

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Маслаков Марко Володимирович

УДК 681.5.09: 62-5

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ БЕЗРЕДУКТОР-
НОГО ВИСОКОШВИДКІСНОГО МОТОР-ШПИНДЕЛЯ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат кваліфікаційної роботи магістра

Краматорськ 2020

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
Квашнін Валерій Олегович, Донбаська
державна машинобудівна академія,
доцент кафедри «Електромеханічні
системи автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 10:00 годині на засіданні державної екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Основними напрямками економічного і соціального розвитку на 1986-1990 роки та на даний момент в верстатобудівній промисловості передбачено забезпечити випереджаючий випуск металорізальних верстатів з числовим програмним управлінням, верстатів типу "обробний центр", важких і унікальних верстатів і пресів, устаткування для автоматизації збирання масових виробів в машинобудуванні, роторних, роторно-конвеєрних та інших автоматичних ліній для машинобудування і металообробки.

Від сучасних машин потрібні високі експлуатаційні та техніко-економічні характеристики, надійність роботи. Проходячи шлях технологічної обробки від вихідного матеріалу до готової деталі в машині, виріб піддається обробці різними технологічними методами.

Одним з головних завдань сучасного машинобудування є розвиток, вдосконалення і розробка нових технологічних методів виготовлення деталей машин. Одне з головних місць в технологічному процесі виготовлення виробів займає обробка металів різанням.

Металорізальні верстати є основним видом заводського обладнання, призначеного для виробництва всіх сучасних машин, приладів, інструментів та інших виробів, тому кількість металорізальних верстатів, їх технічний рівень в значній мірі характеризує виробничу потужність країни.

Істотне місце займає прискорення науково-технічного прогресу на базі технічного переозброєння виробництва, створення високопродуктивних машин і устаткування великої одиничної потужності, впровадження нової техніки і матеріалів, прогресивної технології і систем машин для комплексної механізації і автоматизації виробництва.

Провідне місце в подальшому зростанні економіки країни належить галузям машинобудування, які забезпечують матеріальну основу технічного прогресу всіх галузей народного господарства.

Розробка нових синтетичних надтвердих інструментальних матеріалів дозволило розширити не тільки діапазон режимів різання, а й спектр оброблюваних матеріалів. Підвищення точності верстатів було досягнуто введенням в їх конструкцію вузлів, що реалізують нові принципи (наприклад, використання безконтактних вимірювальних систем).

В даний час розвиток верстатобудівної галузі йде в напрямку підвищення продуктивності металорізальних верстатів, їх надійності і точності на базі застосування

автоматизованих процесів, уніфікованих верстатних модулів, роботизованих технологічних комплексів і обчислювальної техніки.

Актуальність.

Мотор-шпindel, в порівнянні з традиційною конструкцією шпindelних вузлів має невеликі габарити і вагу, що досягаються шляхом специфічної компоновки двигуна і шпindelного вузла.

Конструкція мотор-шпindеля дозволяє проводити безступінчасте регулювання частоти обертання і зменшити розміри і вагу шпindelного вузла завдяки відсутності коробки передач і деяких інших механізмів, а також зробити роботу шпindеля практично безшумною. Однак такий пристрій є конструктивно складним та дорогим, що спонукає нас на пошук аналогів таких мотор-шпindelів на вітчизняному ринку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 01170007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації».

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є імпортозаміщення окремих частин та механізмів електрообладнання закордонного виробництва вітчизняним електрообладнанням, а саме безредукторного високошвидкісного мотор-шпindеля, що використовується в різноманітних металорізальних верстатах в якості заміни ремінної передачі.

Задачами дослідження є:

- аналіз витрат при застосуванні закордонних та вітчизняних мотор-шпindelів;
- аналіз та доведення доцільності використання вітчизняного електрообладнання в порівнянні з закордонним;
- аналіз та вибір електродвигуна вітчизняного виробництва та перевірка на відповідність технічним вимогам;

- проведення розрахунків, побудови та аналізу статичних характеристик вітчизняного електрообладнання на відповідність технічним вимогам;
- розрахунок імітаційних моделей систем керування АД.

Об'єктом дослідження є електропривод безредукторного високошвидкісного мотор-шпинделя.

Предметом дослідження є забезпечення імпортозаміщення окремих частин та механізмів електрообладнання закордонного виробництва вітчизняним електрообладнанням.

