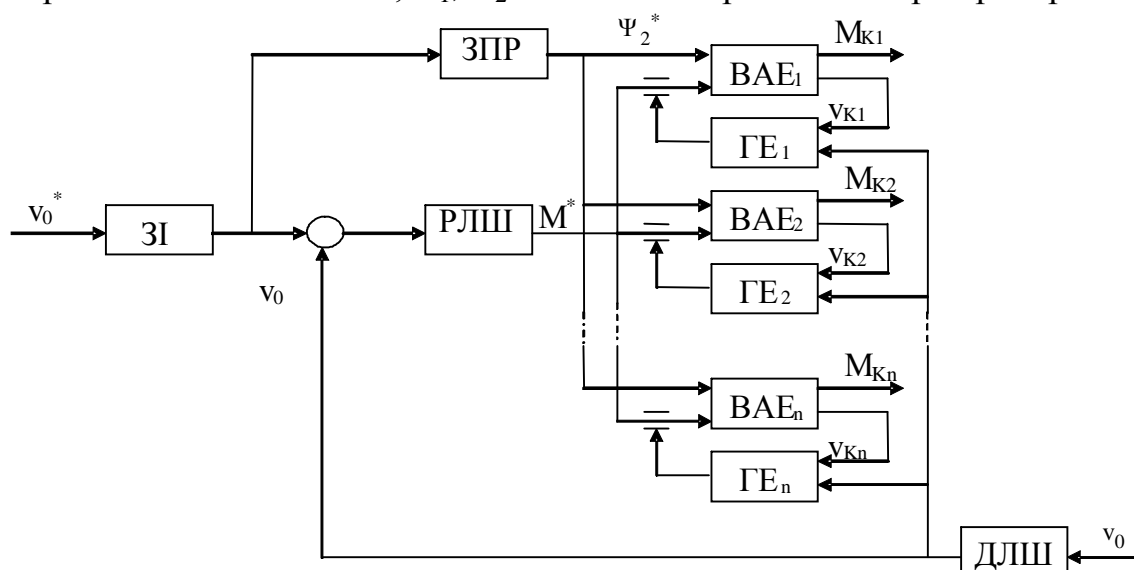


Рис.2. Структура замкненої САК лінійної швидкості коксової машини:

ЗІ – задавальник інтенсивності; ЗПР – блок, що формує завдання на модуль потокозчеплення ротора; РЛШ – регулятор лінійної швидкості машини; ДЛШ – датчик лінійної швидкості; ВАЕ – асинхронний електропривод з векторним керуванням; ГЕ – граничний елемент, що обмежує завдання на момент тягового електропривода  $M^*$  в залежності від умов зчеплення, які визначаються величиною коефіцієнта ковзання  $s_\delta$ ;  $v_0^*$  – завдання на лінійну швидкість МПКМ;  $\Psi_2^*$  – завдання на модуль потокозчеплення ротора

Експериментальне дослідження непрямого методу, що базується на (3), підтвердило його високу точність: запізнення у визначенні моменту втрати зчеплення ведучого колеса з рейкою не перевищує 1мс.

У третьому розділі розроблено алгоритм двополярної просторової широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який, за рахунок зниження коефіцієнта спо-

творення синусоїдальності кривої напруги, що модулюється автономним інвертором, забезпечує зниження нерівномірності обертання ротора ТАД під час роботи на низьких «повзучих» швидкостях. Тривалість керуючих імпульсів ШІМ пропонується розраховувати за формулами

$$\begin{cases} t_1 = \frac{T}{4} + \frac{VT}{8U_d} (9\cos(\varphi) - 5\sqrt{3}\sin(\varphi)) - t_{dz}; \\ t_2 = \frac{T}{4} + \frac{VT}{8U_d} (7\sqrt{3}\sin(\varphi) - 3\cos(\varphi)) - t_{dz}; \\ t_4 = t_5 = \frac{T}{4} - \frac{VT}{8U_d} (\sqrt{3}\sin(\varphi) + 3\cos(\varphi)) - t_{dz}. \end{cases} \quad (4)$$

У формулі (4):  $V$ ,  $\varphi$  – значення амплітуди і фази узагальненого вектора напруги, що формується;  $U_d$  – напруга на виході ланки постійного струму автономного інвертора напруги (АІН);  $T$  – період модуляції;  $t_1$  і  $t_2$  – тривалості замкненого стану комбінацій силових ключів інвертора, що забезпечують розташування узагальненого вектора в кратних куту  $\pi/3$  базових положеннях, які співпадають з осями фаз та є найближчими до вектора, що зрушений на заданий кут  $\varphi$ ;  $t_4$  і  $t_5$  – тривалість замкненого стану комбінацій силових ключів інвертора, що забезпечують розташування узагальненого вектора у протифазних до інтервалів  $t_1$  і  $t_2$  положеннях;  $t_{dz}$  – тривалість «мертвої» зони, яка визначається комутаційними характеристиками силового напівпровідника. Амплітуда узагальненого вектора, що формується за [4], обмежується рівнем  $V \leq (1 - 4\gamma_{\min})U_d / \sqrt{3}$ , де  $\gamma_{\min} = t_{\min} / T$  – відносна тривалість мінімально можливого стану  $t_{\min}$ , при якому обмотки ТАД підключені до джерела (визначається комутаційними властивостями силового напівпровідника).

