

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Бакутін Андрій Вадимович

УДК 681.51/.54

**ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ГОЛОВНОГО РУХУ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА**

05.09.03 – “Електротехнічні комплекси та системи”

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропривода Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Азюковський Олександр Олександрович**, професор кафедри електропривода Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Водічев Володимир Анатолійович**, завідувач кафедри електромеханічних систем з комп'ютерним управлінням Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України.

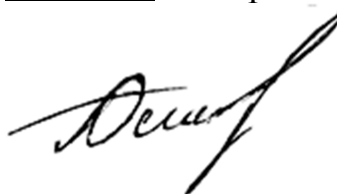
кандидат технічних наук, доцент **Кольсун В'ячеслав Анатолійович**, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться “ ___ ” _____ 2016 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19, тел. (0562) 47 24 11).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою 49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий “ ___ ” _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Автоматизація технологічних процесів в машинобудуванні та широке впровадження в промисловості верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) призвели до висунення жорстких вимог до електроприводів головного руху металорізальних верстатів. Останнім часом, широкого розповсюдження набули деталі машин, виготовлені з високоміцних матеріалів, що дозволяє зменшити розміри та в деяких випадках кількість елементів з одночасним збереженням надійності конструкції механізмів. До таких компонентів відносяться вали, втулки, елементи кріплення тощо. Крім того, для покращення експлуатаційних характеристик деталей машин вони виготовляються зі складним геометричним профілем поверхні, що дозволяє, наприклад, покращити теплообмін між складовими частинами механізму.

Технологія виготовлення таких деталей передбачає обробку заготовки з високоміцного матеріалу на металорізальних верстатах, що зумовлює особливі вимоги до режиму різання. Так для забезпечення збереження необхідних властивостей міцності поверхні, неприпустимим є її перегрів під час процесу обробки, для чого швидкість різання обмежується діапазоном 10-30 м/хв. Іншою важливою вимогою до системи керування електроприводом головного руху металорізального верстата є мінімізація динамічної похибки за швидкістю під час зміни моменту навантаження, що відбувається при врізанні ріжучого інструмента в деталь та при обробці заготовки зі змінним діаметром. Це є необхідним через те, що амплітуда похибки за швидкістю головного руху впливає на кут викривлення поверхні, а час відновлення швидкості до заданого значення на довжину ділянки викривлення.

Таким чином, визначення оптимальних параметрів пристрою керування для мінімізації динамічної похибки за швидкістю при зміні навантаження та отриманні закономірностей впливу коефіцієнтів регулятора швидкості електропривода головного руху металорізального верстата на значення динамічної похибки за швидкістю є актуальною **науковою задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (Закон України від 11.07.2001 № 2623-III). Дослідження виконані відповідно тематик держбюджетних науково-дослідних робіт «Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах» (№ держреєстрації 0110U000529), «Гібридизація вітчизняного бюджетного автомобіля» (№ держреєстрації 0112U000868) де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення динамічної точності електромеханічної системи привода головного руху металорізального верстата шляхом розробки нового закону керування швидкістю системи.

Основні задачі дослідження:

- аналіз вимог до електроприводів головного руху токарних верстатів та обґрунтування вибору раціонального типу розроблюваної системи керування;
- синтез регуляторів швидкості різної конфігурації з метою визначення оптимальної структури регулятора;
- встановлення залежностей коефіцієнтів регулятора струму від параметрів електромеханічної системи, які забезпечують мінімізацію динамічної похибки за швидкістю;
- розробка алгоритму роботи та побудова цифрової системи автоматичного керування приводом головного руху, яка реалізує запропонований закон керування;

Об'єкт досліджень – електромагнітні процеси в електромеханічній системі під час обробки металу різанням.

Предмет досліджень – методи автоматичного керування електромеханічною системою, статичні та динамічні характеристики електропривода головного руху металорізального верстата.

Методи дослідження:

– *теоретичні*: методи теорії автоматичного керування для синтезу сукупності регуляторів швидкості, методи багатокритеріальної оптимізації для отримання оптимального регулятора швидкості, методи дискретної математики для розробки цифрової системи автоматичного керування;

– *емпіричні*: математичне моделювання та експериментальна перевірка ефективності розробленого закону керування приводом головного руху.

Основні наукові положення та результати, їх новизна.

Наукові положення:

- мінімізація похибки регулювання швидкості електромеханічної системи під час ударного навантаження забезпечується законом керування другого порядку, який містить поліномом другого степеня без вільного члена в знаменнику з коефіцієнтами, що отримані відповідно до запропонованого нового розташування коренів характеристичного рівняння;

- поверхня відгуку функції часу відновлення швидкості при накиді навантаження залежно від значень коефіцієнтів передатної функції регулятора швидкості має екстремум, що забезпечує підвищення динамічної точності електромеханічної системи за одночасної умови наявності запасу стійкості за модулем та фазою.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод синтезу системи керування на основі оптимізаційних функціоналів з використанням модифікованого критерію Гурвіца, рівняння Вінера-Хопфа та характеру розподілення коренів характеристичного рівняння на якість перехідних процесів, що забезпечує підвищення динамічної точності зі збереженням стійкості системи керування електроприводом головного руху металорізального верстата.

2. Вперше встановлено залежність амплітуди похибки за швидкістю та часу її відновлення від коефіцієнтів передатної функції регулятора при накиді навантаження під час обробки металу різанням.

3. Вперше отримано рівняння поверхні відгуку для функції часу відновлення швидкості від коефіцієнтів чисельнику передатної функції регулятора, що дозволяє визначити параметри пристрою керування швидкістю електромеханічної системи.

4. Вперше розроблено структуру регулятора швидкістю приводу головного руху металорізального верстата, яка одночасно забезпечує необхідний порядок астатизму щодо зовнішніх збурень та точність відпрацювання вхідного сигналу завдання з урахуванням технологічних вимог до електромеханічної системи.

Практична цінність.

1. Розроблено методику розрахунку оптимального регулятора швидкості асинхронного електроприводу головного руху металорізального верстата, що дозволяє мінімізувати динамічну похибку за швидкістю та час відновлення швидкості до заданого рівня при накиданні навантаження.

2. Отримані залежності амплітуди динамічної похибки та часу відновлення швидкості до заданого рівня від значень коефіцієнтів регулятора швидкості дозволяють визначити параметри регулятора на основі вимог до перехідного процесу за швидкістю при накиді навантаження.