Методи досліджень – методи математичного моделювання; чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, розрахунки виконані за допомогою прикладних програм, таких як Mathcad та MatLab Simulink.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблена методика вибору і перевірки двигуна вітчизняного виробництва на відповідність вимогам, що висуваються до приводу безредукторного мотор-шпинделя;
2. На підставі аналізу рівняння механічної характеристики двигуна за параметрами схеми заміщення встановлено, що врахування зміни індуктивного опору роторного кола становить суттєвий вплив на статичні характеристики АД в процесі розгону, що дозволяє отримувати більший критичний момент при незмінній частоті мережі, та напрузі живлення;
3. Розроблена методика побудови сімейства статичних механічних характеристик, яка відрізняється від відомих тим що враховує зміну індуктивного опору роторного кола АД в процесі розгону;
4. На основі обробки статистичних даних сформульовано закон керування електроприводом, який забезпечує формування опорної моментної характеристики у всьому діапазоні регулювання.

Практична цінність роботи

1. Обґрунтовані і синтезовані основні принципи керування мотор-шпинделем, яких достатньо для застосування електроприводу в різноманітних металорізальних верстатах

в якості заміни ремінної передачі;

2. Отримано моделі скалярного та векторного керування АД;

3. Показано, що імпортозаміщення закордонних мотор-шпинделів вітчизняними аналогами є доцільним і економічно вигідним.

Наукова апробація роботи.

Результати досліджень обговорювались на:

– Науково-практичній конференції студентів, аспірантів, професорсько-викладацького складу та співробітників ДДМА., м. Краматорськ, 2020 р. (доповідь на тему «Аналіз існуючих сучасних систем безредукторного електроприводу мотор-шпинделя з метою застосування двигунів вітчизняного виробництва», а також підготовлена до друку стаття по вказаній темі.)

– Інтегровані та нейромережеві технології, м. Краматорськ, 2020 р. (доповідь на тему «Розробка і визначення можливостей запропонованої високошвидкісної системи безредукторного електропривода мотор-шпинделя»).

Публікація результатів наукових досліджень.

За матеріалами конференцій планується публікація тез доповідей та подання наукової статті до друку у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Особистий вклад здобувача. Усі результати магістерської роботи, що вносяться на захист, здобувач отримав особисто. Зокрема аналіз зарубіжних мотор-шпинделів, за яким був обраний вітчизняний аналог електроприводу, виконаний аналіз витрат при застосуванні закордонних та вітчизняних мотор-шпинделів, аналіз та доведення доцільності використання вітчизняного електрообладнання в порівнянні з закордонним, аналіз та вибір електродвигуна вітчизняного виробництва та перевірка на відповідність технічним вимогам, проведення розрахунків, побудови та аналізу статичних характеристик вітчизняного електрообладнання на відповідність технічним вимогам, розрахунок імітаційних моделей систем керування АД.

Структура і обсяг магістерської роботи.

Магістерська робота складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 116

сторінок, 43 рисунка, 20 таблиць. Список використаних джерел містить 30 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету та задачі дослідження.

У **першому розділі** здійснено аналіз сучасних технологій металообробки та опис галузей застосування мотор-шпинделів

Приводи сучасних технологічних машин (металорізальних і прокатних верстатів, ковальсько-пресового устаткування, ливарних машин і ін.) являють собою складні електронно-механічні пристрої для передачі руху від електродвигуна до робочих органів верстата.

Все частіше в головних приводах металорізальних верстатів застосовують мотор-шпинделі, що обумовлено їх відповідністю всім технологічним вимогам: точності числа обертів (1-2% від номінального числа обертів), значення биття шпинделя (менше 1 мкм) і ступеня жорсткості шпинделя. З огляду на те, що шпиндель є основною частиною металорізального верстата і суттєво впливає на показники точності і продуктивності, розглянемо більш докладно використання мотор-шпинделів в такому обладнанні.

