

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

РУДНЄВ ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ



УДК 62-83: 681.5

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНИХ СИСТЕМ
КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО
СТРУМУ ІЗ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем імені проф. А.Б. Зеленова Донбаського державного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Алчевськ.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Полілов Єгор Володимирович,
Донбаський державний технічний університет,
доцент кафедри автоматизованих
електромеханічних систем імені проф. А.Б. Зеленова

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Науково-технічний центр магнетизму
технічних об'єктів Національної академії
наук України, завідувач відділу проблем
управління магнітним полем

кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
доцент кафедри автоматизованих
систем електричного транспорту

Захист відбудеться «14» БЕРЕЗНЯ 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «4» ЛЮТОГО 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. В. Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При синтезі систем керування зазвичай передбачається, що характеристики об'єкта керування (ОК) відомі точно і в процесі роботи залишаються незмінними. Для цих режимів роботи структуру і параметри регуляторів рекомендується визначати методами стандартних передавальних функцій, за критеріями модульного, симетричного і компромісного оптимумів.

Практика проектування і експлуатації систем керування промисловими об'єктами показала, що системи, синтезовані за критеріями модульного і симетричного оптимумів, а також за квадратичними критеріями якості, чутливі до змін параметрів ОК, характеристики вхідних, збурюючих впливів, до змін структури та параметрів моделі об'єкта, яка використовується в контурах управління. Такі системи можуть втрачати і оптимальність, і працеспроможність, якщо інформація про об'єкт і середовище функціонування відома з деякою вірогідністю або невизначеністю. Невизначеність (похибка) у моделі і знаннях про зовнішнє середовище призводить до вирішення задачі синтезу регулятора і системи керування в цілому в умовах цієї невизначеності.

Для промислового електроприводу (ЕП) особливо значущі зміни моменту навантаження, моменту інерції обертових частин, напруги живлення і характеристик навколишнього середовища (температура, вібрація). Ці зміни впливають як на жорсткість механічних характеристик, так і на якість перехідних процесів.

Внаслідок цього останнім часом отримали розвиток методи синтезу робастних систем керування, які забезпечують необхідну якість роботи при зміні характеристик впливів і нестабільності параметрів ОК в широкому діапазоні. Робастний регулятор при наявності невизначеностей забезпечує робастність і якість для всіх допустимих невизначеностей. Вирішення задачі синтезу робастних регуляторів пов'язане з потребами в зниженні необхідного обсягу апріорної інформації про ОК, прагненням до універсальності керуючих систем і скорочення витрат на їх налагодження. У зв'язку з цим розробка методу синтезу робастних систем керування синхронним ЕП є актуальною науково-технічною задачею та визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем (АЕМС) імені проф. А. Б. Зеленова ДонДТУ за напрямком «Енергетика та енергозбереження» згідно з держбюджетною науково-дослідною роботою МОНмолодьспорту України «Розробка теорії релейно-робастного управління функціонально і параметрично невизначеними електромеханічними об'єктами» (ДР № 0110U000095), а також науковою тематикою кафедри АЕМС імені проф. А. Б. Зеленова «Розробка енергозберігаючих електромеханічних систем постійного і змінного струму», де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності стабілізації та якості регулювання швидкості електроприводів змінного струму із синхронними двигунами, які функціонують в умовах неповної інформації про об'єкт та з урахуванням параметричної невизначеності методами H_{∞} -теорії робастного керування.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення наступних задач:

- розробка математичних моделей одномасового і двомасового синхронного ЕП з урахуванням невизначеностей, представлених як лінійно-дробові перетворення (ЛДП), які необхідні для аналізу та синтезу робастних САР;
- синтез робастних систем автоматичного регулювання (САР) з H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості одномасового і двомасового синхронного ЕП методами H_∞ -теорії з метою доказу можливості застосування алгоритмів для заданої стабілізації та регулювання швидкості, а також забезпечення необхідного ступеня чутливості до параметричних і координатних збурень діючих на об'єкт;
- застосування методу синтезу робастних регуляторів, який враховує вимоги до якості перехідних процесів регульованої координати в САР;
- проведення аналізу роботи синтезованих робастних САР з H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях в середовищі MATLAB / Simulink;
- програмна реалізація синтезованих робастних алгоритмів керування;
- проведення експериментальних досліджень роботи синхронного ЕП з отриманими робастними H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості задля перевірки основних теоретичних висновків і результатів математичного моделювання з метою підтвердження їхньої адекватності.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси в синхронному електроприводі при різних поєднаннях задавальних та збурюючих впливів.

Предметом дослідження – робастна система керування синхронного електропривода, що забезпечує необхідну стабілізацію та регулювання швидкості двигуна в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного та робастного керування, на базі яких були побудовані математичні моделі синхронних двигунів як об'єктів керування з урахуванням невизначеностей. Розрахунок матриць передавальних функцій регуляторів і об'єкта управління, як в символьному, так і в чисельному вигляді проводився на ЕОМ з використанням системи MATLAB / Robust Control Toolbox. Достовірність отриманих основних теоретичних положень і результатів підтверджувалася з використанням чисельного моделювання шляхом застосування системи MATLAB/Simulink і експериментальними дослідженнями на діючій лабораторній установці.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше отримано математичний опис одномасового та двомасового синхронного ЕП з урахуванням невизначеностей, представлених як ЛДП, які необхідні для аналізу та синтезу робастних систем регулювання;
- стосовно до синхронного ЕП показана можливість використання робастних систем керування для заданої стабілізації швидкості. При цьому поряд зі стабілізацією швидкості обертання синхронних електродвигунів забезпечується одержання необхідних статичних і динамічних показників якості системи при забезпеченні низької чутливості електромеханічної системи до координатних і параметричних збурювань;

- одержали подальший розвиток методи синтезу робастних регуляторів при керуванні швидкості обертання синхронних електродвигунів;

- вперше наведені практичні рекомендації з вибору вагових функцій, використовуваних в H_∞ -теорії керування для забезпечення необхідної якості перехідних процесів і додання системі властивостей робастності. Показана можливість незалежного управління швидкодією, усталеною похибкою і характером протікання перехідних процесів регульованої координати в синтезованій САР;

- доведено, що вагові функції, які включені в узагальнений (стандартний) об'єкт для синтезу робастного регулятора, є «органами управління / налаштування» характеристик якості замкненої робастної системи керування;

- розроблено алгоритм визначення параметрів вагових функцій для досягнення заданих характеристик якості замкненої робастної САР.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені практичні рекомендації щодо синтезу робастного керування можуть бути використані при проектуванні електроприводів постійного і змінного струму в умовах неповної інформації про об'єкт та з урахуванням його параметричної невизначеності.

Розроблені програмні додатки з використанням розширення MATLAB / Robust Control Toolbox які дозволяють проектувати робастні САР для електромеханічних об'єктів n -го порядку, а також можуть бути інтегровані в інші системи автоматичного проектування.

Розроблений експериментальний стенд для дослідження робастних алгоритмів управління синхронним ЕП. Проведено експериментальні дослідження роботи ЕП, які підтверджують ефективність високоточних грубих, квазі-інваріантних до координатних і параметричних збурень синтезованих алгоритмів керування.

Результати дисертаційної роботи передані для впровадження і використання на ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» (м. Алчевськ). Теоретичні положення, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються в наукових дослідженнях і в навчальному процесі кафедри АЕМС імені проф. А. Б. Зеленова ДонДТУ.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них – математичний опис одномасового та двомасового синхронного ЕП як ОК з урахуванням невизначеностей; синтез робастних САР з H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості одномасового і двомасового синхронного ЕП; розробка практичних рекомендацій з вибору вагових функцій, використовуваних в H_∞ -теорії керування для забезпечення необхідної якості перехідних процесів і додання системі властивостей робастності; розробка програмних додатків з використанням розширення MATLAB / Robust Control Toolbox які дозволяють проектувати робастні САР для електромеханічних об'єктів n -го порядку; проведення математичного моделювання на ЕОМ і експериментальних досліджень на створеному здобувачем лабораторному стенді.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта,

2009 р., 2010 р., м. Одеса, 2011 р., смт. Миколаївка, 2012 р.); «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2008 – 2011 р.р.); «Керування режимами роботи об'єктів електричних електромеханічних систем» (м. Святогірськ, 2011 р.), на науково-технічній конференції «Електрообладнання та засоби автоматизації передових технологій» (м. Алчевськ, 2008 – 2011 р.р.), науково-технічній конференції молодих спеціалістів на ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» (м. Алчевськ, 2008 р.) та на щорічних семінарах Наукової ради НАН України «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» ДонДТУ (м. Алчевськ).