3. Обґрунтовано вимоги до елементної бази та режиму роботи для реалізації модулю керування автономним інвертором напруги, зокрема мікропроцесорного модуля, драйверів силових ключів та частоти їх комутації.

4. Розроблено пристрій керування на базі мікропроцесорного модуля, який відпрацьовує запропонований закон керування на основі інформації фазних струмів та швидкості обертання двигуна.

Результати дисертаційної роботи у вигляді алгоритму оптимального закону керування та результатів експериментальних досліджень впроваджені у тимчасову експериментально-промислову експлуатацію ППФ «Сіґма-сервіс» (м.Дніпропетровськ).

Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується: коректністю прийнятих у ході дослідження припущень, відповідністю розроблених математичних моделей фізичним процесам електромеханічної системи, збіжністю результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень з відхиленням до 10%, результатами впровадження розробки у виробництво.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних завдань досліджень, аналізі сучасних систем керування приводом головного руху металорізальних верстатів, обґрунтуванні оптимальної структури регулятора швидкості шляхом порівняльного аналізу якості перехідних процесів сукупності синтезованих пристроїв керування швидкістю, розробці методики синтезу оптимальної системи керування з використанням модифікованого критерію Гурвіца, розв'язання рівняння Вінера-Хопфа та аналізу впливу розподілення коренів характеристичного рівняння замкненої системи на якість перехідних про-

цесів, отриманні залежностей та дослідженні впливу коефіцієнтів передатної функції регулятора швидкості на якість перехідних процесів при накиді навантаження, проведенні експериментальних досліджень для підтвердження працездатності та достовірності теоретичних результатів роботи. Зміст дисертації викладено автором особисто.

Апробація основних результатів дисертаційної роботи. Основні матеріали і результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях: міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів у електроенергетичних системах» (м. Севастополь, 2013 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (м. Воловець, 2015 р.).

Публікації. Основні положення і результати роботи опубліковані у 10 друкованих працях, з них – 1 стаття у міжнародному виданні, 1 стаття у виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз, 6 статей у фахових виданнях МОН України, 2 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел з 63 найменувань на 7 сторінках, додатку на 1 сторінці. Загальний обсяг дисертації – 141 сторінок, з яких: основний текст – 132 стор., рисунків – 67, таблиць – 4.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, які вирішувались для досягнення поставленої мети, зв'язок теми роботи з науковими програмами та планами, наведені наукова новизна отриманих результатів та їх практична цінність.

Перший розділ присвячений обґрунтуванню необхідності розробки оптимальної системи керування електроприводом головного руху металорізального верстата. Питання вдосконалення системи керування набуло актуальності з початком активного впровадження методів обробки металу різанням з підвищеними вимогами щодо точності регулювання швидкості. В Україні теорія та практичні підходи щодо розробки оптимальних систем керування розвинуті В.М. Перельмутером, О.В. Садовим, Д.Й. Родькіним, О.В. Волковим, С.М. Пересадою, А.О. Лозинським, В.А. Водічевим, М.К. Шапаревим, В.Ф. Кудіним та іншими провідними вченими.

На даний час теорія систем оптимального керування дозволяє визначити структуру та параметри регуляторів будь-якої складності для лінійних, лінеаризованих та нелінійних об'єктів керування. Проте, оптимізація закону керування, параметрів регулятора, тощо виконується доволі часто лише за одним критерієм якості, наприклад, оптимізація за нагріванням двигуна та формування оптимальної за тепловими втратами у двигуні діаграми переміщення. В сучасних

системах керування металорізальними верстатами важливою вимогою до електропривода головного руху є висока динамічна точність, що зумовлено одночасним регулюванням параметрів режиму обробки як за каналом подачі, так і за каналом головного руху. При цьому широко розповсюджений пропорційно-інтегральний (ПІ) закон керування не забезпечує достатньої якості обробки без використання додаткових заходів, які, в свою чергу, призводять до значного ускладнення системи керування та її здорожчання.

На відміну від існуючих систем пропонується використання багатокритеріальної оптимізації пристроїв керування швидкістю асинхронного двигуна для підвищення якості роботи приводу головного руху металорізального верстата. Критеріями якості при цьому виступають мінімізація динамічної похибки за швидкістю, час відновлення заданого значення швидкості обертання при накиданні моменту навантаження для збереження відповідного режиму різання, чутливість до зміни параметрів об'єкта керування для стабільності роботи електромеханічної системи верстата. Синтез регуляторів пропонується виконувати за допомогою методів аналітичного конструювання пристроїв керування шляхом мінімізації функціоналів, які відображають критерії якості, що висунуті до системи керування та накладені на неї обмеження.

На основі технологічних параметрів процесу різання сформульовані наступні вимоги до електромеханічної системи приводу головного руху металорізального верстата: забезпечення максимально можливого швидкого розгону шпинделя до обраного раціонального значення швидкості різання; стабілізація швидкості різання на заданому рівні при зміні моменту інерції електромеханічної системи та висока динаміка відновлення заданого значення швидкості при ударному прикладенні навантаження за рахунок забезпечення мінімуму динамічної похибки за швидкістю та мінімального часу відновлення; плавність регулювання швидкості різання, що дозволить точну реалізацію максимально раціональних режимів різання.

Виконаний аналіз існуючих електромеханічних перетворювачів енергії показав переваги застосування для приводу головного руху металорізальних верстатів двигунів змінного струму, серед яких найбільш раціональним є використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що задовольняє усім висунутим вимогам.

Враховуючи вимоги до електропривода головного руху за точністю, швидкістю та діапазоном регулювання швидкості, використання замкнених систем автоматичного керування на базі мікропроцесорного модуля та автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією і некерованим випрямлячем є пріоритетним напрямом побудови та модернізації металорізальних верстатів.

Другий розділ присвячений теоретичному обґрунтуванню напрямку вдосконалення приводу головного руху металорізального верстата.

Наведено послідовність багатокритеріального конструювання регуляторів, що дозволяє отримати широке розмаїття ланок корегування з різними структу-

рами, ступенем складності та характеристиками для вибору найбільш оптимального результату, що відповідає сукупності висунутих до системи керування технологічних вимог та забезпечує необхідні динамічні та статичні показники якості роботи об'єкта керування.