Дослідження розробленої ШІМ на математичній і фізичній моделях продемонстрували, що вона забезпечує зниження коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги до 6% при глибині модуляції 0.05, що більш ніж в 2 рази менше, порівняно з відомою однополярною просторовою ШІМ. Це дозволяє непрямым чином без вимірювання фазної напруги ідентифікувати просторове положення вектора потокозчеплення ротора та визначати умови зчеплення ведучого колеса з рейкою.

**У четвертому розділі** здійснено параметричний синтез САК лінійної швидкості коксової машини, що відрізняється єдністю структури регуляторів всіх контурів; наведено методику розрахунку параметрів регуляторів, що синтезовані класичними частотними і модальними методами; розроблено простий у програмній реалізації стаціонарний дискретний регулятор зі змінною структурою і обмеженням вихідної координати; запропоновано алгоритм регулювання величини потокозчеплення ротора залежно від завдання на лінійну швидкість механізму пересування, який зменшує енерговитрати в ТАД; розроблено імітаційну модель САК електропривода, досліджено її функціонування в умовах зміни зчеплення ведучих коліс з рейковим шляхом.

Методами простору стану отримано перехідні характеристики каналу

«завдання на вихідну напругу АІН - струм статора» і аналітична залежність, що пов'язує кругову несучу частоту ШІМ  $\omega_{PWM}$  з кратністю струму статора  $i_1$ , що досягається за час першого узгодження  $4.71/\omega_{PWM}$

$$i_1(\omega_{PWM}) = 2U_d / (3R_1 I_{1H}) (1 - T_{12} \omega_{PWM} / (T_{12} \omega_{PWM} - 1)) e^{-\frac{4.71}{T_{12} \omega_{PWM}}} + e^{-4.71} / (T_{12} \omega_{PWM} - 1),$$
 де  $I_{1H}$  – номінальний струм статора;  $T_{12} = (L_1 L_2 - L_0^2) / (L_2 R_1)$  – перехідна постійна часу кола статора;  $\omega_{PWM}$  – кругова несуча частота ШІМ.

Виконані для двигунів середньої потужності серії МТКН розрахунки продемонстрували, що підтримка несучої частоти ШІМ на рівні, що не перевищує 4 кГц, забезпечує перевантажувальну спроможність до 200% в той час, як перетворювач працює у лінійній зоні, а постійна часу, що не компенсується, обирається за частотою сполучення області високих частот логарифмічної частотної характеристики розімкненого контура і перетворювача частоти.

САК, для якісного порівняння перехідних характеристик, синтезувалися двома методами: класичним частотним та застосовуючи модальний регулятор внутрішнього контура, що продемонстровано на рис.3.

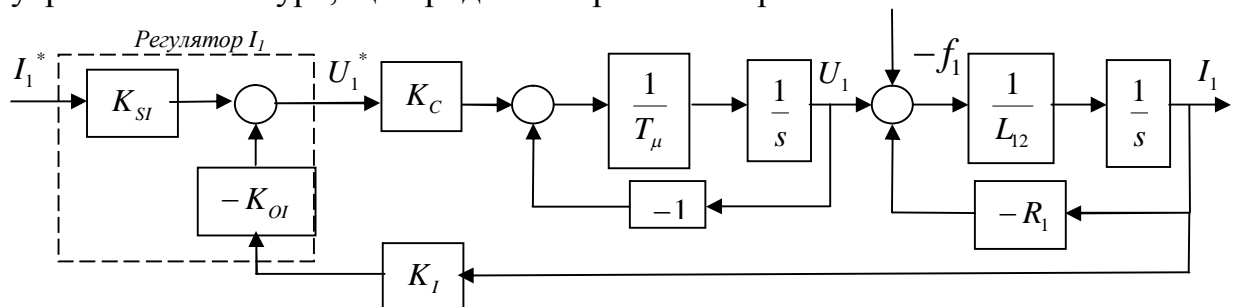


Рис.3. Деталізована структурна схема з регулятором стану:

$I_1^*$  і  $I_1$  – задане і фактичне значення складової струму статора;  $U_1^*$  і  $U_1$  – задане і фактичне значення складової напруги АІН;  $K_C$ ,  $T_\mu$  – коефіцієнт підсилення і постійна часу АІН;  $K_I$  – коефіцієнт нормалізації сигналу зворотного зв'язку;  $K_{Ol}$  і  $K_{SI}$  – коефіцієнти підсилення каналів керування і зворотного зв'язку модального регулятора;  $f_1$  – збурюючий вплив, що враховує дію перехресних зворотних зв'язків і, для контура регулювання потокоутворюючої складової - швидкість зміни модуля потокозчеплення