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковані у 18 наукових працях у фахових наукових виданнях України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків і 4-х додатків. Повний обсяг дисертації складає 225 сторінок, з них 45 рисунків та 1 таблиця по тексту, 55 рисунків на 50 сторінках; список використаних джерел зі 118 найменувань на 14 сторінках; 4 додатки на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, вказане практичне значення отриманих результатів, а також рівень апробації результатів роботи, наведено кількість публікацій за темою роботи и особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведений аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку теорії робастного керування. Класи задач робастного керування: класи параметричних(структурованих) і непараметричних (неструктурованих) невизначеностей. Показано суть методу H_∞ -оптимізації: замкнена динамічна система розглядається як деяка ланка, яка характеризується матричною передавальною функцією (МПФ) $\mathbf{H}(s, \mathbf{K})$, залежною від МПФ регулятора $\mathbf{K}(s)$. Метою керування є мінімізація похибки управління з мінімально можливим керуючим сигналом (з метою економії енергетичних ресурсів управління). Очевидно, що чим менше буде матричний коефіцієнт $\mathbf{H}(s, \mathbf{K})$, тим сильніше буде заглушення зовнішнього збурення, тим краще буде якість стеження. У зв'язку з цим формулюється задача про найкраще заглушення зовнішніх збурень, що впливають на замкнену систему, шляхом зменшення матричного коефіцієнта $\mathbf{H}(s, \mathbf{K})$ за рахунок вибору МПФ регулятора $\mathbf{K}(s)$.

Розглянуті задачі керування синхронним електроприводом та існуючі способи їх вирішення.

Другий розділ роботи присвячений математичному опису синхронних двигунів (СД) як об'єктів керування, а також розробці математичних моделей одномасового та двомасового синхронного ЕП з урахуванням невизначеностей, представлених як ЛДП.

В роботі представлено математичні моделі явнополюсних і неявнополюсних синхронних двигунів із електромагнітним збудженням та синхронно-реактивних. Подальші математичні викладки стосовно синтезу робастних алгоритмів керування швидкістю обертання різноманітних СД розглянуто на прикладі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) типу 1FT6044-1AF71-3DG1 концерну Siemens ($P_H = 1,35$ кВт, $n_H = 3000$ об/хв, $U_H = 340$ В, $M_H = 4,3$ Нм, $J = 0,51 \cdot 10^{-3}$ кг·м²), моментоутворювальний контур статорного струму якого є незмінним для вищезгаданих типів електричних машин.

Рівняння, які описують динаміку СДПМ в ортогональній системі координат dq, яка жорстко зв'язана з ротором машини:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{3p_0\Psi_f}{2J}i_q + \frac{3p_0}{2J}L_d - L_q i_d i_q - \frac{1}{J}M_{\text{мех}}; \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + p_0\omega_{rm}\frac{L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}u_d; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - p_0\omega_{rm}\frac{L_d}{L_q}i_d - p_0\omega_{rm}\frac{\Psi_f}{L_q} + \frac{1}{L_q}u_q; \\ M_\vartheta = \frac{3}{2}p_0\Psi_f i_q + L_d - L_q i_d i_q, \end{cases} \quad (1)$$

де $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q$ - напруги, струми та потокозчеплення в системі координат ротора по d- і q-осям; R_s - опір фази статора, Ом; L_d і L_q - повні індуктивності поздовжньої (d) і поперечної (q) осі, Гн; Ψ_f - потокозчеплення постійних магнітів на роторі, постійна величина, що розглядається як потокозчеплення обмоток фаз статора; p_0 - число пар полюсів машини; $\omega_{rm} = \omega_r / p_0$ - механічна кутова частота обертання ротора, рад/с; J - момент інерції обертових мас, приведений до валу машини, кг·м²; M_ϑ - електромагнітний момент, Нм; $M_{\text{мех}}$ - механічний момент, прикладений до валу машини як задана функція часу, Нм; $\omega_r = d\theta_r / dt$ - електрична кутова швидкість ротора ($\omega_r = p_0\omega_{rm}$), яка вимірюється в електричних радіанах за секунду; θ_{rm} - механічний кут повороту ротора; $\theta_r = p_0\theta_{rm}$ - електричний кут повороту ротора.

В результаті лінеаризації та декомпозиції системи ($i_d = 0$) отримаємо систему лінійних диференціальних рівнянь, що описує ОК

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}R_s i_q - k_e \omega_{rm} + u_q; \\ \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J}k_t i_q - M_{\text{мех}}; \\ M_\vartheta = \frac{3}{2}p_0\Psi_f i_q = k_t i_q. \end{cases} \quad (2)$$

Позначимо відносні фазові координати:

$$x_1 = \frac{\omega_{\text{rm}}}{\omega_{\text{rmm}}}; \quad x_2 = \frac{i_{\text{q}}}{i_{\text{qm}}}; \quad x_3 = \frac{u_{\text{q}}}{u_{\text{qm}}}; \quad u = \frac{U_{\text{yq}}}{U_{\text{yqm}}}, \quad (3)$$

приймавши в якості базових величин максимальні значення абсолютних координат. Система рівнянь ОК у відносних одиницях має вигляд:

$$\begin{cases} px_1 = a_{12}x_2; \\ px_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3; \\ px_3 = a_{33}x_3 + b_3u, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } a_{12} = \frac{k_t i_{\text{qm}}}{J \omega_{\text{rmm}}}; \quad a_{21} = -\frac{p_0 \Psi_m \omega_{\text{rmm}}}{L_q i_{\text{qm}}}; \quad a_{22} = -\frac{R_s}{L_q}; \quad a_{23} = \frac{u_{\text{qm}}}{L_q i_{\text{qm}}}; \quad a_{33} = -\frac{1}{T_\mu}.$$

У реальній системі три фізичних параметри: J , L_q і R_s або точно не відомі, або змінюються в процесі роботи. Приймаємо, що їх значення полягають у відомих інтервалах, тобто:

$$\begin{aligned} J &= \bar{J}(1 + p_J \delta_J); \\ L_q &= \bar{L}_q(1 + p_{L_q} \delta_{L_q}); \\ R_s &= \bar{R}_s(1 + p_{R_s} \delta_{R_s}); \end{aligned} \quad (5)$$

де \bar{J} , \bar{L}_q , \bar{R}_s - номінальні значення параметрів: J , L_q та R_s ; p_J , p_{L_q} , p_{R_s} й δ_J , δ_{L_q} , δ_{R_s} є можливими (відносними) відхиленнями цих трьох параметрів. Приймаємо $p_J = 0,4$, $p_{L_q} = 0,2$, $p_{R_s} = 0,3$ та $-1 \leq \delta_J$, δ_{L_q} , $\delta_{R_s} \leq 1$. Задаємо невизначеності: 40% - момент інерції; 20% - повна індуктивність поперечної осі; 30% - опір статора.

Ці постійні величини J , L_q та R_s (що розглядаються в якості невизначеностей) замінимо блок-схемами складових \bar{J} , p_J , δ_J та ін. (рис. 1). Відношення $\frac{1}{J}$ представимо як верхнє лінійно-дробове перетворення у функції невизначеності δ_J . Верхнє ЛДП визначимо як функцію:

$$f(\delta) = \frac{\alpha + \beta\delta}{1 + \gamma\delta} = \alpha + \beta\delta \frac{1 - \gamma\delta^{-1}}{1 + \gamma\delta^{-1}} = \mathbf{F}_U \mathbf{M}, \delta, \quad (6)$$

$$\text{де } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\gamma & 1 \\ \beta - \alpha\gamma & \alpha \end{bmatrix}.$$

У виразах (7-9) фізичні параметри J , L_q та R_s представлені як верхнє ЛДП у функціях невизначеності δ_J , δ_{L_q} та δ_{R_s} . Розглянути невизначені параметри у вигляді ЛДП зображені структурними схемами на рисунку 1. На рисунку 2 приведені структурні схеми ОК з невизначеними параметрами J , L_q та R_s , представленими як верхнє ЛДП.