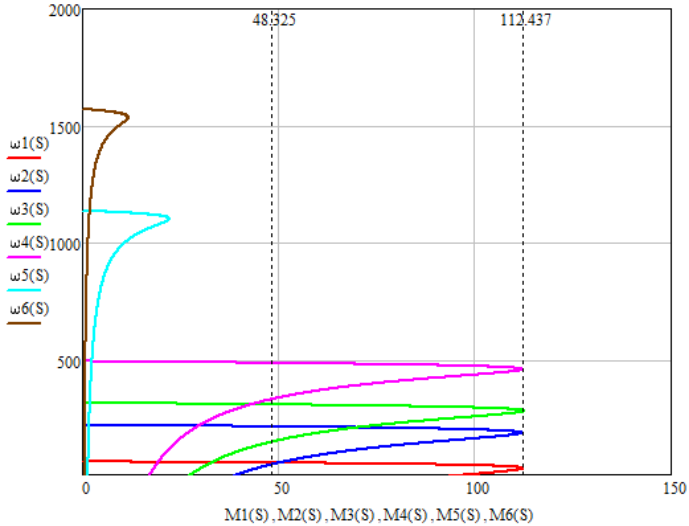
Відзначимо, що мотор-шпиндель є шпиндельний вузол металорізального верстата, в який вбудований електродвигун, а вал двигуна є шпинделем верстата.

Широке поширення мотор-шпинделі отримали в прецизійних багатопільових верстатах (фрезерно-розточувальних верстатах з ЧПУ, шліфувальних, токарних верстатах та ін.). На практиці використовують електродвигуни двох типів: асинхронний і синхронний. Вони відрізняються показниками потужності і частоти обертання.

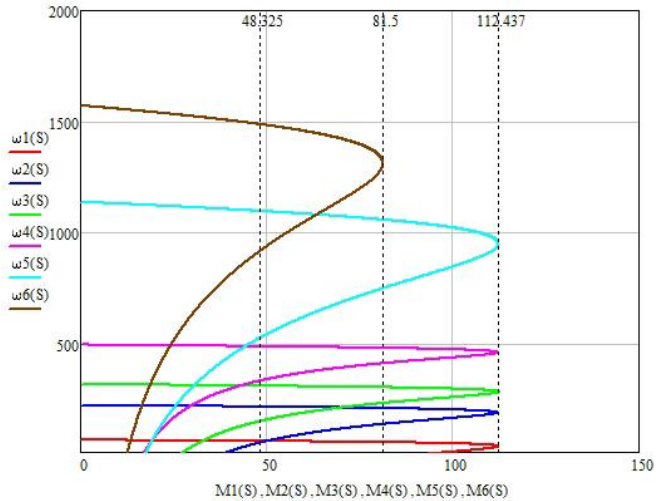
У **другому розділі** виконується розрахунок параметрів та аналіз характеристик двигуна.

У разі використання частотного регулювання стає можливим досягнення

максимальної частоти обертання АД до 15000 об./хв. (при частоті живильної мережі $f_c = 250$ Гц), і регулювання його швидкості в більш широкому діапазоні – від мінімальної необхідної $n_{\min} = 600$ об./хв. до максимальної $n_{\max} = 15000$ об./хв.

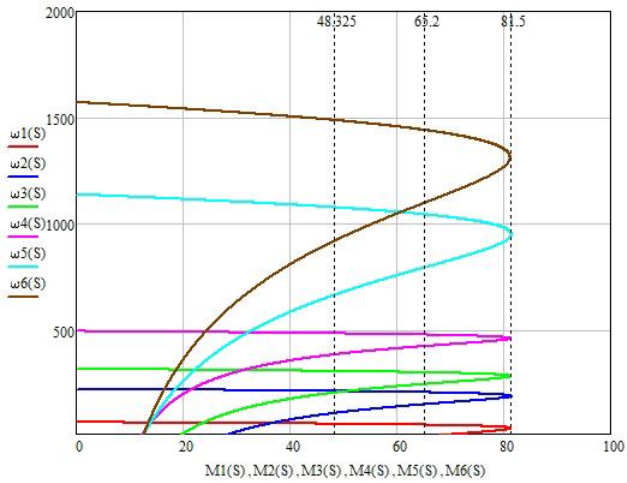


Якщо не враховувати вплив зміни індуктивного опору на статичні характеристики АД в процесі розгону, то максимальна розрахункова частота обертання двигуна при незмінному критичному моменті буде становити 4700 об./хв. при частоті мережі 78.33 Гц і напрузі в мережі 580 В роторного кола.