При значеннях коефіцієнтів модального регулятора схеми (рис.3)

$$K_{Ol} = \frac{(T_{12} - T_\mu)^2 R_1}{4K_I K_C T_{12} T_\mu} \quad \text{і} \quad K_{SI} = \frac{R_1 (T_{12} + T_\mu)^2}{4K_C K_I T_{12} T_\mu}$$
 передавальна функція замкненого контура

керування приймає стандартний вигляд фільтра Ньютона, програмна реалізація регулятора внутрішнього контура спрощується, а його параметричний синтез зводиться до варіації значень коефіцієнтів  $K_{SI}$  і  $K_{Ol}$ , які забезпечують бажану якість, що досить просто формалізується.

Для запропонованої САК, з метою забезпечення єдності структури коректувальних пристроїв, через заміну структурної схеми безперервного регулятора дискретним еквівалентом в змінних стану, отримані різниці співвідношення

$$\begin{cases} x_j = y_{j-1} + (K_I T_s + K_{II})u_j - K_{II}u_{j-1}; \\ y_j = \begin{cases} x_j, \text{ якщо } |x_j| < y_{\max}; \\ \text{sign}(x_j) \cdot y_{\max}, \text{ інакше,} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

де  $u$ ,  $y$ ,  $x$  – відповідно вхідна, вихідна та внутрішня змінні;  $K_{II}$ ,  $K_I$  – коефіцієнти пропорційної та інтегрувальної ланок;  $y_{\max}$  – обмеження вихідної величини.

Рівнянням (5) відповідає проста у програмній реалізації модель. Трирічний досвід промислової експлуатації керуючих пристроїв із дискретними регуляторами, реалізованими за (5), продемонстрував їх високу надійність при повному забезпеченні заданих показників якості.

З метою оптимізації використання ТАД за енергоспоживанням, розроблено алгоритм регулювання потокозчеплення ротора залежно від завдання на лінійну швидкість механізму пересування. Алгоритм ґрунтується на отриманій за «Т» - образною схемою заміщення аналітичній залежності квадрата відношення корисної потужності до повної, що споживається з мережі, від модуля потокозчеплення ротора, частоти живлячої напруги і модуля моментотворюючої складової струму статора

$$\xi = \left( \frac{P_2}{S_1} \right)^2, \quad (6)$$

де  $P_2 = 3\omega_1 k_2 I_{1Y} \Psi_2$  - корисна потужність;  $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$  - повна потужність,

що споживається з мережі;  $P_1 = 3R_1 \frac{\Psi_2^2 - k_2^2 R_2^2 T_2^2 I_{1Y}^2 - \omega_1 (1 + \sigma) k_2 R_2 T_1 T_2 I_{1Y} \Psi_2}{k_2^2 R_2^2 T_2^2}$

і  $Q_1 = 3R_1 T_1 \frac{\omega_1 \Psi_2^2 - \omega_1 \sigma k_2^2 R_2^2 T_2^2 I_{1Y}^2 + 2k_1 R_1 I_{1Y} \Psi_2}{k_2^2 R_2^2 T_2^2}$  - активна та реактивна скла-

дові повної потужності, відповідно;  $\omega_1$  - кутова частота напруги живлення;  $k_1 = L_0 / L_1$  та  $k_2 = L_0 / L_2$  - безрозмірні коефіцієнти;  $T_1 = L_1 / R_1$  та  $T_2 = L_2 / R_2$  - електромагнітні постійні часу кіл статора і ротора, відповідно;  $\sigma = 1 - k_1 k_2$  - коефіцієнт розсіювання. Приклад графіків залежностей  $\xi = f(\omega_1, I_{1Y}, \Psi_2)$ , що побудовані за формулою (6) для двигуна 4МТКМ200LA6, представлені на рис.4. Подібні характеристики отримані для інших двигунів серії МТК потужністю від 7.5 до 55 кВт.

Аналіз графіків (рис.4) показує, що функціонал (6) має екстремальний максимум, який відповідає певному значенню магнітного потоку  $\Psi_2$ . Причому, значення  $\Psi_2$ , що відповідають точкам локального екстремуму прямо пропорційні моментотворюючій складовій струму статора  $I_{1Y}$  і нелінійно зменшуються із зростанням частоти напруги живлення  $\omega_1$ .