Момент інерції J задається як невизначений параметр

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{\overline{J}(1 + p_J \delta_J)} = \frac{1/\overline{J}}{(1 + p_J \delta_J)} = \mathbf{F}_U(\mathbf{M}_J, \delta_J), \quad (7)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{1}{\overline{J}}, \beta = 0, \gamma = p_J, \mathbf{M}_J = \begin{bmatrix} -p_J & 1/\overline{J} \\ -p_J & 1/\overline{J} \end{bmatrix}.$$

Параметри L_q та R_s також представлені як верхнє ЛДП в δ_{L_q} та δ_{R_s}

$$\frac{1}{L_q} = \frac{1}{\overline{L}_q(1 + p_{L_q} \delta_{L_q})} = \frac{1/\overline{L}_q}{(1 + p_{L_q} \delta_{L_q})} = \mathbf{F}_U(\mathbf{M}_{L_q}, \delta_{L_q}), \quad (8)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{1}{\overline{L}_q}, \beta = 0, \gamma = p_{L_q}, \mathbf{M}_{L_q} = \begin{bmatrix} -p_{L_q} & 1/\overline{L}_q \\ -p_{L_q} & 1/\overline{L}_q \end{bmatrix}.$$

$$R_s = \overline{R}_s(1 + p_{R_s} \delta_{R_s}) = \mathbf{F}_U(\mathbf{M}_{R_s}, \delta_{R_s}), \quad (9)$$

$$\text{де } \alpha = \overline{R}_s, \beta = p_{R_s} \overline{R}_s, \gamma = 0, \mathbf{M}_{R_s} = \begin{bmatrix} 0 & \overline{R}_s \\ p_{R_s} & \overline{R}_s \end{bmatrix}.$$

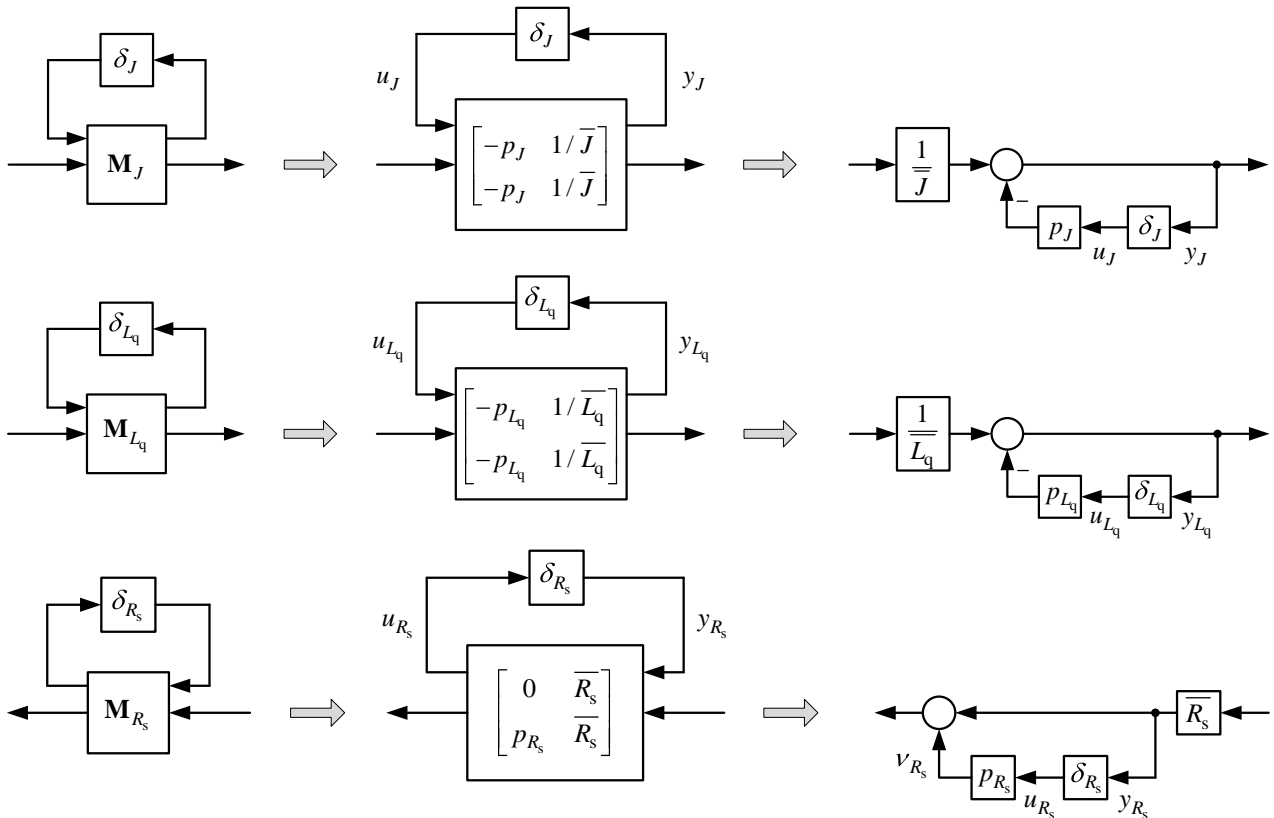


Рис. 1. Представлення невизначених параметрів J , L_q та R_s як верхнє ЛДП в функціях невизначеності δ_J , δ_{L_q} та δ_{R_s}

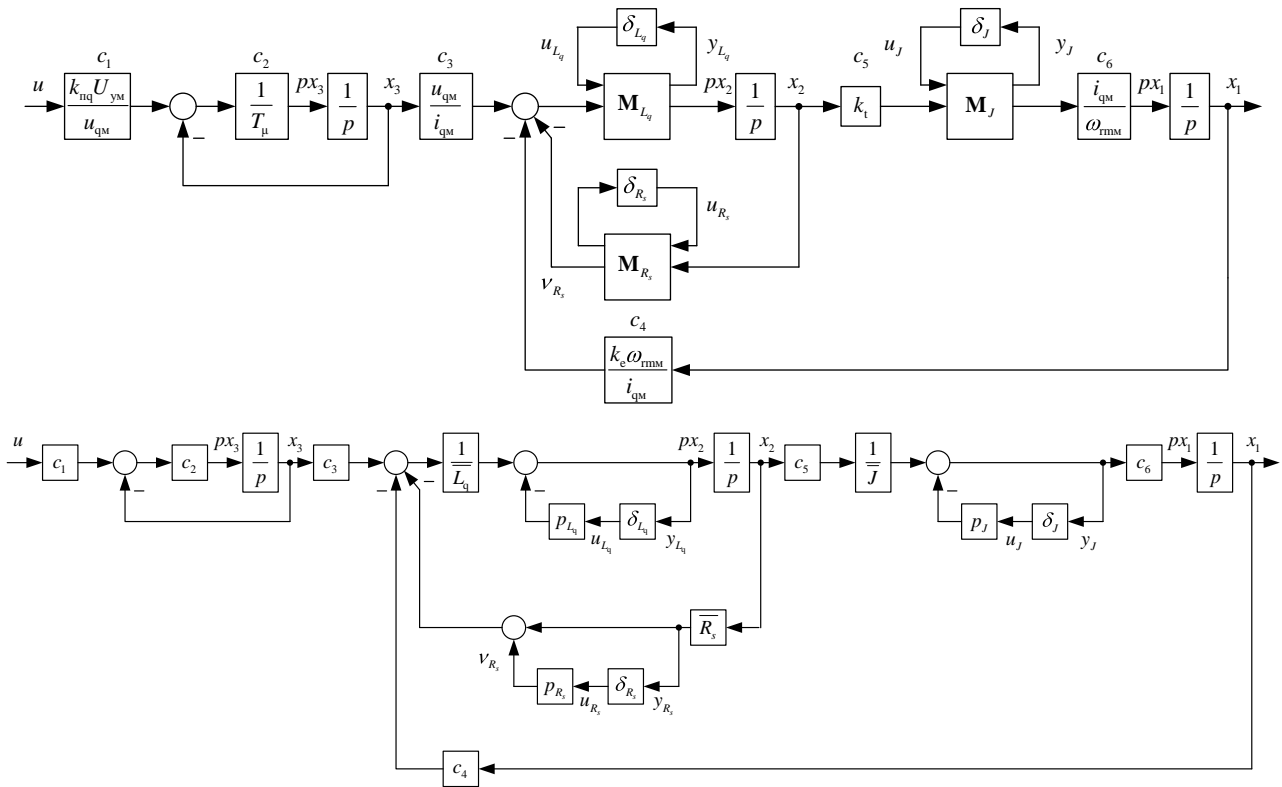


Рис. 2. Структурні схеми ОК з невизначеними параметрами J , L_q та R_s , представлені як верхнє ЛДП

Рівняння, що описують динаміку системи в просторі стану (рис. 3):

$$\begin{bmatrix} px_1 \\ px_2 \\ px_3 \\ y_J \\ y_{L_q} \\ y_{R_s} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_5 / \bar{J} & 0 & -p_J c_6 & 0 & 0 & 0 \\ -c_4 / \bar{L}_q & -\bar{R}_s / \bar{L}_q & c_3 / \bar{L}_q & 0 & -p_{L_q} & -p_{R_s} / \bar{L}_q & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & c_1 c_2 \\ \hline 0 & c_5 / \bar{J} & 0 & -p_J & 0 & 0 & 0 \\ -c_4 / \bar{L}_q & -\bar{R}_s / \bar{L}_q & c_3 / \bar{L}_q & 0 & -p_{L_q} & -p_{R_s} / \bar{L}_q & 0 \\ 0 & \bar{R}_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ u_J \\ u_{L_q} \\ u_{R_s} \\ u \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} u_J \\ u_{L_q} \\ u_{R_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_J & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{R_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_J \\ y_{L_q} \\ y_{R_s} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Аналогічним чином отриманий математичний опис двомасового синхронного ЕП з урахуванням невизначеностей. Як невизначені параметри розглянуті k_{nq} , L_q , R_s і J_2 двомасового синхронного ЕП.

