

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Морокко Володимир Миколайович

УДК 62-523.8

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ У
ШВИДКОДЮЧИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ З
БАГАТОКОНТУРНИМ ОБ'ЄКТОМ КЕРУВАННЯ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2020

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Шеремет Олексій Іванович,
Донбаська державна машинобудівна
академія, завідувач кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 10:00 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

Дослідження і розробка систем управління і регулювання електроприводів, оптимізованих за швидкістю, розширюються у зв'язку з підвищенням вимог до якості перехідних процесів, вдосконаленням технічних засобів і методів управління. При вирішенні задачі оптимізації необхідно враховувати властивості джерел живлення, двигунів і механізмів, виявляти закономірності управління при параметричних (інерційність) і фізичних обмеженнях, які характеризують межі можливих значень координат переміщення, швидкості, навантаження, прискорення і його похідних.

Результати розробок швидкодіючих систем управління найбільш затребувані при створенні регульованих електроприводів постійного і змінного струму з інтенсивними режимами роботи, які застосовуються в різних галузях, в тому числі в металургії для механізмів прокатних станів і установок механічних випробувань металів. У електроприводи входять системи управління і регулювання, спільно з механізмами технологічних агрегатів вони являють собою електромеханічні системи (ЕМС), що входять до складу автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) на нижньому рівні автоматизації, коли потрібна висока надійність, багаторазове відтворення різноманітних процесів при відносно простих функціях завдання, що змінюється в широкому діапазоні.

Сучасний рівень розвитку ЕМС представлений в основному багатоконтурними «системами підпорядкованого регулювання». Вони створюються в рамках теорії автоматичного регулювання при неповному описі об'єктів з відомим наближенням і використанням квадратичних критеріїв оптимальності перехідних функцій, в тому числі за швидкістю. Однак при управлінні об'єктом з обмеженнями для таких систем доступним є лише відтворення спеціально формованих задавальних впливів, через що знижується швидкодія.

В існуючих ЕМС не отримали широкого впровадження досягнення математичної теорії оптимального управління. Незважаючи на численні дослідження, дослідно-промислова реалізація пристроїв, що використовують в алгоритмах управління методи пошуку меж простору станів в масштабі реального часу, виявилися не систематизованими з причини величезної кількості варіантів і математичної невизначеності. Залишаються недостатньо дослідженим сполучення інтервалів управління і регулювання.

В рамках розвитку швидкодіючих електромеханічних систем залишаються актуальними наступні питання:

- зниження похибки у визначенні величини параметричних обмежень (апроксимації їх фіксованими параметрами аперіодичної ланки явно недостатньо);
- обґрунтування обмежень для систем з багатоконтурними об'єктами, в тому числі при перехресних і пружних зв'язках;
- виявлення нереалізованих процесів на основі аналізу вихідних даних з виключенням невідповідності між вихідними обмеженнями за даними обладнання і фізично реалізованими обмеженнями.

Зв'язок роботи з планами і темами кафедри. Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

Актуальність дослідження і розробки систем управління і регулювання електроприводів, оптимізованих за швидкодією, підвищується у зв'язку зі збільшенням вимог до якості перехідних процесів, вдосконаленням технічних засобів і методів управління. При вирішенні задачі оптимізації необхідно враховувати властивості джерел живлення, двигунів і механізмів, виявляти закономірності управління при параметричних (інерційність) і фізичних обмеженнях, які характеризують межі можливих значень координат переміщення, швидкості, навантаження, прискорення і його похідних.

Метою роботи є дослідження параметричних обмежень у швидкодіючих електромеханічних системах з багатоконтурним об'єктом керування.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні **задачі:**

- проаналізовано загальні вимоги та структура систем керування електроприводами;
- розглянуто рівняння динаміки та передатні елементи силової частини систем керування електроприводами;
- здійснено аналіз обмежень, що впливають на підвищення швидкодії;
- виконана апроксимація внутрішньої лінійної частини системи з неколивальним об'єктом в нелінійній базовій моделі;

– здійснена оцінка впливу пружності на динаміку систем з коливальним об'єктом при зворотних зв'язках по струму і динамічному моменту;

– виконано синтез систем з пружністю методом оптимізації демпфування коливань в контурі прискорення;

– виконано синтез систем з пружністю поліноміальним методом;

– здійснено формування фізично оптимальних перехідних процесів для електромеханічних систем з багатоконтурним об'єктом керування.