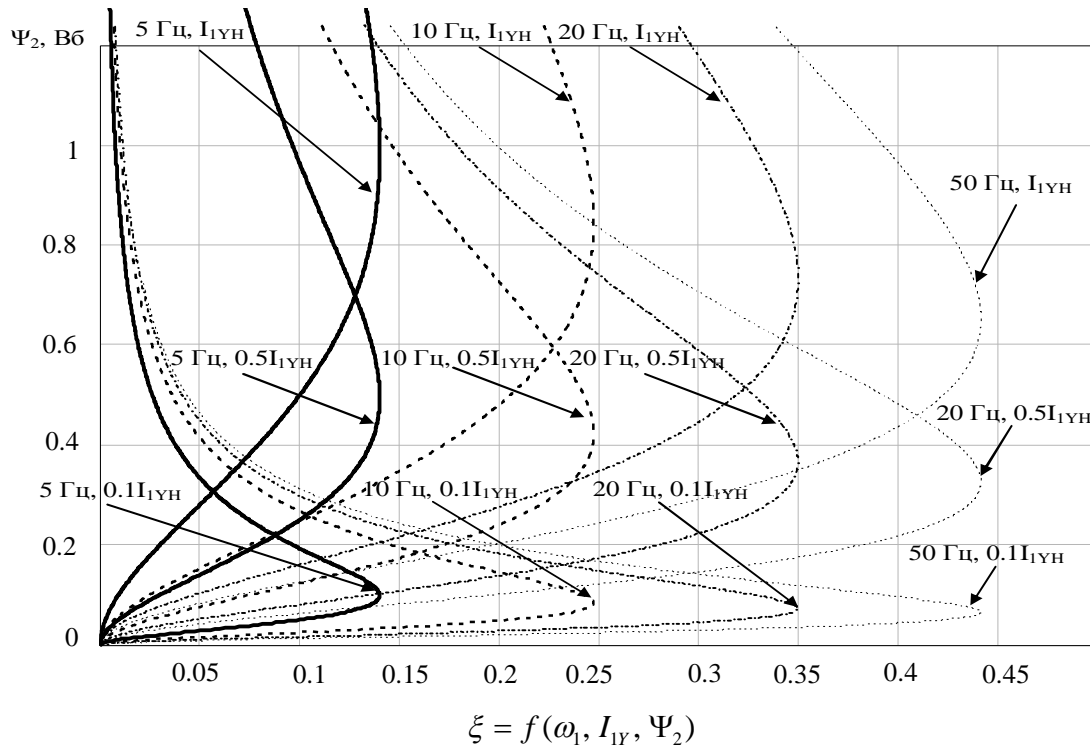


Рис.4. Залежності  $\xi = f(\omega_1, I_{1Y}, \Psi_2)$

У результаті дослідження (6) отриманий вираз, що, за рахунок регулювання модуля потокозчеплення ротора  $\Psi_{2OPT}$ , залежно від значень моментотворюючої складової струму статора, конструктивних параметрів двигуна і, зв'язаної з лінійною швидкістю МПКМ, частоти напруги живлення, забезпечує оптимальне використання двигуна за потужністю

$$\Psi_{2OPT} = \frac{b_0^2 - 2a_1b_0 + 4a_1^2}{6a_0b_0} I_{1Y}, \quad (7)$$

де коефіцієнти  $a_0 = R_1(1 + \omega_1^2 T_1^2)$ ;  $a_1 = \omega_1 k_2^3 R_2^2 T_2^2$ ;  $a_2 = \omega_1 k_2^5 R_1 R_2^3 T_2^4$ ;  $b_0 = \sqrt[3]{108 a_0^2 a_2 - 8 a_1^3 + 12 a_0 \sqrt{3 a_2 (27 a_0^2 - 4 a_1^3)}}$ .

Оскільки САК лінійної швидкості коксової машини з індивідуальним приводом ведучих коліс є складною нестационарною багатозв'язною системою, що складається з лінійних і нелінійних блоків, які працюють як в безперервному, так і в дискретному часі, перевірка висунутих теоретичних положень, оцінка якості перехідних процесів, уточнення вимог до швидкодії і алгоритму функціонування окремих блоків виконані через імітаційне моделювання.

Результати моделювання САК лінійної швидкості коксової машини на прикладі відробки "короткого" циклу (переїзд у межах 7 м) дверізімною машиною вагою 180 т з приводом 4-х ведучих коліс від АКЗ із урахуванням зміни умов зчеплення і впливу вітрового навантаження представлені на рис.5: а - результуюча подовжня сила; б - подовжня сила, що передається до рами машини від одного з ведучих коліс; в - лінійна швидкість машини; г - лінійна швидкість ведучого колеса; д - модуль потокозчеплення ротора (у відносних одиницях до номінального); е - споживання електроенергії тяговим АКЗ одного з ведучих коліс. Представлені на рис.5 д), е) енергетичні процеси досліджувались як за

підтримки потокозчеплення ротора на номінальному рівні (пунктирна лінія), так і враховуючи його зміну за формулою (7) (безперервна лінія).