У третьому розділі синтезовані робастні регулятори швидкості одномасового та двомасового синхронного ЕП, які дозволяють забезпечити високі динамічні і точнісні характеристики роботи ЕП, знизити його чутливість до зміни

параметрів. В H_∞ -теорії стандартна задача H_∞ -керування (задача мінімізації енергії виходу) розв'язується за допомогою рішення двох алгебраїчних рівнянь Ріккати і пов'язана зі структурною схемою, представленою на рисунку 3 а. МПФ \mathbf{P}_s представляє не тільки сам об'єкт, яким необхідно керувати, але і т.зв. вагові функції, які використовуються для забезпечення бажаної якості. Такого роду об'єкт називається узагальненим (розширеним) об'єктом (див. рис. 3 б).

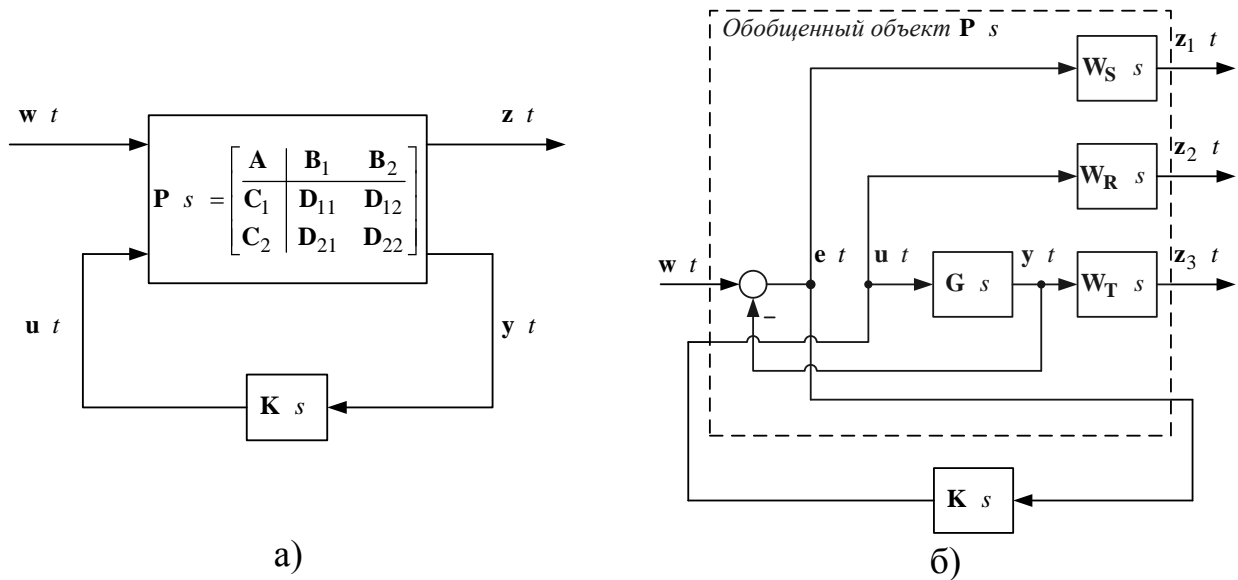


Рис. 3. Структурні схеми синтезованої системи (а) та узагальненого об'єкта (б)

На рис. 3 прийняті наступні позначення: $w(t)$ – вектор зовнішніх впливів (задавальних та збурюючих вплив, завада у вимірах); $y(t)$ – вектор вимірюваного виходу; $u(t)$ – вихідний вектор регулятора (вектор керуючих впливів); $z(t)$ – вектор похибки, використовуваний для контролю якості САР. \mathbf{G}_s – МПФ об'єкта керування; \mathbf{K}_s – робастний регулятор; \mathbf{P}_s – МПФ узагальненого об'єкта з урахуванням вагових функцій $\mathbf{W}_S s$, $\mathbf{W}_R s$ и $\mathbf{W}_T s$.

Після завдання вагових матриць існуюча система розширюється так, що вона включає в себе рівняння цих матриць як додаткові фазові координати. Розширена система для синтезу регулятора являє собою узагальнений об'єкт. Узагальнений об'єкт (див. рис. 3) має два входи (w і u), два виходи (z і y) і може бути розділений на чотири МПФ:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_S & -\mathbf{W}_S \mathbf{G} \\ 0 & \mathbf{W}_R \\ 0 & \mathbf{W}_T \mathbf{G} \\ \mathbf{I} & -\mathbf{G} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$\mathbf{F}_L(\mathbf{P}, \mathbf{K})$ – це МПФ замкненої системи від входу збурення w до виходу похибки (контрольована змінна) z , \mathbf{T}_{zw} , яка отримана шляхом нижнього ЛДП:

$$z = \mathbf{T}_{zw} w = \mathbf{F}_L(\mathbf{P}, \mathbf{K}) w, \quad (13)$$

$$\mathbf{T}_{zw} = \mathbf{F}_L(\mathbf{P}, \mathbf{K}) = \mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{12} \mathbf{K} \mathbf{I} - \mathbf{P}_{22} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{P}_{21}. \quad (14)$$

Всі вимоги до системи по ослабленню збурень і забезпеченню запасу стійкості зводяться до єдиної вимоги до норми

$$\|\mathbf{T}_{zw}\|_{\infty} \leq 1, \quad (15)$$

де

$$\mathbf{T}_{zw} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_S \mathbf{S} \\ \mathbf{W}_R \mathbf{R} \\ \mathbf{W}_T \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (16)$$

– функція вартості методу змішаної чутливості. Задачею H_{∞} -оптимізації є вибір такого регулятора \mathbf{K} , який би мінімізував нескінченну норму \mathbf{T}_{zw} або $\min \|\mathbf{T}_{zw}\|_{\infty}$. Причому вибір оптимального регулятора \mathbf{K} здійснюється над безліччю всіх регуляторів, що володіють властивістю робити замкнену систему внутрішньо стійкою, тобто над множиною стабілізуючих регуляторів.

Для створення узагальненого об'єкта використовувались вагові функції:

$$\mathbf{W}_S = \frac{s/M + \omega_0}{s + \omega_0 A}; \quad \mathbf{W}_R = const, \quad (17)$$

де A - бажана максимально допустима усталена помилка в усталеному режимі; ω_0 s^{-1} - бажана смуга пропускання; M - пік чутливості. Вагова функція додаткової чутливості \mathbf{W}_T не використовувалася.

Вибір вагових функцій є неоднозначною задачею, що вимагає для свого рішення достатнього досвіду розробника, а також застосування методу проб і помилок. Від вибору цих частотних характеристик залежить також і можливість довести рішення задачі H_{∞} -керування до кінця. При цілеспрямованій зміні параметрів вагових функцій A , M і ω_0 можна досягти бажаних характеристик якості замкненої системи керування (рис. 4).

Для синтезу робастного регулятора з використанням «Два-Ріккати підходу» необхідне створення стандартного об'єкта, який задається у вигляді:

$$\mathbf{P}(s) =: \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_1 & 0 & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_{21} & 0 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

система (рис. 3 а) описується наступною системою рівнянь у просторі стану:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{21}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{y}(t). \end{cases} \quad (19)$$

Об'єкт (18) в даній постановці володіє наступними властивостями:

- а) пара \mathbf{A}, \mathbf{B}_1 - стабілізована, пара \mathbf{A}, \mathbf{C}_1 - детектувальна;
- б) пара \mathbf{A}, \mathbf{B}_2 - стабілізована, пара \mathbf{A}, \mathbf{C}_2 - детектувальна;
- в) $\mathbf{D}_{12}^T [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{D}_{12}] = 0 \quad \mathbf{I}$; г) $[\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{D}_{12}]^T \mathbf{D}_{12}^T = 0 \quad \mathbf{I}^T$.