Об'єкт дослідження – швидкодіючі електромеханічні системи з багатоконтурним об'єктом керування.

Предмет дослідження – параметричні обмеження, які призводять до зменшення швидкодії електромеханічної системи.

Методи досліджень. В роботі використано загальні положення та методи теорії керування, теорії електроприводу, лінійної алгебри, числові методи розв'язання диференційних рівнянь для розрахунків параметрів систем автоматичного керування електроприводами, перевірка ефективності отриманих теоретичних результатів здійснювалася засобами чисельного моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням сучасних засобів автоматизації математичних і інженерних розрахунків.

Наукова новизна роботи:

1. Розвинена методика розрахунку характеристик нелінійних ланок електромеханічних систем 2 – 4-го порядку з багатоконтурною внутрішньою частиною і визначенням параметричних обмежень, а також областей лінійного та нелінійного управління.

2. В рамках вдосконалення нелінійних систем для різних варіантів поєднання фізичних (амплітудних) обмежень розроблена методика визначення досяжних рівнів фізичних обмежень з використанням алгоритму для формування фізично здійсненних процесів і визначення об'єктивної оцінки часу оптимальних процесів.

3. Для досягнення максимальної швидкодії і підвищення точності формування керуючих впливів методика розрахунку нелінійних характеристик ланок управління доповнена урахуванням властивостей неколивальної лінійної внутрішньої частини, описуваної диференціальним рівнянням високого порядку.

Практична цінність роботи. Проведені дослідження та розробки мають практичну цінність, оскільки за результатами виконаних досліджень можливо створення швидкодіючих електромеханічних систем з багатоконтурним об'єктом керування.

Наукова апробація роботи. Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових конференціях регіонального та міжнародного рівня: IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (16-18 квітня 2020 року), XLII Науково-технічна конференція науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів і студентів (23-27 листопада 2020 року).

Публікація результатів наукових досліджень. Матеріали магістерської роботи опубліковано у двох тезах доповідей регіональних та міжнародних науково-технічних конференцій і одній науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Особистий вклад здобувача. Усі основні результати магістерської роботи, що виносяться на захист, здобувач отримав особисто. Зокрема, проаналізовано загальні вимоги та структура систем керування електроприводами; розглянуто рівняння динаміки та передатні елементи силової частини систем керування електроприводами; здійснено аналіз обмежень, що впливають на підвищення швидкодії; виконана апроксимація внутрішньої лінійної частини системи з неколивальним об'єктом в нелінійній базовій моделі; здійснена оцінка впливу пружності на динаміку систем з коливальним об'єктом при зворотних зв'язках по струму і динамічному моменту; виконано синтез систем з пружністю методом оптимізації демпфування коливань в контурі прискорення; виконано синтез систем з пружністю поліноміальним методом; здійснено формування фізично оптимальних перехідних процесів для електромеханічних систем з багатоконтурним об'єктом керування.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 117 сторінок, в тому числі 17 таблиць по тексту, 21 рисунок по тексту, перелік використаних джерел із 29 найменувань на 3 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** здійснено аналіз стану сучасних розробок та проблеми створення швидкодіючих електромеханічних систем.

Більшість сучасних установок різного призначення, механізмів і пристроїв оснащується регульованими і нерегульованими електроприводами. Сфера застосувань в реалізації технологічних процесів регульованих електроприводів безперервно розширюється. Сучасні автоматизовані електроприводи являють собою електромеханічні комплекси силового і електронного обладнання. Основне завдання таких електроприводів – приведення в рух виконавчих органів технологічної установки і цілеспрямоване управління цим процесом.

Проектування, розробка і регламентація режимів роботи електроприводів технологічних установок виконуються на основі безперервно удосконалюваних інженерних методик, в основі яких лежать результати теоретичних і прикладних досліджень.