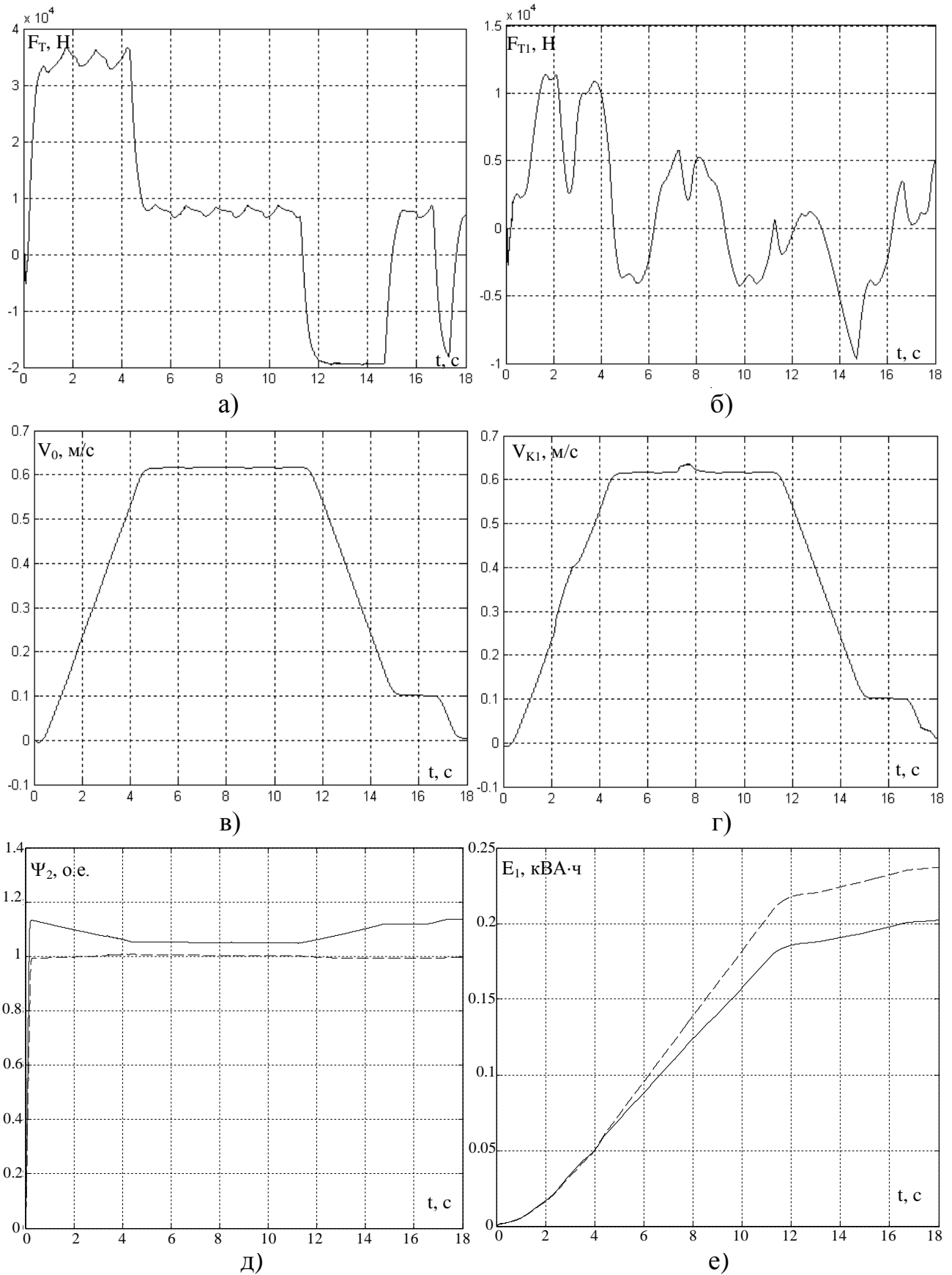


Рис.5. Результати моделювання відпрацювання «короткого» циклу механізмом пересування дверізнімної машини

Аналіз результатів моделювання демонструє відповідність показників якості САК заданим, помилка регулювання не перевищує 0.5%. У межах “короткого” циклу економія електроенергії, за рахунок вищого ступеня використання ТАД за потужністю, досягає 15%. Необхідне для цього перезбудження не приводить до насичення магнітного кола, оскільки стандартні електричні машини допускають регулювання поточозчеплення до 1.2-1.35 від номінального значення. Одночасно, із збільшенням лінійної швидкості, ефективність методу за формулою (7) зменшується, оскільки швидкість ТАД а, отже, і частота живлячої напруги наближаються до номінальних паспортних даних двигунів.