Для синтезу оптимального регулятора швидкості використано квадратичний інтегральний критерій якості, що дозволяє отримати аналітичне розв'язання задачі синтезу, а отримані математичні моделі можуть бути реалізовані на основі існуючої елементної бази. Об'єктом керування контуру регулювання швидкості електромеханічної системи (рис. 1) є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

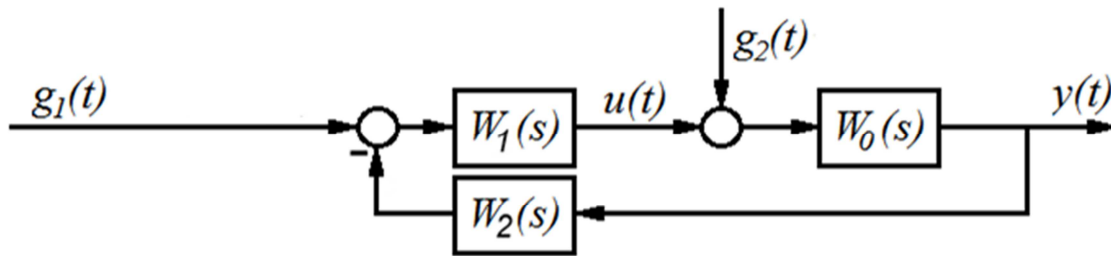


Рис. 1 Структурна схема системи керування швидкістю асинхронного двигуна

На основі припущення, що перехресні зв'язки за проекціями вектора струму статора компенсовані, а внутрішній контур струму оптимізовано за технічним критерієм, об'єкт керування електромеханічної системи описується наступним чином:

$$W_0(s) = \frac{1.5 \cdot p_{\text{ПП}} \cdot k_2}{J \cdot k_c \cdot (T \cdot s + 1) \cdot s},$$

де s – оператор Лапласа; $p_{\text{ПП}}$ – число пар полюсів асинхронного двигуна; $k_2 = L_m/L_2$ – коефіцієнт відношення індуктивності контуру намагнічування L_m та повної індуктивності фази ротора L_2 ; J – момент інерції двигуна; k_c – коефіцієнт датчика струму статора; T – стала часу кола статора.

Для синтезу оптимального регулятора максимальної складності з достатньою кількістю ланок корегування за бажану передатну функцію відображення регулярної складової сигналу завдання $g_1(t)$ прийнято $U_1(s) = 1$, а для регулярної складової сигналу завади $g_2(t)$ оператор відображення – $U_2(s) = 0$, для випадкових складових $P_1(s) = 0$ та $P_2(s) = 0$, а також введено умову забезпечення астатизму першого порядку відносно сигналу завдання. Функціонали для розв'язання задачі оптимізації регулятора з достатньою кількістю ланок корегування мають вигляд:

$$I_1 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \left| \left(1 - \widehat{W}(s)\right) \frac{1}{s} \right|^2 ds + \lambda_{11} \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} |s\widehat{W}(s)|^2 ds,$$

$$I_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \left| (1 - \tilde{H}(s)) W_0(s) \right|^2 ds + \lambda_{21} \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} |s\tilde{H}(s)|^2 ds,$$

де λ_{11} , λ_{21} – вагові коефіцієнти; $\hat{W}(s)$ – передатна функція системи відносно сигналу завдання; $\tilde{H}(s)$ – передатна функція системи відносно завади, що накладена на сигнал керування.

Розв’язання задачі оптимізації зводиться до знаходження таких передатних функцій $\hat{W}(s)$ та $\tilde{H}(s)$, що містять тільки від’ємні полюси та забезпечують мінімум функціоналам I_1 та I_2 відповідно. Для цього складається рівняння Вінера-Хопфа вигляду

$$W_{\text{оп}}(s) \cdot S_1(s) - S_2(s) = \Gamma(s),$$

до складу якого входять дві невідомі функції $W_{\text{оп}}(s)$ та $\Gamma(s)$, перша з яких має тільки від’ємні полюси, а інша – тільки додатні.

Оптимальна передатна функція системи відносно сигналу завдання:

$$\hat{W}(s) = \frac{R(s)}{L(s)} = \frac{1/\sqrt{\lambda_{11}}}{s^2 + \sqrt[4]{\frac{4}{\lambda_{11}}} \cdot s + \sqrt{\frac{1}{\lambda_{11}}}},$$

а оптимальна передатна функція системи відносно завади, що накладена на сигнал завдання:

$$\tilde{H}(s) = \frac{(e \cdot T + f) \cdot (s + 1)}{e \cdot T^2 \cdot \lambda_{21} (s + a) \cdot (s^2 + b \cdot s + d)}.$$

На основі виразів для $\hat{W}(s)$ та $\tilde{H}(s)$ отримано передатні функції ланок корегування:

$$W_1(s) = \frac{G_1 \cdot s \cdot (T \cdot s + 1)(s + a) \cdot (s^2 + b \cdot s + d)}{\left(s^2 + \sqrt[4]{\frac{4}{\lambda_{11}}} \cdot s + \sqrt{\frac{1}{\lambda_{11}}} \right) (G_2 \cdot s^3 + G_3 \cdot s^2 + G_4 \cdot s + G_5)},$$

$$W_2(s) = \frac{\sqrt{\lambda_{11}} (e \cdot T + f) \cdot (s + 1) \left(s^2 + \sqrt[4]{\frac{4}{\lambda_{11}}} \cdot s + \sqrt{\frac{1}{\lambda_{11}}} \right)}{e \cdot T^2 \cdot \lambda_{21} (s + a) \cdot (s^2 + b \cdot s + d)}.$$

Передатні функції максимальної складності ланок корегування прямого каналу та каналу зворотного зв'язку визначають верхню межу сукупності регуляторів при визначенні оптимального варіанту шляхом порівняння якісних показників перехідних процесів системи.

Третій розділ присвячений визначенню оптимального закону керування приводом головного руху металорізального верстата.