У міру розвитку технічних засобів зростають вимоги до електроприводів механізмів як в статичних, так і в динамічних режимах. Зростає актуальність оцінки стійкості і якості динамічних режимів з урахуванням прикладених навантажень і властивостей механізмів (пружні коливання), які ігноруються в багатьох розробках.

У реальних механізмах важливо знати не тільки технологічні навантаження, але і динамічні, обумовлені властивостями приводів при різних режимах роботи. З підвищенням якості систем управління зростає актуальність динамічних розрахунків демпфування як важких, так і легких механізмів з метою активного придушення автоколивань.

Незалежно від призначення і конструктивних особливостей всі механізми мають загальні властивості – пружність ланок і здатність за певних умов до збудження коливальних процесів. Тому теоретичні методи дослідження динамічних явищ в механізмах, включаючи прокатне обладнання, є загальними; відмінність полягає лише в параметрах динамічних систем і режимах технологічного навантаження, що буде позначатися на ступені інтенсивності збудження коливань.

При побудові динамічної моделі пружного механізму необхідно в першу чергу враховувати пружність найбільш піддатливих ланок механічної системи. Практика інженерних розрахунків показує, що в багатьох випадках найбільш податливими виявляються ланки передавальних механізмів. Як правило, здійснюють аналіз динамічної моделі, в якій механічна система представляється у вигляді двох інерційних обертючих мас з одним ступенем рухливості, з'єднаних пружною безінерційною ланкою, що моделює передавальні вали і деталі. Ця динамічна модель при всій своїй простоті відображає багато характерних особливостей поведінки пружних механізмів. Більш складні моделі механізмів з пружністю приводяться до двохмасової схеми за відомими методиками.

У другому розділі здійснено аналіз обмежень, що впливають на підвищення швидкості.

У великій групі багатоконтурних систем управління і регулювання є загальні ознаки і однакові технічні рішення, що зумовлюють якість регульованого електроприводу як в статичних, так і в динамічних режимах. Спостерігається тенденція зближення регульованих величин з координатами руху і наявність жорстких лінійних, негативних зворотних зв'язків по ним. Цим підкреслюються структурна єдність сучасних регульованих електроприводів, єдність математичного опису систем в лінійній області, врахування обмежень параметрів руху.

Використання зв'язку відносно прискорення є особливістю комплексу, що дозволяє підвищити точність управління. Його основною перевагою перед зв'язком по струму (повному моменту) є включення всередину контуру (охоплення) точки прикладання m_c , астатизм по навантаженню при пропорційному регуляторі швидкості.

У зв'язку з тим, що при інтенсивній роботі механізмів основне місце займають перехідні процеси, динамічними режимами при управлінні системами визначаються цілі більшості досліджень. Ці режими характеризуються великими неузгодженості по всіх координатах, зростаючою роллю фізичних (амплітудних) обмежень поряд з параметричними (інерцією), що впливають на ефективність використання високоякісного обладнання.

Загальна структура досліджуваного електроприводу розроблена на основі принципів підпорядкованого регулювання в рамках створення фізично реалізованої нелінійної базової моделі (НБМ).

У загальному випадку в електроприводі в функції кожного регулятора входять нелінійні залежності. При цьому допустима «некомпенсована» інерція всередині системи з будь-якою T_e , що може відповідати класифікації систем підпорядкованого регулювання по швидкодії (низька, помірна і висока).

З урахуванням цього системи регулювання є лінійними і описуються диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами, а їх рішення – перехідні функції – дійсні в межах, поки амплітудні значення координат не досягають фізично обумовленого рівня.

Методика досліджень підвищення якості (стійкості) і швидкодії (скорочення часу) перехідних процесів (перехідних функцій) при заданій їх якості в лінійних системах формулюється на базі теорії автоматичного регулювання в операторній формі (за допомогою перетворення Лапласа). Параметри регуляторів визначаються, виходячи з наближення замкнутої системи до бажаної, для якої відомі якісні показники перехідних функцій, які визначаються по виду передатної функції.