### ВИСНОВКИ

У дисертації, що є завершеною дослідницькою роботою, розв’язана важлива наукова задача синтезу керуючих впливів багатомоторного асинхронного електропривода МПКМ, які, за рахунок врахування нестационарності коефіцієнтів зчеплення ведучих коліс з рейками, використання двополярної просторової ШІМ напруги живлення та нелінійного регулювання модуля поточозчеплення ротора тягових двигунів, забезпечують підвищення точності керування лінійною швидкістю коксової машини при одночасному покращенні рівномірності її пересування на малих швидкостях та зменшенні енерговитрат в тягових асинхронних електродвигунах. При розв’язанні задачі отримані наступні результати:

1. Розроблено математичний опис багатомоторного механізму пересування коксової машини у вигляді нестационарної динамічної векторно-матричної моделі зі змінною структурою. Таке описування об’єкта керування, на відміну від відомих, дає можливість врахувати зміну умов зчеплення ведучих коліс з рейками, особливості кінематичної схеми механізму пересування, його масово-геометричні та механічні параметри.

2. Виконані дослідження динамічних режимів взаємозв’язаних електроприводів багатомоторного МПКМ продемонстрували, що обов’язковою умовою підвищення продуктивності, при забезпеченні необхідної точності керування, є динамічний перерозподіл тягових зусиль залежно від умов зчеплення ведучих коліс. Цьому найповніше відповідає замкнена за лінійною швидкістю САК з безпосереднім регулюванням електромагнітних моментів, залежно від умов зчеплення і величини розузгодження лінійної швидкості механізму.

3. Розроблено алгоритм формування напруги живлення ТАД за рахунок двополярної просторової ШІМ, що забезпечує зниження нерівномірності обертання ротору ТАД на малих швидкостях і дозволяє виконати непряму ідентифікацію умов зчеплення. Експериментальні дослідження на математичній і фізичній моделях продемонстрували, що коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги розробленої ШІМ при частоті модуляції понад 3 кГц не перевищує 6%.

4. Запропонований метод підвищення енергетичної ефективності векторного асинхронного електропривода механізму пересування з великим моментом інерції дозволяє на коротких циклах заощадити до 15% електроенергії за рахунок залежного від лінійної швидкості регулювання величини складової



струму статора, що намагнічує.

5. Показано, що для електроприводів з двигунами середньої потужності серії МТКН, при несучій частоті ШІМ менш ніж 4 кГц і обмеженні динамічного перевантаження за струмом на 2-кратному рівні, можливо знехтувати ефектом «насичення» силового перетворювача і вважати внутрішній контур регулювання замкненим і лінійним.

6. Для багатомоторних механізмів з великим моментом інерції розроблено методику синтезу САК з модальними регуляторами. Використання цієї методики в діяльності ДВТП «Укрчерметавтоматика» (м. Дніпропетровськ) і ТОВ «Укрелектроремонт» (м. Дніпродзержинськ), показало, що вона забезпечує задані показники якості під час скорочення обсягу пусконаладжувальних робіт.

7. Розроблено алгоритм непрямого визначення моменту критичного проковзування ведучого колеса за сигналами датчиків лінійної швидкості, фазних струмів, тривалості керуючих імпульсів двополярної просторової ШІМ і параметрам схеми заміщення ТАД, що дозволяє зменшити похибку керування синтезованої САК за рахунок автоматичного перерозподілу тягових зусиль.

8. За наслідками досліджень розроблені й впроваджені у промислову експлуатацію мікропроцесорні системи керування з дискретними регуляторами зі змінною структурою. Трирічним досвідом експлуатації САК на ТОВ «УЗ СКГШ» (м. Дніпропетровськ), ВАТ «ДМК» (м. Дніпродзержинськ) підтверджено їх високу надійність.

9. Результати дисертаційної роботи рекомендовано фахівцям проектних і пусконаладжувальних організацій під час розробки нових і модернізації існуючих кокосових машин.

### **ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Мазур, Р.А. Частотно-регулируемый электропривод с экономичным законом управления [Текст] / Р.А. Мазур // Сборник научных трудов НГА Украины. – 2001. – Т.2, №11. - С. 192-195.

2. Соседка, В.Л. Способ широтно-импульсного управления силовыми ключами автономного инвертора напряжения [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Гірнична електромеханіка і автоматика. - 2003. - вип.70. - С. 52-58.

3. Мазур, Р.А. Расчет микропроцессорной двухконтурной системы подчиненного регулирования в пакете MATLAB [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2003. - Вип.71. - С. 66-74.

4. Соседка, В.Л. Виртуальная модель цифрового блока двухполярной векторной ШИМ [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Гірнична електромеханіка і автоматика. - 2004. - вип.72. - С. 67-74.

5. Соседка, В.Л. Анализ методик построения векторно-матричных моделей непрерывных систем в дискретном времени [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. - 2004. - Вип.73. - С. 65-72.

6. Мазур, Р.А. Особенности программной реализации дискретного управляющего устройства [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Зб. наук. пр. НГУ. – Дн-ськ: РВК НГУ. - 2006. – Т.2, №26. - С. 23-26.

7. Мазур, Р.А. Алгоритм модальной идентификации параметров объекта регулирования в микропроцессорном электроприводе [Текст] / Р.А. Мазур // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – Т.2, №33. – С. 10-15.