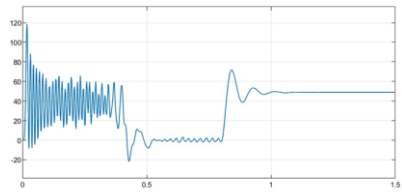
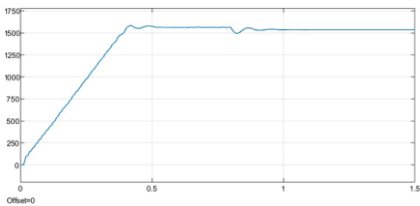
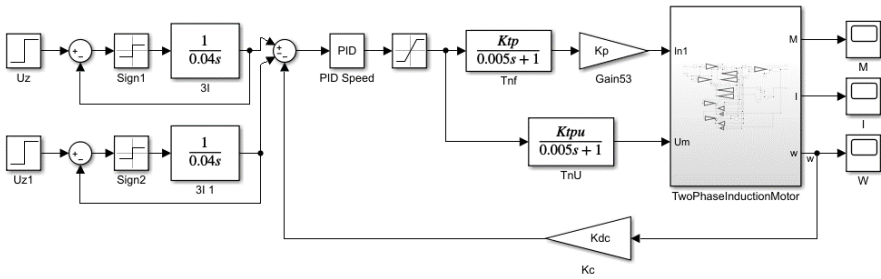


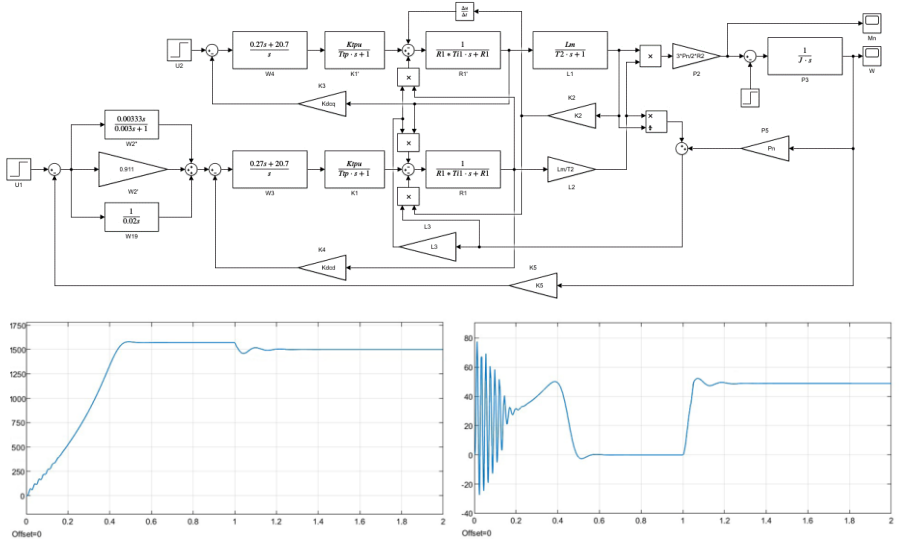
Тепер двигун може утримувати незмінний критичний момент аж до 10850 об./хв. при частоті мережі 250 Гц і напрузі 580 В. Однак на частоті обертання 15000 об./хв. величина критичного моменту падає з 112.437 Н·м, до 81.5 Н·м.

Щоб двигун не працював на межі стійкості, а також для забезпечення плавного регулювання швидкості двигуна при постійному критичному моменті, його критичний момент був обмежений до 81.5 Н·м, а робочий критичний момент становить значення яке на 20% менше обмеженого критичного моменту.



У третьому розділі виконано розрахунок імітаційних моделей скалярної і векторної систем керування.





У четвертому розділі здійснюється вибір допоміжного обладнання.

STM32VL Discovery – вбудований модуль з інтегрованим JTAG –відладчиком на базі мікроконтролера STM32F100RBT6B сімейства STM32Value Line. Робота з платою підтримується в інтегрованому середовищі розробки компаній IAR, Keil, Atollic, а також вільним набором компіляторів GNU Compiler Collection.

Як датчик струму був обраний датчик струму 30A ACS712.



В якості сполучної ланки між контролером і комп'ютером був обраний перехідник PL2303HX USB-TTL UART.



У **п'ятому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано конкурентоспроможність магістерської роботи, рівень наукового ефекту, рівень ефекту практичної значущості, оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по магістерській роботі.