Для визначення параметрів передатної функції пристрою керування відносно зворотного зв'язку $A_2(s)$, що забезпечує стійкість системи, використано модифікований критерій Гурвіца. Характеристичне рівняння замкненої системи регулювання швидкості:

$$T(s) = s^3 + \frac{1}{T}s^2 + \frac{1.5 \cdot p_{\text{пп}} \cdot k_2 \cdot v_1}{J \cdot k_c \cdot g_0 \cdot T}s + \frac{1.5 \cdot p_{\text{пп}} \cdot k_2 \cdot v_0}{J \cdot k_c \cdot g_0 \cdot T},$$

на основі якого складено дробово-раціональну функцію, до складу якої входить поліном з від'ємними коренями $D(s)$, степінь якого дорівнює степені характеристичного поліному $T(s)$, а коефіцієнти при старших степенях обох поліномів дорівнюють один одному:

$$\Pi(s) = \frac{T(s)}{D(s)} = 1 + \Phi(s).$$

Модифікований критерій Гурвіца характеризує близькість коефіцієнтів c_i та d_i поліномів $T(s)$ та $D(s)$ відповідно, згідно якого мінімум розузгодження між ними забезпечує стійкість системи:

$$I = \sum_{i=0}^n \rho_i |d_i - c_i|.$$

Після розв'язання оптимізаційної задачі передатні функції ланок корегування у прямому каналі $W_1(s)$ та каналі зворотного зв'язку $W_2(s)$ мають вигляд

$$W_1(s) = \frac{k_1 s + k_0}{l_1 s}, \quad W_2(s) = q_0.$$

Для синтезу регуляторів заданої складності використано той самий метод, що і для синтезу регулятора мінімальної складності. Було отримано дві структури регуляторів заданої складності другого та третього порядку, передатні функції ланок корегування у прямому каналі та каналі зворотного зв'язку яких:

$$W_1(s) = \frac{k_3 s^2 + k_1 s + k_2}{s(cs + 1)}; \quad W_2(s) = q_0.$$

$$W_1(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s}; \quad W_2(s) = \frac{q_1 s + q_0}{w_1 s + w_0}.$$

Для отриманих структур та параметрів регуляторів швидкості шляхом математичного моделювання отримані графіки перехідних процесів розгону електромеханічної системи до номінальної швидкості та накидання номінального навантаження (рис. 2). На основі досліджень якості перехідних процесів зроблено висновок про подальше використання для розробки оптимального регулятора швидкості головного приводу металорізального верстата структури, що містить поліном другого порядку у чисельнику та поліном другого порядку без вільного члену у знаменнику.

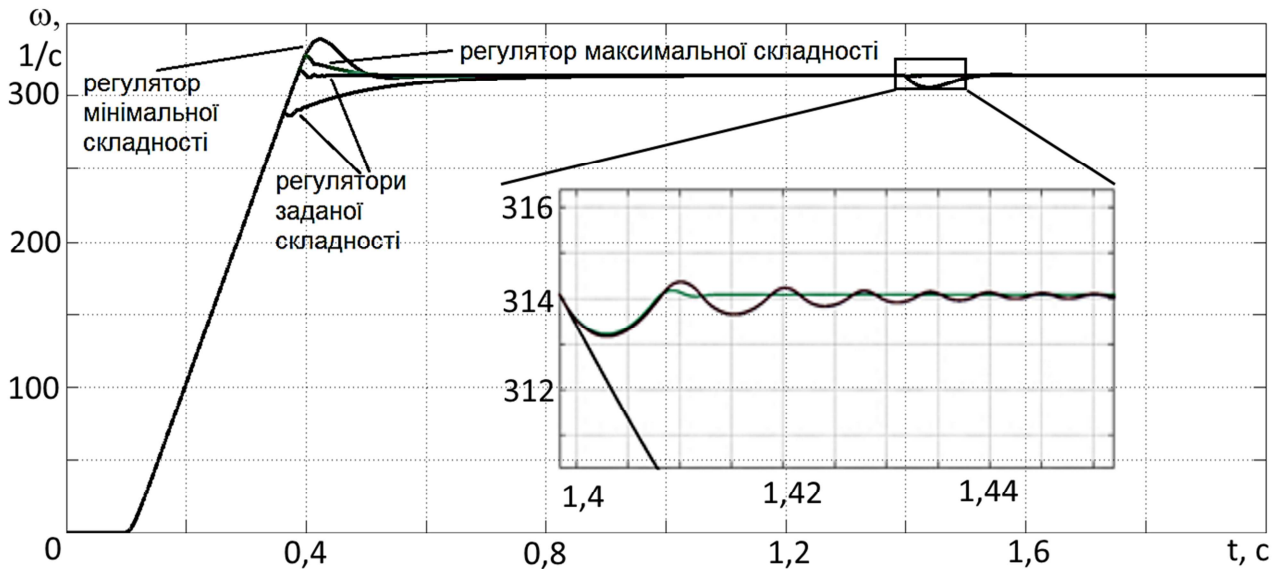


Рис. 2 Графіки перехідних процесів розгону електромеханічної системи

Стійкість та якість перехідних процесів замкненої системи керування безпосередньо пов'язані з розташуванням нулів та полюсів її передатної функції на s -площині. Для налаштування системи керування зі складним регулятором, який має декілька змінюваних параметрів, було використано метод кореневого годографа, який дозволяє виконати роздільну оцінку зміни значення кожного з параметрів на якість перехідних процесів системи керування. Для цього передатна функція об'єкта керування була приведена до вигляду

$$W_0(s) = \frac{K}{s(s+p)}, \quad \text{де} \quad K = \frac{1.5 \cdot p_{\text{ПП}} \cdot k_2}{J \cdot k_c \cdot T}, \quad p = \frac{1}{T}.$$

Для забезпечення необхідних показників якості системи на вході системи використано фільтр, що компенсує небажаний вплив нулів передатної функції замкненої системи

$$W_{\phi}(s) = \frac{\frac{\omega_{\Pi}^4}{Kk_3}}{s^2 + \frac{k_1}{k_3}s + \frac{k_2}{k_3}}$$

Рівняння коефіцієнтів регулятора залежно від параметрів електромеханічної системи:

$$c = \frac{1}{2,1\omega_{\Pi} - p}; \quad k_3 = \frac{3,4\omega_{\Pi}^2 c - p}{K}; \quad k_1 = \frac{2,7\omega_{\Pi}^3 c}{K}; \quad k_2 = \frac{\omega_{\Pi}^4 c}{K}.$$

Для знаходження оптимальних коефіцієнтів регулятора швидкості, які забезпечать мінімальне значення амплітуди динамічної похибки за швидкістю асинхронного двигуна, а також мінімальний час її відновлення, було виконано оцінку впливу кожного з коефіцієнтів на вказані показники якості перехідного процесу за допомогою методу кореневого годографу. Характеристичне рівняння замкненого контуру регулювання швидкості асинхронного двигуна має наступний вигляд

$$2JT_{\mu}cs^4 + (2JT_{\mu} + Jc)s^3 + (J + KJk_{\text{д}\omega}k_3)s^2 + KJk_{\text{д}\omega}k_1s + KJk_{\text{д}\omega}k_2 = 0,$$