Допустимий регулятор забезпечує мале значення $\|\mathbf{T}_{zw}\|_{\infty}$ тоді і тільки тоді, коли існують дві матриці Гамільтона, які визначаються наступними виразами:

$$\mathbf{H}_{\infty} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \gamma^{-2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T - \mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T \\ -\mathbf{C}_1^T\mathbf{C}_1 & -\mathbf{A}^T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J}_{\infty} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T & \gamma^{-2}\mathbf{C}_1^T\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2^T\mathbf{C}_2 \\ -\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T & -\mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

відповідними алгебраїчним рівнянням Ріккати з управління та фільтрації:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{X}_{\infty} + \mathbf{X}_{\infty}\mathbf{A} - \mathbf{X}_{\infty}\mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T - \gamma^{-2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T\mathbf{X}_{\infty} + \mathbf{C}_1^T\mathbf{C}_1 = 0,$$

$$\mathbf{A}\mathbf{Y}_{\infty} + \mathbf{Y}_{\infty}\mathbf{A}^T - \mathbf{Y}_{\infty}\mathbf{C}_2^T\mathbf{C}_2 - \gamma^{-2}\mathbf{C}_1^T\mathbf{C}_1\mathbf{Y}_{\infty} + \mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T = 0.$$

Знайти матриці \mathbf{X}_{∞} і \mathbf{Y}_{∞} , при виконанні властивостей $\rho(\mathbf{X}_{\infty}\mathbf{Y}_{\infty}) < \gamma^2$, де $\rho(\cdot)$ - спектральний радіус виразу в дужках. Регулятор описується виразом:

$$\mathbf{K}_{\infty}(s) =: \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}'_{\infty} & -\mathbf{Z}_{\infty}\mathbf{L}_{\infty} \\ \hline \mathbf{F}_{\infty} & 0 \end{array} \right] \quad (21)$$

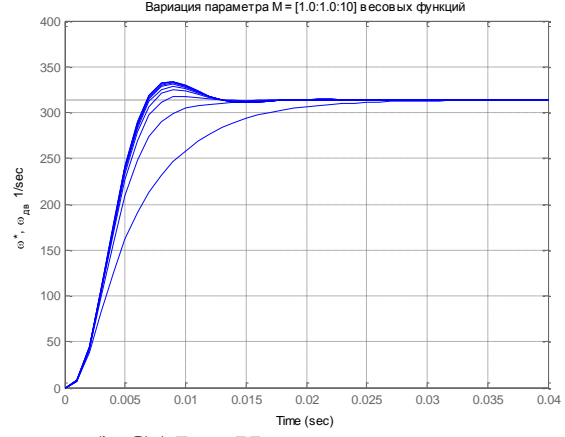
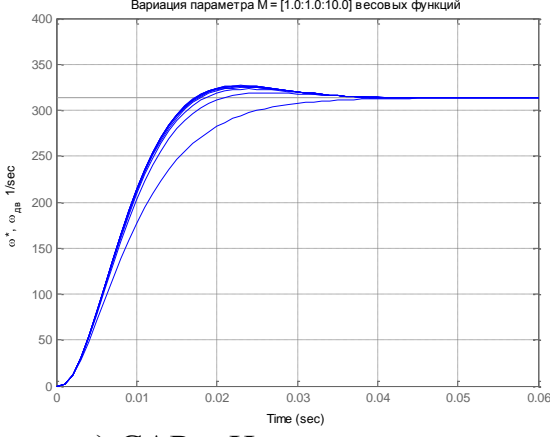
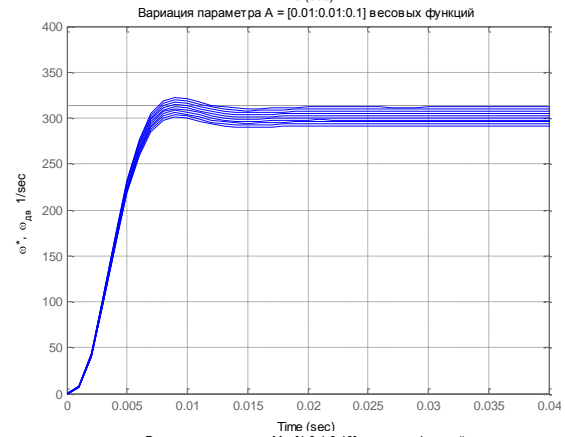
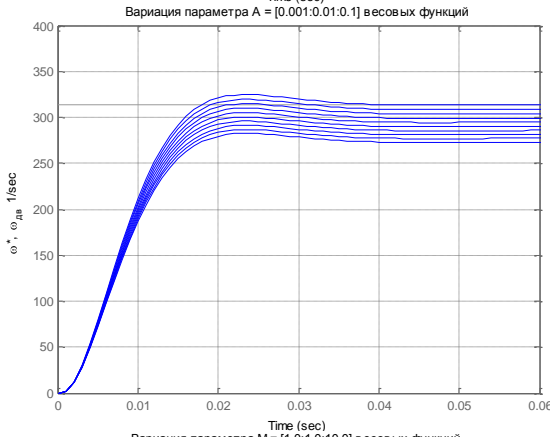
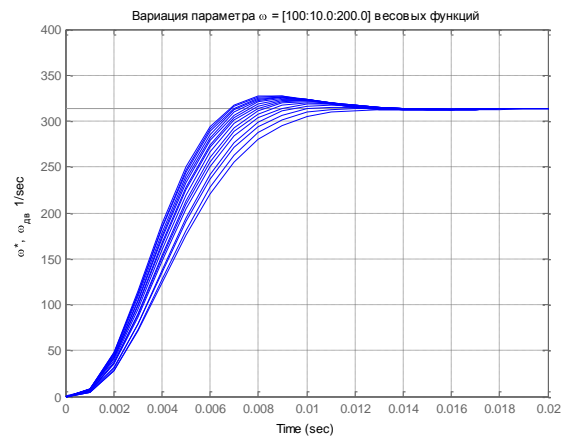
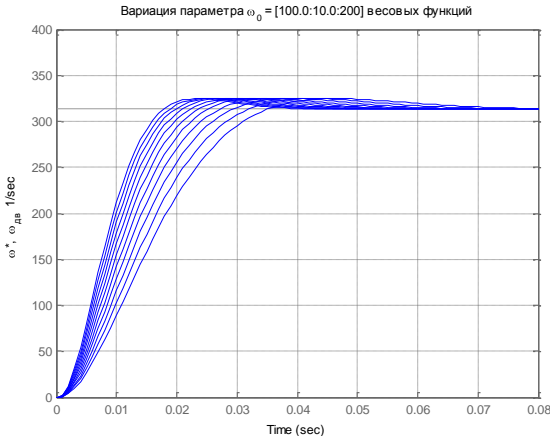
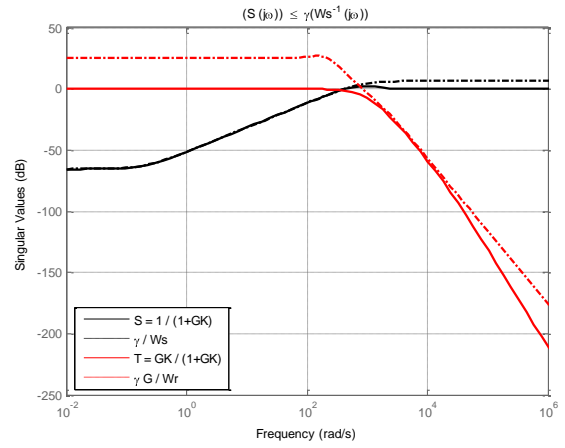
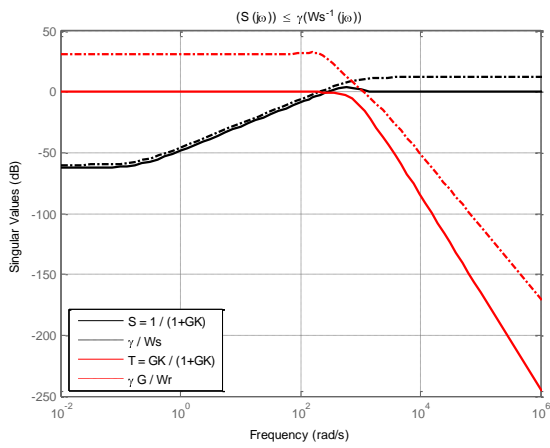
$$\text{де } \mathbf{A}'_{\infty} = \mathbf{A} + \gamma^{-2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T\mathbf{X}_{\infty} + \mathbf{B}_2\mathbf{F}_{\infty} + \mathbf{Z}_{\infty}\mathbf{L}_{\infty}\mathbf{C}_2$$

$$\mathbf{F}_{\infty} = -\mathbf{B}_2^T\mathbf{X}_{\infty}, \mathbf{F}_{\infty} = -\mathbf{B}_2^T\mathbf{X}_{\infty}, \mathbf{Z}_{\infty} = \mathbf{I} - \gamma^{-2}\mathbf{Y}_{\infty}\mathbf{X}_{\infty}^{-1}.$$