Розвиток розробок систем управління з обмеженнями показує, що необхідно враховувати параметричні і фізичні обмеження, включаючи їх поєднання, що впливають на закономірності формування керуючих впливів для підвищення швидкодії.

У третьому розділі здійснено дослідження параметричних обмежень в електромеханічних системах з багатоконтурним об'єктом керування.

Пружні властивості елементів механізму необхідно в загальному випадку аналізувати на основі балансу енергії руху (коливань) і енергії втрат на внутрішнє (дисипацію) і зовнішнє тертя. Загальні властивості досліджуються на базі представлення механізмів у вигляді пружно-дисипативної двохмасової системи з урахуванням і без урахування впливу керуючої частини (регуляторів).

Спираючись на досконалість технічних засобів, можна реалізувати структурний синтез систем за принципом діакоптіки – каскадного виділення контурів (підсистем). За цим принципом побудовані системи підпорядкованого регулювання, а також розроблена на їх основі нелінійна

базова модель (НБМ) систем. У цих структурах компенсація параметрів (динамічна) виконується в лінійній підсистемі, обмеження і формування завдань – в нелінійній області систем.

Наявність контуру прискорення вносить суттєві корективи в структурні перетворення і призводить до нових висновків стосовно демпфування пружних коливань в механізмах.

Використання методу частотних характеристик розімкнених систем робилося в працях Борцова Ю.А. для вибору параметрів регулятора швидкості. Демпфування коливань неодноразово розглядалося при синтезі систем регулювання. Переважним став аналітичний метод вибору коренів характеристичного полінома замкнених систем з отриманням розрахункової формули для регулятора швидкості з внутрішнім контуром струму (системи 4-го порядку). Аналітичний метод заснований на положенні, яке сформулював Мандельштам Л.І.: найбільше демпфування досягається, якщо характеристичний поліном замкненої системи має дві пари рівних коренів з власною частотою, максимально наближеною до частоти коливань механізму.

Методика демпфування (в одному контурі) ефективна і для систем регулювання швидкості, коли використовується зворотний зв'язок за струмом (повного моменту) двигуна. При цьому в якості ланки з постійною T_e служить замкнений контур струму, а замість регулятора прискорення присутній регулятор швидкості, де T_0 замінено на $T_{м1}$. У цьому виді розглянута методика може бути застосована для електроприводів змінного струму, в яких може бути виділена електромагнітна і електромеханічна інерція. Зокрема, при допущенні $T_e=0$ і врахуванні механічної характеристики асинхронного двигуна можливе формулювання вимог до її параметрів за умовами демпфування.

У **четвертому розділі** виконано дослідження оптимальних процесів в електромеханічних системах з багатоконтурним об'єктом керування.

Отримана у роботі розрахункова формула повністю відображає фізичні і параметричні обмеження. Процеси в моделі з внутрішньою аперіодичною ланкою відрізняються більш високим запасом стійкості так, що створюється враження про можливість подальшого підвищення якості процесу і скорочення його часу. Якщо це відповідає прийнятій T_e , яка більше

реальної, то подібна можливість є, але в межах розрахункових процесів, визначених за реальною T_e .

Більш того, НБМ високого порядку зі складною внутрішньою лінійною частиною, коли вищі похідні не досягають обмежень в нелінійних контурах, може бути представлена НБМ меншого порядку. Частина системи, утворена внутрішніми контурами, стає лінійною з апроксимацією до аперіодичної ланки зі зниженням порядку НБМ. Це характерно при малій швидкодії, коли нелінійність найчастіше проявляється тільки в зовнішніх контурах.

Слід зазначити, що певні труднощі становить спосіб оцінки фактичного часу перехідного процесу «у великому», оскільки розрахунковий час визначається в момент точного збігу фактичного значення вихідної координати із заданим при всіх нульових похідних. На практиці такого не спостерігається, тому вдаються до оцінки часу перехідного процесу, аналогічного для перехідних функцій.

У **п'ятому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по тематиці кваліфікаційної роботи магістра.