а рівняння для дослідження впливу кожного з параметрів регулятора на реакцію системи при ступінчатому прикладенні навантаження наведено нижче

$$1 + \frac{(2JT_{\mu}s^4 + Js^3)c}{2JT_{\mu}s^3 + (J + KJk_{\text{д}\omega}k_3)s^2 + KJk_{\text{д}\omega}k_1s + KJk_{\text{д}\omega}k_2} = 0;$$

$$1 + \frac{KJk_{\text{д}\omega}k_2}{2JT_{\mu}s^3 + (J + KJk_{\text{д}\omega}k_3)s^2 + KJk_{\text{д}\omega}k_1s} = 0;$$

$$1 + \frac{KJk_{\text{д}\omega}k_1s}{2JT_{\mu}s^3 + (J + KJk_{\text{д}\omega}k_3)s^2} = 0;$$

$$1 + \frac{KJk_{\text{д}\omega}k_3s^2}{2JT_{\mu}s^3 + Js^2} = 0.$$

В результаті аналізу впливу коефіцієнтів регулятора швидкості на показники якості перехідного процесу при зміні навантаження отримана поверхня відгуку функції коефіцієнтів регулятора та часу відновлення швидкості до заданого

значення (рис. 3). За допомогою методів інтерполяції було отримане рівняння поверхні відгуку та виконане дослідження її на екстремум:

$$t_{\text{відн}} = 0,075k_1^4 - 0,496k_1^3 + 1,19k_1^2 - 1,185k_1 - 0,001k_2^3 + 0,02k_2^2 - 0,15k_2 + 0,842.$$

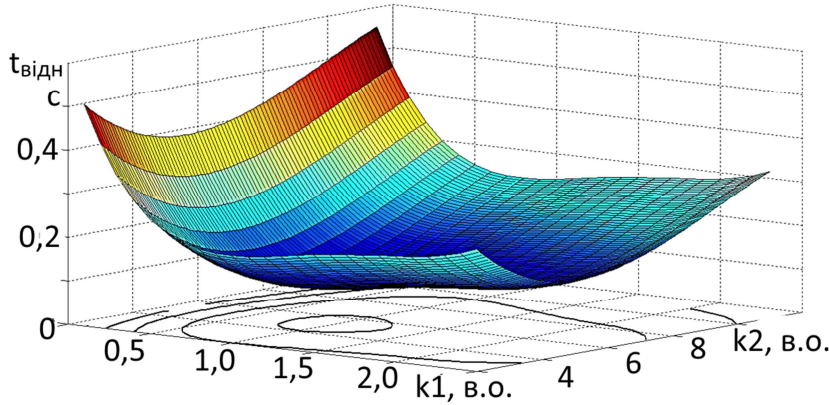


Рис. 3 Графік поверхні відгуку функції коефіцієнтів регулятора та часу відновлення швидкості

Прийнявши значення коефіцієнтів k_2 та k_1 , що відповідають екстремальним значенням за часом відновлення швидкості, а також значення коефіцієнта k_3 та c для отримання мінімальної амплітуди похибки було отримано передатну функцію оптимального регулятора швидкості. Математичне моделювання перехідних процесів за швидкістю під час

розгону та накидання навантаження синтезованої оптимальної системи керування при порівнянні зі стандартним ПІ-регулятором показує зменшення динамічної похибки за швидкістю на 66% та часу відновлення до заданої швидкості на 60% (рис. 4).

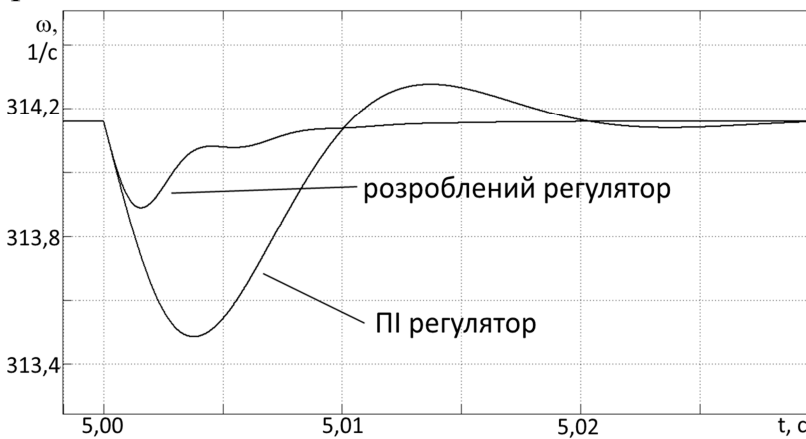


Рис. 4 Графік перехідного процесу за швидкістю при нахиді навантаження

та якість оброблюваної поверхні, тощо. Структурна схема такої системи (рис. 5) складається з регулятора швидкості Р, об'єкту керування ОК, блоку, що описує процеси різання ПР, та датчика швидкості різання ДШ, що побудований на основі вимірювання поточного радіусу оброблюваної деталі та кутової швидкості електропривода головного руху верстата.

Основною метою систем стабілізації режиму обробки є підтримання одного або декількох параметрів відповідно до обраного технологічного закону керування. Система стабілізації швидкості різання є однією з найбільш розповсюджених систем та дозволяє скоротити машинний час на обробку деталі, підвищити продуктивність обробки

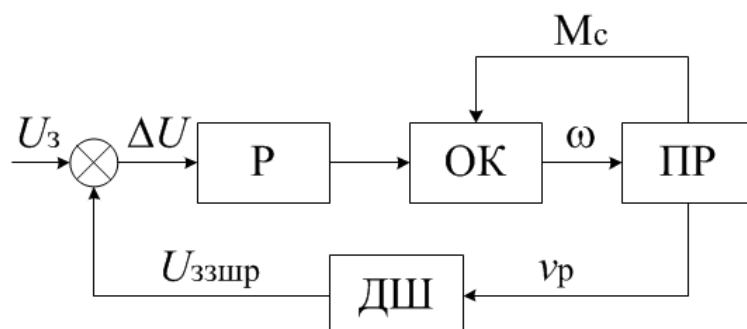


Рис. 5 Структурна схема системи стабілізації швидкості різання

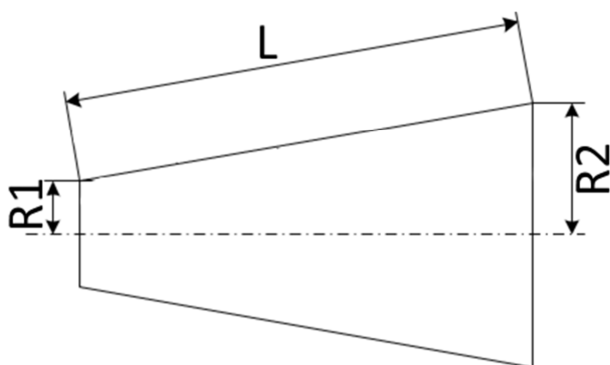


Рис. 6 Ескіз оброблюваної деталі

Графіки перехідних процесів розгону головного приводу верстата та виконання токарної обробки деталі зі змінним радіусом оброблюваної поверхні від 5 до 25 мм (рис. 6) підтверджують коректність побудованої системи щодо стабілізації швидкості різання v_p (рис. 7) – кутова швидкість двигуна змінюється за гіперболічним законом, а момент навантаження M_p зростає лінійно зі збільшенням радіуса оброблюваної поверхні.