Робастний регулятор швидкості СДПМ був синтезований за допомогою методів та функцій, реалізованих у бібліотеці Robust Control Toolbox системи MATLAB, які дозволяють за представленими алгоритмами обчислити центральний H_{∞} -субоптимальний регулятор, який мінімізує H_{∞} -норму замкненої системи $\|\mathbf{T}_{zw}\|_{\infty}$. Рівень толерантності γ отриманий в процесі ітерації, склав 0,533, який дає оцінку субоптимальності H_{∞} -регулятора швидкості одномасового ЕП (4-го порядку), рівняння якого в просторі станів має вигляд:

a =	b =																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">x1</td> <td style="text-align: center;">x2</td> <td style="text-align: center;">x3</td> <td style="text-align: center;">x4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x1</td> <td style="text-align: center;">-0.2006</td> <td style="text-align: center;">11.7</td> <td style="text-align: center;">-0.06689</td> <td style="text-align: center;">-0.9372</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x2</td> <td style="text-align: center;">11.7</td> <td style="text-align: center;">-2.175e+04</td> <td style="text-align: center;">5435</td> <td style="text-align: center;">3280</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x3</td> <td style="text-align: center;">0.06689</td> <td style="text-align: center;">-5435</td> <td style="text-align: center;">-0.7222</td> <td style="text-align: center;">-21.65</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x4</td> <td style="text-align: center;">-0.9372</td> <td style="text-align: center;">3280</td> <td style="text-align: center;">21.65</td> <td style="text-align: center;">-2502</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x4	x1	-0.2006	11.7	-0.06689	-0.9372	x2	11.7	-2.175e+04	5435	3280	x3	0.06689	-5435	-0.7222	-21.65	x4	-0.9372	3280	21.65	-2502	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">u1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x1</td> <td style="text-align: center;">3.346</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x2</td> <td style="text-align: center;">-98.31</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x3</td> <td style="text-align: center;">-0.5535</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">x4</td> <td style="text-align: center;">7.819</td> </tr> </table>		u1	x1	3.346	x2	-98.31	x3	-0.5535	x4	7.819
	x1	x2	x3	x4																																
x1	-0.2006	11.7	-0.06689	-0.9372																																
x2	11.7	-2.175e+04	5435	3280																																
x3	0.06689	-5435	-0.7222	-21.65																																
x4	-0.9372	3280	21.65	-2502																																
	u1																																			
x1	3.346																																			
x2	-98.31																																			
x3	-0.5535																																			
x4	7.819																																			
c =	d =																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">x1</td> <td style="text-align: center;">x2</td> <td style="text-align: center;">x3</td> <td style="text-align: center;">x4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">y1</td> <td style="text-align: center;">3.346</td> <td style="text-align: center;">-98.31</td> <td style="text-align: center;">0.5535</td> <td style="text-align: center;">7.819</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x4	y1	3.346	-98.31	0.5535	7.819	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">u1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">y1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>		u1	y1	0																					
	x1	x2	x3	x4																																
y1	3.346	-98.31	0.5535	7.819																																
	u1																																			
y1	0																																			

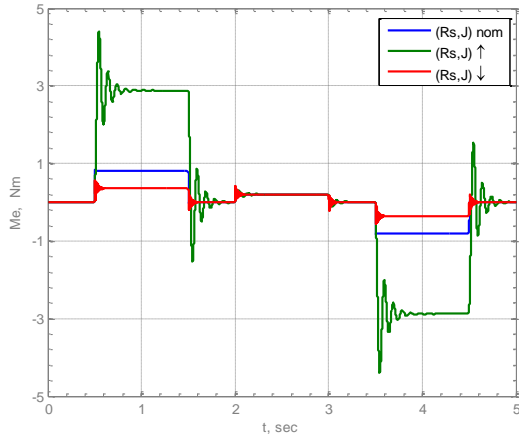
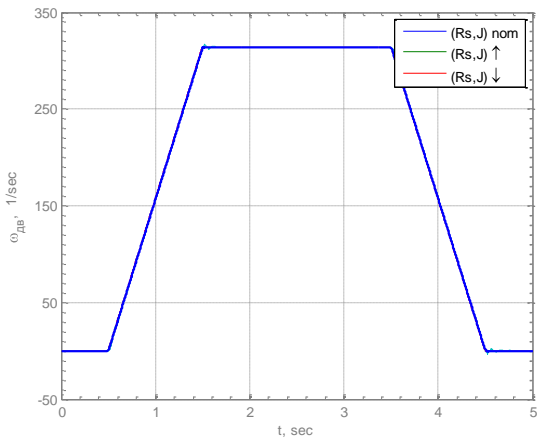
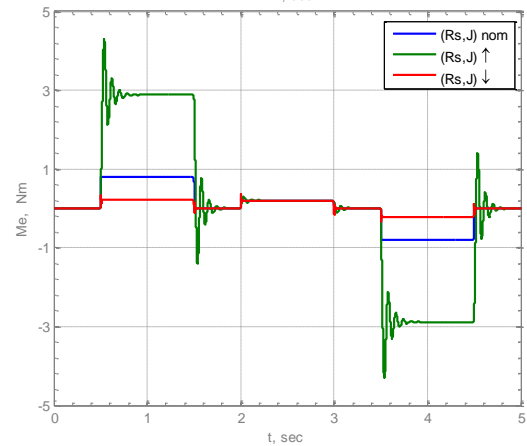
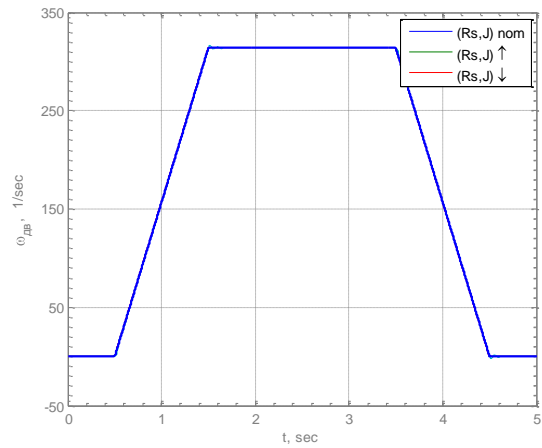
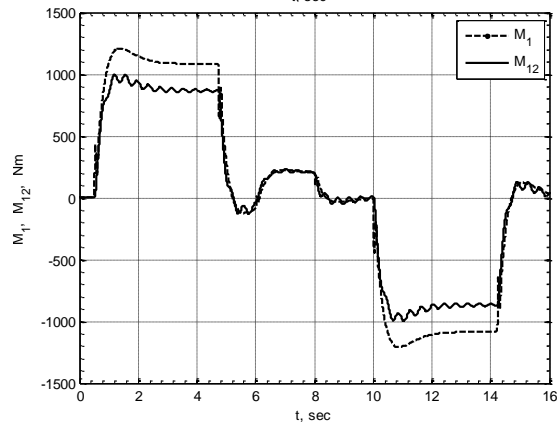
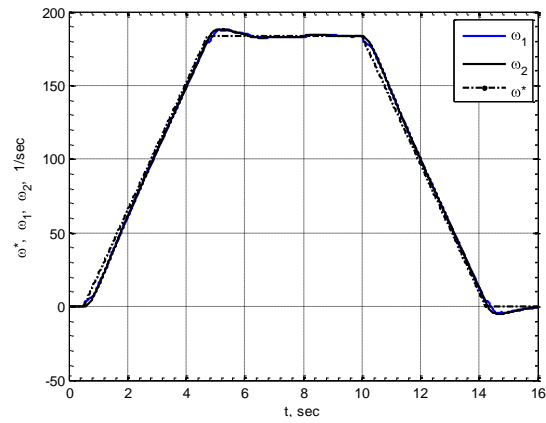
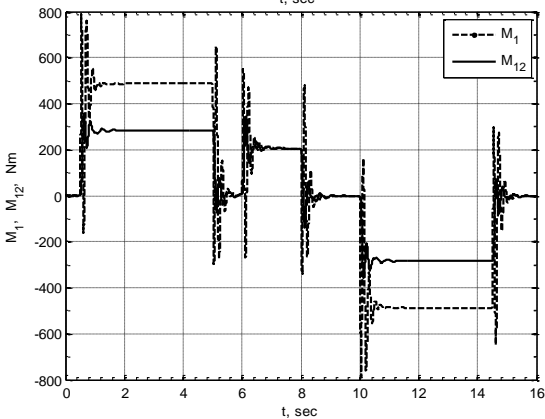
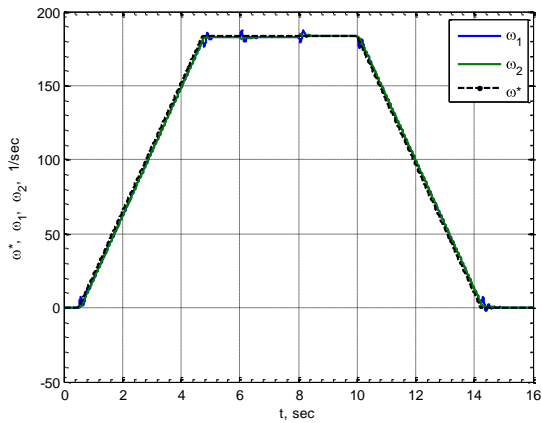
На рисунку 4 приведені сингулярні значення функції чутливості і додаткової чутливості обмежені за амплітудою відповідними ваговими функціями. Дані характеристики вказують на досягнуту якість робастної САР з синтезованими H_2 - і H_{∞} -регуляторами; сімейства перехідних характеристик при варіації параметрів вагових функцій, які є «органами управління /налаштування» характеристик якості та стійкості робастної САР, та показано можливість незалежного управління швидкодією, усталеною похибкою і характером протікання перехідних процесів регульованої координати в замкненій системі. На рисунках 5-6 представлені результати роботи одномасового і двомасового ЕП з синтезованими H_2 - і H_{∞} -регуляторами швидкості. H_{∞} -регулятор швидкості двомасового ЕП є регулятором 7 порядку. Рівень толерантності $\gamma = 0,814$. За допомогою алгоритмів пониження порядку системи, регулятор редукований до 5-го порядку.