У **шостому розділі** наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, розрахунок захисного заземлення, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці і дії при надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота є актуальною науково-дослідною роботою для промислових електроприводів, в результаті якої вирішено наступні задачі:

- аналіз витрат при застосуванні закордонних та вітчизняних мотор-шпинделів;
- аналіз та доведення доцільності використання вітчизняного електрообладнання в порівнянні з закордонним;
- аналіз та вибір електродвигуна вітчизняного виробництва та перевірка на відповідність технічним вимогам;
- проведення розрахунків, побудови та аналізу статичних характеристик вітчизняного електрообладнання на відповідність технічним вимогам;
- розрахунок імітаційних моделей систем керування АД.

Обмеження що до рекомендацій застосування вказаного двигуна:

1. Вимоги роботи на швидкостях вище природньої синхронної (3000 об/хв.) в 5 разів (до 15000 об/хв.), призводять до суттєвого зростання вимог щодо статичного та динамічного балансування механічної частини електродвигуна та зменшення вібрацій його обертальної частини – ротора.

2. В цьому випадку динамічне навантаження підшипникових вузлів потребує їх додаткової перевірки.

3. Міцність бандажних кріплень роторних пазів також має бути перевірена.

4. При високих швидкостях обертання створюється суттєве зростання прояву динамічного моменту інерції J ротору який теж треба враховувати при керуванні. Щоб покращити динаміку перехідних процесів та динамічних властивостей двигуна взагалі у цьому випадку потребує змін геометрії в конструктиві двигуна з запобіганням до використання роторів більшого діаметру з переходом на ротор меншого діаметру та більшої довжини при однаковій вазі двигуна.

Все це потрібно узгодити з заводом виробником що до можливої розробки спеціальної серії подібних двигунів.

Економічна ефективність запропонованих в магістерській роботі заходів підтверджується у розділі 6, а питання з охорони праці і безпеки при надзвичайних ситуаціях докладно розглянуті у розділі 7.

АНОТАЦІЯ

Маслаков М. В. Розробка та дослідження системи електроприводу безредукторного високошвидкісного мотор-шпинделя.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2020.

Магістерська робота складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 113 сторінок, 43 рисунків, 20 таблиць. Список використаних джерел містить 30 найменувань.

Метою роботи є імпортозаміщення окремих частин та механізмів електрообладнання закордонного виробництва вітчизняним електрообладнанням, а саме безредукторного високошвидкісного мотор-шпинделя, що використовується в різноманітних металорізальних верстатах в якості заміни ремінної передачі.

Основні наукові та практичні результати магістерської роботи:

- Виконаний аналіз витрат при застосуванні закордонних та вітчизняних мотор-шпинделів;
- Виконаний аналіз та доведення доцільності використання вітчизняного електрообладнання в порівнянні з закордонним;
- Виконаний аналіз та вибір електродвигуна вітчизняного виробництва та перевірка на відповідність технічним вимогам;
- Проведені розрахунки, побудови та аналіз статичних характеристик вітчизняного електрообладнання на відповідність технічним вимогам;
- Розраховані імітаційні моделі систем керування АД.

МОТОР-ШПИНДЕЛЬ, СКАЛЯРНЕ КЕРУВАННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, МЕТАЛОРИЗАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ.

ANNOTATION

Maslakov MV Development and research of the electric drive system of gearless high-speed motor-spindle.

Master's thesis in specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, six chapters, general conclusions, and a list of sources used. The total volume of the master's thesis consists of 113 pages, 43 figures, 20 tables. The list of used sources contains 30 names.

The purpose of the work is import substitution of separate parts and mechanisms of electrical equipment of foreign production by domestic electrical equipment, namely gearless high-speed motor-spindle, which is used in various metal-cutting machines as a replacement for belt drive.

The main scientific and practical results of the master's work:

- The analysis of expenses at application of foreign and domestic motor spindles is executed;
- The analysis and proof of expediency of use of the domestic electric equipment in comparison with foreign is executed;
- The analysis and selection of the electric motor of domestic production and check on conformity to technical requirements are executed;
- Calculations, constructions and analysis of static characteristics of domestic electrical equipment for compliance with technical requirements;
- Simulation models of BP control systems are calculated.

MOTOR-SPINDLE, SCALAR CONTROL, VECTOR CONTROL, ASYNCHRONOUS MOTOR, METAL-CUTTING MACHINE.

Маслаков Марко Володимирович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ БЕЗРЕДУКТОР-
НОГО ВИСОКОШВИДКІСНОГО МОТОР-ШПИНДЕЛЯ**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72