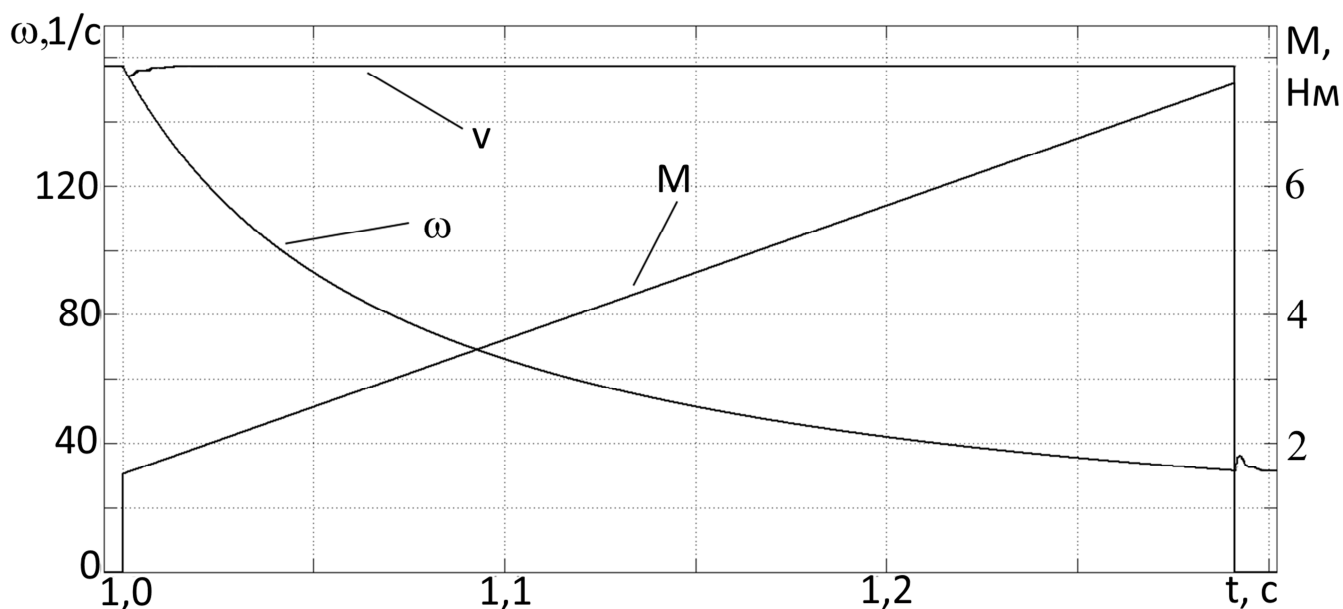


Рис. 7 Графіки перехідних процесів при токарній обробці деталі

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці та практичній реалізації розроблених підходів. Наведено рекомендації щодо вибору мікропроцесорного елемента, який задовольняє вимогам, висунутим з боку системи векторного керування асинхронним двигуном, та математичні залежності для

коректного вибору пристрою формування сигналів керування силовими ключами, а також для їх вибору, що можуть широко використовуватись для практичної реалізації систем керування асинхронними двигунами.

Розроблено алгоритм роботи мікропроцесорного модуля системи автоматичного керування швидкістю приводу головного руху, який на основі вхідної інформації про завдання на відпрацювання тахограми швидкості обертання шпинделя, значень фазних струмів статорної обмотки асинхронного двигуна та дійсної швидкості обертання, формує відповідні імпульси керування силовими елементами автономного інвертора напруги.

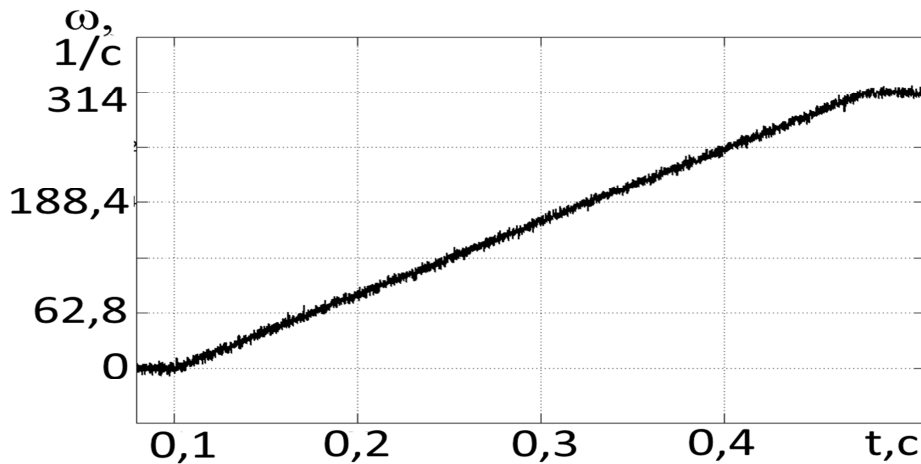


Рис. 8 Осцилограми перехідного процесу пуску системи

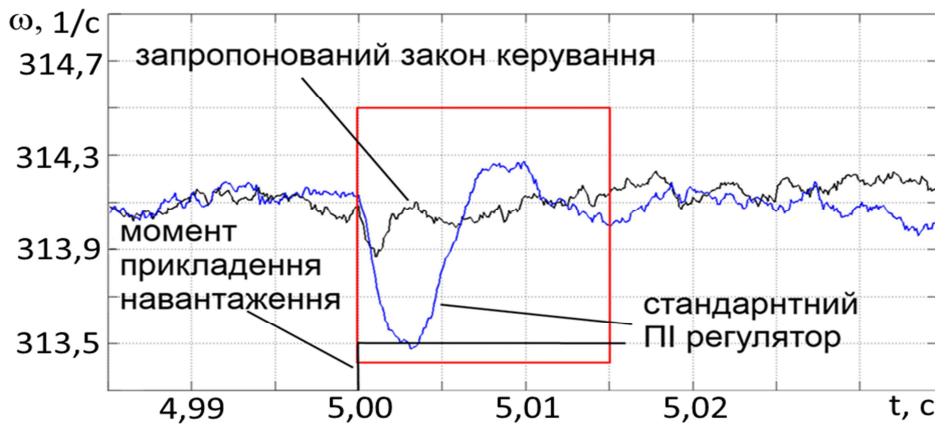


Рис. 9 Осцилограми порівняння характеристик системи при накиді навантаження

до заданої швидкості на 60 %.