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

ВИСНОВКИ

У даній роботі досліджене актуальне питання оптимізації за швидкістю електромеханічних системах з урахуванням обмежень в об'єкті управління. При цьому було отримано ряд нових наукових і практично значущих результатів.

В рамках вдосконалення нелінійних систем для різних варіантів поєднання фізичних (амплітудних) обмежень розроблена методика визначення досяжних рівнів фізичних обмежень з використанням алгоритму для формування фізично здійсненних процесів і визначення об'єктивної оцінки часу оптимальних процесів.

Виконаний аналіз стійкості багатоконтурної лінійної (неколивальної) внутрішньої частини системи, що відноситься до об'єкту, дозволив обґрунтувати її апроксимацію аперіодичною ланкою з еквівалентною сталою часу T_e , що визначається на основі інтегральної оцінки процесів.

Для досягнення максимальної швидкодії і підвищення точності формування керуючих впливів методика розрахунку нелінійних характеристик ланок управління доповнена урахуванням властивостей неколивальної лінійної внутрішньої частини, описуваної диференціальним рівнянням високого (більше другого) порядку.

Методика розрахунку характеристик нелінійних ланок управління доповнена урахуванням властивостей коливального об'єкту з визначенням розрахункових меж досяжної швидкодії і демпфуючих регуляторів.

АНОТАЦІЯ

Морокко В. М. Дослідження параметричних обмежень у швидкодіючих електромеханічних системах з багатоконтурним об'єктом керування.

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

Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 117 сторінок, в тому числі 17 таблиць по тексту, 21 рисунок по тексту, перелік використаних джерел із 29 найменувань на 3 сторінках.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. Розвинена методика розрахунку характеристик нелінійних ланок електромеханічних систем 2 – 4-го порядку з багатоконтурною внутрішньою частиною і визначенням параметричних обмежень, а також областей лінійного та нелінійного управління.

2. В рамках вдосконалення нелінійних систем для різних варіантів поєднання фізичних (амплітудних) обмежень розроблена методика визначення досяжних рівнів фізичних обмежень з використанням алгоритму для формування фізично здійсненних процесів і визначення об'єктивної оцінки часу оптимальних процесів.

3. Для досягнення максимальної швидкодії і підвищення точності формування керуючих впливів методика розрахунку нелінійних характеристик ланок управління доповнена урахуванням властивостей неколивальної лінійної внутрішньої частини, описуваної диференціальним рівнянням високого порядку.

Ключові слова: ПАРАМЕТРИЧНІ ОБМЕЖЕННЯ, НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ, ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ, ПІДПОРЯДКОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ

ANNOTATION

Morokko V. M. Parametric constraints research in high-speed electromechanical systems with a multi-circuit control object.

Master's thesis in specialty 141 – "Electricity, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

Master's thesis consists of an introduction, six sections, general conclusions, a list of sources used.

The total volume of the master's work is 117 pages, including 17 tables on the text, 21 figures on the text, the list of the used sources from 29 names on 3 pages.

The main scientific results of the master's thesis:

1. The technique of calculation of characteristics of nonlinear links of electromechanical systems of the 2nd - 4th order with a multi-circuit internal part and definition of parametric restrictions, and also areas of linear and nonlinear management is developed.

2. As part of the improvement of nonlinear systems for different combinations of physical (amplitude) constraints developed a method of determining achievable levels of physical constraints using an algorithm to form physically feasible processes and determine an objective estimate of the time of optimal processes.

3. To achieve maximum speed and increase the accuracy of the formation of control effects, the method of calculating the nonlinear characteristics of the control units is supplemented taking into account the properties of the non-oscillating linear inner part described by a high-order differential equation.

Keywords: PARAMETRIC LIMITATIONS, NONLINEAR MODEL, REGULATING SYSTEM SYNTHESIS, OSCILLATIONS DAMPING, SUBORDINATE REGULATION

Морокко Володимир Миколайович

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ У
ШВИДКОДЮЧИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ З
БАГАТОКОНТУРНИМ ОБ'ЄКТОМ КЕРУВАННЯ**

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