8. Д. п. 42476 А, МКИ Н02Р7/42. Частотно-регульований електропривод [Текст] / Бельмас С.Д., Мазур Р.А., Соседка В.Л. (Україна). - 2001031628/12-03, заявл. 12.03.01; опубл. 15.10.01; Бюл. №9, 2001 р.

9. Мазур, Р.А. Математическая модель механизма передвижения коксовой машины с индивидуальным приводом колес // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інтегровані системи управління в гірничо-металургійному комплексі» [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Академический вестник (КрТО МАКНС). – Кривий Ріг. – 2005. - №15-16. – С. 91-95.

10. Мазур, Р.А. Реализация микропроцессорной системы подчиненного регулирования на базе микроконтроллера PIC18F452 // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в сфері дистанційної освіти, міжнародної співпраці та інтеграції освіти, науки та виробництва» [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Зб. наук. пр. НГУ. - Дн-вськ: РВК НГУ. - 2007. - №27. - С. 157–160.

11. Мазур, Р.А. Опыт применения модального регулятора в микропроцессорном электроприводе // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в сфері дистанційної освіти, міжнародної співпраці та інтеграції освіти, науки та виробництва» [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. - №31. – С. 162-169.

12. Соседка, В.Л. К вопросу определения оптимального закона управления частотно-регулируемым электроприводом [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Сборник научных трудов НГА Украины. – 2001. – Т.2, №11. - С. 188-191.

13. Соседка, В.Л. Исследование в пакете MATLAB систем регулирования с цифровой коррекцией [Текст] / В.Л. Соседка, Р.А. Мазур // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. - 2003. - Вип.70. - С.58-65.

14. Мазур, Р.А. Способы управления механизмами передвижения коксовых машин с индивидуальным приводом колес [Текст] / Р.А. Мазур, В.Л. Соседка // Академический вестник (КрТО МАКНС). – Кривий Ріг. – 2005. - №15-16. - С. 88-91.

**Особистий внесок автора.** Усі теоретичні дослідження і експериментальні перевірки теоретичних положень дисертаційної роботи виконані автором самостійно. У роботах, опублікованих в співавторстві, автором самостійно розроблено алгоритм двополярної просторової ШІМ [2]; розроблено дискретну модель мультиплексованого аналогово-цифрового перетворювача, досліджений ступінь його впливу на якість керування [3]; сформульовано вимоги до окремих

блоків ШІМ, проведено оцінку їх фізичної реалізації [4]; розроблено методики синтезу мікропроцесорної САК, виконано їх дослідження [5, 13]; розроблено і впроваджено у виробництво дискретний регулятор зі змінною структурою [6]; отримано аналітичну залежність ковзання частоти току ротора від частоти напруги живлення, що знижує енерговитрати АД [8]; розроблено математичний опис багатомоторного МПКМ як об'єкта керування [9]; розроблено програмне забезпечення і впроваджено у виробництво цифровий одноплатний керуючий пристрій зі структурою, що вільно конфігурується [10]; розроблено і впроваджено у виробництво мікропроцесорну САК з модальними регуляторами [11]; отримано залежність ступеня використання АД за електромагнітною потужністю від частоти напруги живлення і ковзання [12]; виконано аналіз способів керування ТАД коксових машин, обґрунтовано структуру ТЕП, що найбільш повно задовольняє до технологічних вимог [14].

### АНОТАЦІЇ

**Мазур Р.А. Поліпшення регулювальних та енергетичних характеристик багатомоторного асинхронного електроприводу механізму пересування коксових машин - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - «Електротехнічні комплекси та системи». - Національний гірничий університет. Дніпропетровськ, 2009.

Дисертацію присвячено питанням синтезу системи автоматичного керування (САК) багатомоторного асинхронного електропривода (ЕП) механізму пересування коксової машини (МПКМ), що забезпечує підвищення її продуктивності, точності керування, економічності, надійності і безпеки.

Розроблено математичний опис багатомоторного тягового асинхронного ЕП механізму пересування, що враховує масово-геометричні й механічні параметри, динамічну зміну коефіцієнтів зчеплення ведучих коліс з рейками. Виконано структурний синтез САК лінійної швидкості багатомоторного МПКМ. Отримано методики синтезу САК модальним і частотним методами. Запропоновано алгоритм двополярної просторової широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги автономного інвертора, який дозволяє розширити діапазон керування механізмом пересування в області малих швидкостей та визначити умови зчеплення ведучого колеса з рейкою непрямым способом. Обґрунтовано метод підвищення енергетичної ефективності векторного асинхронного ЕП механізму пересування з великим моментом інерції за рахунок залежного від лінійної швидкості регулювання величини намагнічуючої складової струму статора.

**Ключові слова:** коксова машина, тяговий електропривод, асинхронний електропривод, автоматичне керування, широтно-імпульсна модуляція.