а) САР з H_2 -регулятором

б) САР з H_∞ -регулятором

Рис. 4. Сингулярні значення S і T , обмежені за амплітудою ваговими функціями; реакція на стрибок управління при варіації параметрів вагових функцій $\omega_0 = [100.0:10.0:200.0]$, $A = [0.001:0.01:0.1]$ та $M = [1.0:1.0:10.0]$

а) САР з H_2 -регуляторомб) САР з H_∞ -регуляторомРис. 5. Графіки перехідних процесів в робастній САР одномасового ЕП при номінальних параметрах та при одночасній зміні J в 4 рази та R_s в 2 разиРис. 6. Графіки перехідних процесів в робастній САР двомасового ЕП при номінальних параметрах та при одночасній зміні J і R_s в 2 рази

Рівняння редукованого H_∞ -регулятора швидкості двомасового ЕП:

$a =$ <table style="border-collapse: collapse; width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;"></td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x4</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x5</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-4258</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">339</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-472.7</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">59.46</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-4.99</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">6.608</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-44.82</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-6.22</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-4.712</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x4</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">2.369e+04</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">4783</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x5</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-1.175e+05</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-2.369e+04</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x4	x5	x1	-4258	339	-472.7	0	0	x2	59.46	-4.99	6.608	0	0	x3	-44.82	-6.22	-4.712	0	0	x4	0	0	0	2.369e+04	4783	x5	0	0	0	-1.175e+05	-2.369e+04	$b =$ <table style="border-collapse: collapse; width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;"></td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">u1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">46.38</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">2.54</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">87.82</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x4</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0.07115</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x5</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0.01442</td> </tr> </table>		u1	x1	46.38	x2	2.54	x3	87.82	x4	0.07115	x5	0.01442
	x1	x2	x3	x4	x5																																												
x1	-4258	339	-472.7	0	0																																												
x2	59.46	-4.99	6.608	0	0																																												
x3	-44.82	-6.22	-4.712	0	0																																												
x4	0	0	0	2.369e+04	4783																																												
x5	0	0	0	-1.175e+05	-2.369e+04																																												
	u1																																																
x1	46.38																																																
x2	2.54																																																
x3	87.82																																																
x4	0.07115																																																
x5	0.01442																																																
$c =$ <table style="border-collapse: collapse; width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;"></td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x4</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">x5</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">y1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">47.62</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">-2.719</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">5.257</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">10.2</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">2.082</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x4	x5	y1	47.62	-2.719	5.257	10.2	2.082	$d =$ <table style="border-collapse: collapse; width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;"></td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: center;">u1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">y1</td> <td style="padding: 2px 10px; text-align: right;">0</td> </tr> </table>		u1	y1	0																																
	x1	x2	x3	x4	x5																																												
y1	47.62	-2.719	5.257	10.2	2.082																																												
	u1																																																
y1	0																																																

В четвертому розділі розглянуті питання практичної реалізації результатів досліджень. Показана можливість практичної реалізації робастних алгоритмів управління СДПМ типу 1FT6044-1AF71-3DG1 концерну Siemens і живленні його від перетворювача частоти (ПЧ) SINAMICS S120. Реалізація робастних алгоритмів керування в системі регулювання ПЧ здійснюється виключно на програмному рівні, що стало можливим завдяки використанню системи MATLAB з його розширеннями Real-Time Workshop, Real-Time Windows Target та Simulink, в яких і створено програмне забезпечення для управління ПЧ.

САР швидкості СДПМ вже містить внутрішній контур регулювання q -складової статорного струму. У базовій прошивці перетворювача SINAMICS S120 цей контур реалізований з ПІ-регулятором. Змінити структуру цього регулятора, в тому числі і алгоритми перемикання силових ключів інверторної частини доступними користувачеві програмними засобами є неможливим. Тому прийнято рішення про реалізацію робастних алгоритмів лише в каналі регулювання швидкості, без зміни структури регулятора q -складової статорного струму і алгоритмів перемикання силових ключів інверторного модуля. Цей факт навіть на руку розробникам, оскільки дозволяє спростити кінцевий алгоритм регулятора швидкості, тому знижується порядок ОК (контур струму оптимізований, в результаті чого скомпенсована електромагнітна стала часу).

При практичній реалізації представлений регулятор у вигляді State-Space моделі. Такт прорахунку реалізованого контуру регулювання швидкості становить 62,5 мкс. На рисунку 7 представлені результати роботи синхронного електроприводу з синтезованим H_∞ -субоптимальним регулятором швидкості.

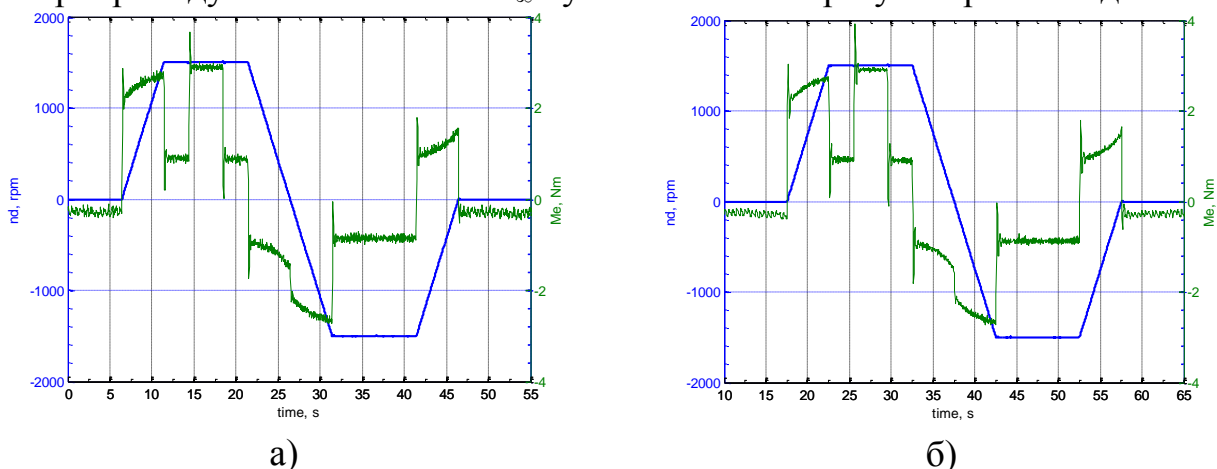


Рис. 7 – Експериментальні дослідження синхронного ЕП з H_∞ -субоптимальним регулятором швидкості:

а) розрахункові дані; б) зменшення моменту інерції $J_{\text{расч}} = J_{\text{дв}} + J_1$, в 2 рази

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача, що присвячена методам синтезу робастних систем керування синхронного ЕП в умовах неповної інформації про об'єкт та з урахуванням параметричної невизначеності методами H_∞ -теорії. Наукові результати, висновки і рекомендації полягають у наступному.