Впровадження у тимчасову експериментально-промислову експлуатацію розробленого пристрою керування забезпечило економічний ефект у розмірі 20 тис. грн. при виготовленні заготівель елементів двигунів внутрішнього згоряння дрібносерійними партіями у кількості 150 шт.

В результаті експериментальних досліджень отримано осцилограми перехідних процесів за швидкістю під час пуску приводу головного руху металорізального верстата (рис. 8) та накиду номінального навантаження (рис. 9).

Під час аналізу перехідних процесів при накиді навантаження у розробленій системі керування порівняно зі стандартним ПІ-регулятором (рис. 9) встановлено зменшення амплітуди динамічної похибки за швидкістю на 66% та часу відновлення

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідницькою роботою, в якій вирішується актуальна наукова задача визначення оптимальних параметрів пристрою керування для мінімізації динамічної похибки за швидкістю при зміні навантаження та отриманні закономірностей впливу коефіцієнтів регулятора швидкості електропривода головного руху металорізального верстата на значення динамічної похибки за швидкістю.

1. В результаті аналізу перехідних процесів системи керування швидкістю електропривода головного руху для сукупності регуляторів від першого до п'ятого порядків доведено, що підвищення динамічної точності системи під час різкої зміни моменту навантаження досягається шляхом використання оптимального регулятора, передатна функція якого містить поліном другого порядку у чисельнику та поліном другого порядку без вільного члена у знаменнику.

2. Отримано залежності коефіцієнтів регулятора швидкості другого порядку від параметрів електромеханічної системи, які дозволяють виконати оцінку впливу кожного з коефіцієнтів на показники якості перехідного процесу.

3. Встановлено залежність амплітуди динамічної похибки та часу відновлення швидкості до заданого значення, на основі яких визначено значення коефіцієнтів регулятора для відповідних показників якості перехідного процесу.

4. Встановлено наявність екстремуму на поверхні відгуку функції часу відновлення значення швидкості від коефіцієнтів передатної функції регулятора швидкості другого порядку, що забезпечує максимальну динамічну точність електромеханічної системи за умови наявності запасу стійкості за модулем та фазою.

5. Обґрунтовано вимоги до елементної бази та режиму роботи для реалізації цифрового модуля керування автономним інвертором напруги з урахуванням особливостей розробленого закону керування, зокрема мікропроцесорного модуля, драйверів силових ключів та частоти їх комутації.

6. Розроблено алгоритм роботи мікропроцесорного модуля системи автоматичного керування швидкістю приводу головного руху на основі вхідної інформації про завдання на відпрацювання тахограми швидкості обертання шпинделя, значень фазних струмів статорної обмотки асинхронного двигуна та дійсної швидкості обертання, а також отримані вирази у вигляді різницевих рівнянь для реалізації пропорційно-інтегральних законів регулювання струму та отриманого закону регулювання швидкості у цифровій системі керування.

7. В результаті експериментальних досліджень виявлено, що запропонований закон керування дозволяє підвищити динамічну точність електропривода головного руху токарного верстата під час ударного прикладання навантаження порівняно з широко розповсюдженим у таких системах пропорційно-інтегральним законом керування завдяки зменшенню амплітуди динамічної похибки за швидкістю на 66% та часу відновлення до заданої швидкості на 60%.

8. Впровадження у тимчасову експериментально-промислову експлуатацію розробленого пристрою керування при виготовленні заготівель елементів двигунів внутрішнього згорання дрібносерійними партіями у кількості 150 шт забезпечило економічний ефект у розмірі 20 тис. грн.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

Публікації у закордонних виданнях та вітчизняних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Vakutin A. The electromechanical system of the turning machine tool / A. Vakutin // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – P. 201-210.

2. Бакутін А.В. Вибір елементної бази для системи векторного керування асинхронним двигуном / А.В. Бакутін // Науковий вісник Національного гірничого університету. – №4. – 2015. – С. 65-71. (Наукометрична база Scopus)

Публікації у фахових виданнях:

3. Азюковський О.О. / Аналіз перспектив використання електромеханічних перетворювачів енергії для приводу головного руху металорізальних верстатів / О.О. Азюковський, А.В. Бакутін // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – С. 128-133.

4. Азюковський О.О. / Синтез оптимального регулятора швидкості мінімальної складності. / О.О. Азюковський, А.В. Бакутін // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 90. – С. 62-66.

5. Азюковський О.О. Синтез оптимального регулятора швидкості високого порядку / О.О. Азюковський, А.В. Бакутін // Науковий вісник Національного гірничого університету. – №1. – 2014. – С. 71-77. (Наукометрична база Scopus)

6. Vakutin A.V. Optimal speed controller with predetermined difficulty / A.V. Бакутін // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 62-68.

7. Бакутін А.В. Застосування багатокритеріальної оптимізації систем керування електромеханічними комплексами / А.В. Бакутін // Сб. науч. тр. Нац. горн. ун-та – Д.: Национальный горный университет, 2013. – №1. – С. 64-67.

8. Vakutin A.V. Optimal speed regulator of the metal-cutting machine tool main drive / А.В. Бакутін // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 78-83.

Матеріали конференцій:

9. Азюковський О.О. Критерії оцінки якості системи та пристрою керування. / О.О. Азюковський, А.В. Бакутін // Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (Севастополь 23 – 27 сентября 2013). – С. 201-203.

10. Бакутін А.В. Вибір оптимальної частоти комутації силових ключів автономного інвертора напруги / А.В. Бакутін // VI Міжнародна науково-

практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (Воловець, 10 червня – 13 червня 2015 р.). – Д.: ДНУЗТ, 2015. – С. 8.

Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих в співавторстві полягає: робота [3] – порівняльний аналіз типів електромеханічних перетворювачів, робота [4, 5] – визначення коефіцієнтів передатних функцій регулятора швидкості, робота [9] – розрахунок критеріїв якості системи автоматичного керування.