**Мазур Р.А. Улучшение регулировочных и энергетических характеристик многодвигательного асинхронного электропривода механизма передвижения коксовых машин – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». - Национальный горный университет. Днепропетровск, 2009.

Диссертация посвящена вопросам синтеза системы автоматического регулирования (САР) многодвигательного асинхронного электропривода (ЭП) механизма передвижения коксовой машины (МПКМ), обеспечивающего повышение ее производительности, точности управления, экономичности, надежности и безопасности.

Выполнен анализ принципов построения и методов исследования ЭП МПКМ, путей повышения экономичности тягового асинхронного ЭП.

Разработано математическое описание многодвигательного асинхронного ЭП механизма передвижения в виде нестационарной динамической векторно-матричной модели, изменяющей свою структуру в зависимости от условий сцепления, учитывающей разное количество ведущих и ведомых колес, массо-геометрические и механические параметры, закон изменения питающего напряжения, изменение коэффициентов сцепления.

Установлено, что обязательным условием качественного управления многодвигательным МПКМ является контроль условий сцепления ведущих колес с целью динамического перераспределения тяговых усилий, чему наиболее полно отвечает замкнутая по линейной скорости САР с непосредственным управлением электромагнитными моментами тяговых асинхронных электродвигателей (ТАД) в зависимости от величины рассогласования линейной скорости МПКМ и условий сцепления.

Разработан косвенный метод определения момента потери сцепления ведущего колеса с рельсом по сигналам датчиков линейной скорости механизма передвижения, фазных токов, длительностям временных интервалов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и параметрам схемы замещения ТАД.

Предложен алгоритм двухполярной пространственной ШИМ, который, в отличие от известных, за счет уменьшения на периоде модуляции участка с нулевым напряжением к учетверенной длительности «мертвой зоны», определяемой коммутационными свойствами силовых полупроводников автономного инвертора напряжения, обеспечивает при несущей частоте 3 кГц и выше во всем диапазоне глубин модуляции коэффициент искажения синусоидальности модулируемого напряжения менее 6%, что позволяет расширить диапазон регулирования в области низких скоростей.

Показано, что для ЭП с двигателями средней мощности серии МТКН, при несущей частоте ШИМ до 4 кГц и ограничении динамической перегрузки по току на 2-кратном уровне можно пренебречь эффектом «насыщения» силового преобразователя и считать внутренний контур регулирования замкнутым и линейным.

Обосновано использование в САР электропривода многодвигательного механизма с большим моментом инерции модальных регуляторов, позволяющих упростить программную реализацию корректирующего устройства, достаточно просто формализовать синтез контура, обеспечить заданные показатели

качества при сокращении объема пусконаладочных работ. Разработана методика синтеза САР модальным и классическим частотным методом.

С целью обеспечения единства программной реализации корректирующих устройств САР, методами цифровой обработки сигналов разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию простой дискретный регулятор с изменяемой структурой и ограничением выходной координаты.

Предложен метод повышения энергетической эффективности тягового асинхронного ЭП механизма передвижения коксовых машин за счет зависимо-го от линейной скорости регулирования величины намагничивающей составляющей тока статора, что позволяет на коротких циклах сэкономить до 15% электроэнергии.

**Ключевые слова:** коксовая машина, тяговый электропривод, асинхронный электропривод, автоматическое управление, широтно-импульсная модуляция.

**Mazur R.A. Improvement of the regulation and power characteristics of a multi-motor induction electric drive of the coke machine vehicle – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree in Technical Sciences on a speciality 05.09.03 "Electrical engineering complexes and systems". National Mining University. Dnipropetrovs'k, 2010.

The thesis deals with the synthesis of a traction multi-motor induction electric drive which increases productivity, stability, reliability and decreases the energy consumption of the coke machines vehicle.

The mathematical description of the coke machine vehicle as a controlled object which accounts mass, geometrical and mechanical parameters and changes the structure, depending on a friction between driving wheels and rails, is developed. The structural synthesis of the automatic control system (ACS) for the coke machine vehicle traction drive is made. The techniques of such ACS synthesis by the either modal or conventional frequency methods are obtained. The double pole space pulse width modulation algorithm which increases the stability of the induction motor traction drive within low speeds and allows the indirect identification of the friction level between driving wheel and rail is proposed. Depending on the stator voltage frequency and the stator current active component values, the induction motor rotor flux control which decreases the energy consumption of the traction drive is grounded.

**Keywords:** coke machine, traction electric drive, induction electric drive, automatic control, pulse-width modulation.

**МАЗУР РУСЛАН АНАТОЛІЙОВИЧ**

**ПОЛІПШЕННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОМОТОРНОГО АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КОКСОВИХ  
МАШИН**

(Автореферат)

Підписано до друку 14.05.2010. Формат 30x42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,1.  
Обл.-вид. арк. 1,1. Тираж 120 прим. Зам. № .

Національний гірничий університет  
49005. м. Дніпропетровськ. просп. К. Маркса, 19.