АНОТАЦІЯ

Бакутін А.В. Підвищення динамічної точності електропривода головного руху токарного верстата. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», – Дніпропетровськ. – 2016.

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу визначення оптимальних параметрів пристрою керування для мінімізації динамічної похибки за швидкістю при зміні навантаження та отриманні закономірностей впливу коефіцієнтів регулятора швидкості електропривода головного руху металорізального верстата на значення динамічної похибки за швидкістю.

Обґрунтовано вибір структури пристрою керування швидкістю привода головного руху, яка забезпечує мінімізацію динамічної похибки за швидкістю та задовольняє вимогам на складність та практичну реалізацію запропонованого регулятора.

Встановлено функціональні залежності впливу значень коефіцієнтів регулятора швидкості, що залежать від параметрів електромеханічної системи, на показники якості перехідних процесів, як амплітуда динамічної похибки за швидкістю та час відновлення значення швидкості до заданого під час ударного прикладення навантаження.

Розроблено методику розрахунку значень коефіцієнтів регулятора швидкості привода головного руху, що забезпечують зменшення динамічної похибки за швидкістю на 66% та часу відновлення до заданої швидкості на 60 % у порівнянні з існуючими та широко розповсюдженим ПІ-регулятором швидкості.

Експериментально доведено працездатність запропонованого закону керування та отримано підтвердження економічної доцільності від його впровадження в при виготовленні заготівель елементів двигунів внутрішнього згоряння дрібносерійними партіями у кількості 150 шт забезпечило економічний ефект у розмірі 20 тис. грн.

Ключові слова: токарний металорізальний верстат, привод головного руху, багатокритеріальна оптимізація, мінімізація динамічної похибки.

АННОТАЦИЯ

Бакутин А.В. Повышение динамической точности электропривода главного движения токарного станка. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», – Днепропетровск. – 2016.

В диссертационной работе решена научная задача определения оптимальных параметров устройства управления для минимизации динамической ошибки по скорости при изменении нагрузки и получении закономерностей влияния коэффициентов регулятора скорости электропривода главного движения металлорежущего станка на значение динамической ошибки по скорости.

В отличие от существующих систем в работе предложен синтез оптимального регулятора скорости асинхронного двигателя с помощью методов многокритериальной оптимизации для повышения качества работы привода главного движения токарного металлорежущего станка. Критериями качества при этом выступают минимизация динамической ошибки по скорости, время восстановления заданного значения скорости вращения при набросе момента нагрузки с целью сохранения соответствующего режима резания. Синтез регулятора предложено выполнять с помощью методов аналитического конструирования путем минимизации функционалов, которые отображают критерии качества выдвинутые к системе управления.

С помощью модифицированного критерия Гурвица, квадратичных интегральных критериев оптимальности и уравнения Винера-Хопфа были получены передаточные функции совокупности регуляторов скорости от первого до пятого порядков. На основании сравнительного анализа переходных процессов обеспечиваемых полученными регуляторами обоснован выбор структуры управляющего устройства скоростью привода главного движения, которая обеспечивает минимизацию динамической ошибки по скорости и удовлетворяет требованиям сложности и практической реализуемости предложенного регулятора.

Установлены функциональные зависимости влияния коэффициентов регулятора скорости, которые зависят от параметров электромеханической системы, на такие показатели качества переходных процессов, как амплитуда динамической ошибки по скорости и время восстановления значения скорости до заданного при ударном приложении нагрузки.

Получена поверхность отклика функции времени возврата скорости до заданного значения при набросе нагрузки в зависимости от коэффициентов регулятора скорости второго порядка, которая имеет экстремум обеспечивающий максимальное повышение динамической точности системы.

Разработана методика расчета значений коэффициентов регулятора скорости привода главного движения, которые обеспечивают уменьшение динамической ошибки по скорости на 66% и времени восстановления скорости на 60 % по сравнению с существующим и широко используемым ПИ-регулятором скорости.

Разработан алгоритм работы микропроцессорного модуля системы автоматического управления скоростью привода главного движения на основе входной информации о задании на обработку тахограммы скорости вращения шпинделя, значений фазных токов статорной обмотки асинхронного двигателя и измеренной скорости вращения. Получены разностные уравнения для программной реализации пропорционально-интегрального и разработанного в работе законов управления. Обоснованы требования к элементной базе для построения цифровой системы управления на базе автономного инвертора напряжения и микропроцессорного модуля. В лабораторных и экспериментально-промышленных условиях доказана работоспособность предложенного закона управления и получено подтверждение экономической целесообразности от его внедрения в условиях мелкосерийного производства в размере 20 тыс. грн. при изготовлении заготовок элементов двигателей внутреннего сгорания в количестве 150 шт. Достоверность полученных результатов подтверждена отклонением результатов экспериментов от математического моделирования в пределах 10%.

Ключевые слова: токарный металлорежущий станок, привод главного движения, многокритериальная оптимизация, минимизация динамической ошибки.

ABSTRACT

Bakutin A. Extended dynamic accuracy of the turning machine tool main motion drive. – Manuscript

The thesis for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – State Higher Educational Institution «National Mining University», Dnipropetrovsk, Ukraine, 2016.

The scientific problem of the dynamic speed error minimization by the multi-criteria optimization of the speed controller transfer function coefficients for the turning machine tool main motion drive is solved. Main motion speed control device structure is developed, which provides the minimization of the speed dynamic error and satisfies the requirements of the complexity and practical implementation of the proposed controller.

Functional dependences of the speed controller coefficients on such transients quality factors as the magnitude of the dynamic error and speed recovery to a predetermined value time by the step loading condition are determined. Coefficient calculating method of the main motion drive speed controller is developed, which provides the minimization of the dynamic speed error of 2.5 times compared to existing and widely used PI speed controller. The efficiency of the proposed control law is experimentally proven and the confirmation of the implementation economic feasibility in terms of the small-scale production is received.

Keywords: turning machine tool, main motion drive, multi-criteria optimization, dynamic error minimization.

БАКУТІН АНДРІЙ ВАДИМОВИЧ

**ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ГОЛОВНОГО РУХУ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА**

(Автореферат)

Підписано до друку 06.05.2016. Формат 60x90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 394.

Видано «Поліграфцентр» ФО-П Кучугурний Ю.М.
м. Дніпропетровськ, вул. Воскресенська, 11
E-mail: dnepr-2009@yandex.ru
тел.: (056) 735-50-08