1. Доведено можливість використання робастних систем керування з H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості одномасового і двомасового синхронного ЕП для стабілізації та регулювання швидкості обертання в умовах неповної інформації про об'єкт і характеристик зовнішнього середовища, в якому він функціонує, з урахуванням його невизначеностей з високими показниками якості незалежно від виду і величини задавального впливу.

2. Розроблено математичні моделі одномасового і двомасового синхронного ЕП як ОК з урахуванням невизначеностей, представлених як ЛДП.

3. Вирішена задача синтезу робастних H_2 - і H_∞ -регуляторів швидкості одномасового і двомасового синхронного ЕП, які мінімізують H_2 - і H_∞ -норми замкнених систем $\|\mathbf{T}_{zw}\|_2$ і $\|\mathbf{T}_{zw}\|_\infty$. Рівень толерантності γ , який дає оцінку субоптимальності H_∞ -регулятора 4-го порядку швидкості одномасового ЕП отриманий в процесі ітерації, склав 0,533. Рівень толерантності редукованого з 7-го до 5-го порядку H_∞ -субоптимального регулятора швидкості двомасового ЕП дорівнює 0,814.

4. Наведені практичні рекомендації з вибору вагових функцій, використуваних в H_∞ -теорії керування для забезпечення необхідної якості перехідних процесів і додання системі властивостей робастності. Показана можливість незалежного управління швидкодією, усталеною похибкою і характером протікання перехідних процесів регульованої координати в синтезованій САР.

5. Доведено, що вагові функції, які включені в узагальнений (стандартний) об'єкт для синтезу робастного регулятора, є «органами управління/налаштування» характеристик якості замкненої робастної системи керування. Розроблено алгоритм визначення параметрів вагових функцій для досягнення заданих показників якості.

6. Досліджено динамічні характеристики синтезованих робастних САР синхронним ЕП із H_2 -і H_∞ -регуляторами. Синтезовані регулятори дозволяють отримати стійкий перехідний процес при одночасній зміні J в 4 рази та R_s в 2 рази (співвідношення сталих часу: $(R_s, J)_{\text{ном}} \rightarrow T_M / T_\vartheta = 0,52$; $(R_s, J) \uparrow \rightarrow T_{M\uparrow} / T_{\vartheta\downarrow} = 12,45$; $(R_s, J) \downarrow \rightarrow T_{M\downarrow} / T_{\vartheta\uparrow} = 0,023$), при цьому перерегулювання за швидкістю знаходиться у межах 3% в САР з H_∞ -регулятором та 5% в САР з H_2 -регулятором, спостерігаються пульсації за електромагнітним моментом.

7. Розроблено програмні коди (m-файли) в системі MATLAB / Robust Control Toolbox, що дозволяють алгоритмізувати процедуру синтезу робастних САР для електромеханічних об'єктів n-го порядку, а також можуть бути інтегровані в інші системи автоматичного проектування.

8. Створено експериментальну установку з можливістю практичної реалізації робастних алгоритмів керування синхронним ЕП. Відмінною особливістю

установки є можливість реалізації робастних алгоритмів керування в системі регулювання перетворювачем практично будь-якої складності і виключно на програмному рівні. Отримані експериментальні результати дозволяють судити про адекватність основних теоретичних висновків і результатів математичного моделювання реальним фізичним процесам.

9. Результати дисертаційної роботи передані для впровадження і використання на ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» (м. Алчевськ) та використовуються в наукових дослідженнях і в навчальному процесі кафедри автоматизованих електромеханічних систем імені проф. А. Б. Зеленова ДонДТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Руднев Е. С. Синтез робастного H_∞ -субоптимального регулятора положення позиционного электропривода / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2008. – Ч.1, вип. 3 (50). – С. 64-71

Здобувач розв'язав задачу синтезу робастного керування позиційного електроприводу.

2. Руднев Е. С. Синтез робастной системы управления явнополюсной синхронной машины / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 136-140

Здобувач розробив структурну схему контуру регулювання швидкості явнополюсної синхронної машини з невизначеними параметрами, представленими лінійно-дробовим перетворюванням.

3. Разработка математической модели и моделирование явнополюсных синхронных машин в фазных координатах / Е. В. Полилов, А. Г. Щелоков, Е. С. Руднев, А. Н. Степанов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 207-210

Здобувачу належить розробка векторної Simulink-моделі, узагальненої ЯСМ в фазних координатах, а також здійснення верифікації отриманих моделей.

4. Руднев Е. С. Практический подход к выбору весовых функций для H_∞ -теории робастного управления / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч.2, вип. 3 (56). – С. 17-24

Здобувачем розроблено загальні рекомендації щодо вибору вагових функцій, оснований на H_∞ -методах проектування.

5. Руднев Е. С. μ -анализ и синтез робастной системы управления электропривода постоянного тока / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч.2, вип. 3 (56). – С. 25-30

Здобувачем проведено дослідження робастних характеристик якості за допомогою μ -аналізу на основі структурного сингулярного числа μ .

6. Разработка Simulink-моделей и моделирование явнополюсных синхронных машин в ортогональных координатах / Е. В. Полилов, А. И. Мотченко, А. Н. Степанов, Е. С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч.1, вип. 4 (57). – С. 102-106

Здобувачем розроблено математичний опис синхронної машини в ортогональній системі координат.

7. Руднев Е. С. Синтез робастного H_2 -оптимального регулятора положения позиционного электропривода / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. – вип. 2 (12). – С. 98-103

Здобувачем розроблено ефективний алгоритм синтезу робастного регулятора положення позиційного електроприводу на основі H_2 -оптимізації.

8. Руднев Е. С. Сравнительный анализ H_2 , H_∞ и μ -регуляторов робастных систем управления электропривода постоянного тока / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Електроінформ. – Львів: ТОВ «ЕКОінформ». – 2009. – Тематичний вип. – С. 249-254

Здобувачем проведено аналіз синтезованих H_2 , H_∞ и μ -регуляторів, дана оцінка якості відпрацювання робастних САК заданої траєкторії.

9. Руднев Е. С. Синтез алгоритмов робастного управления синхронным электродвигателем методами H_∞ -теории / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Ч.3, вип. 4 (63). – С.15-20

Здобувачем показана процедура створення узагальненого (стандартного) об'єкта і вибору вагових функцій, що є першою необхідною стадією синтезу робастного регулятора.

10. Руднев Е. С. Синтез алгоритмов робастного управления синхронной машиной с постоянными магнитами методами H_∞ -теории / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ. – 2010. – вып.31. – С.197-212

Здобувачем синтезована робастна САР електропривода змінного струму на базі синхронного електродвигуна зі збудженням від постійних магнітів з H_∞ -регулятором швидкості.

11. Практическая реализация и исследование релейно-робастных алгоритмов управления синхронными электродвигателями / Е. В. Полилов, А. М. Батрак, А. И. Мотченко, Е. С. Руднев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С.90-98

Здобувач брав участь у створенні лабораторного стенду.

12. Синтез алгоритмов робастного управления двухмассовым электромеханическим объектом методами H_∞ -теории / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев,

С. П. Скорик, А. Г. Щелоков, П. В. Горелов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С.125-132

Здобувач розробив структурні схеми двомасового електромеханічного об'єкта з невизначеними параметрами, представленими лінійно-дробовим перетворенням, а також розв'язав задачу синтезу робастного регулятора швидкості

13. Руднев Е. С. Робастное управление синхронным электроприводом на основе H_2 - и H_∞ -оптимизации / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – вип. 11 (186). – С. 305-314

Здобувачем розроблено алгоритми синтезу робастних регуляторів швидкості синхронного електроприводу по критерію мінімуму H_2 - і H_∞ -норм.

14. Разработка и практическая реализация робастных алгоритмов управления автоматизированным синхронным электроприводом на основе H_2 - и H_∞ -оптимизации / Е. В. Полилов, А. И. Мотченко, Е. С. Руднев, С. П. Скорик, А. Г. Щелоков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – № 3 (79). – С. 60-69

Здобувач розробив алгоритми синтезу робастних регуляторів на основі H_2 - і H_∞ -оптимізації, показана можливість практичної реалізації розроблених алгоритмів керування синхронним електроприводом

15. Исследовательский стенд для апробации алгоритмов управления сложными электромеханическими системами / Е. В. Полилов, А. М. Батрак, Е. С. Руднев, С. П. Скорик, П. В. Горелов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – № 3 (79). – С. 481-487

Здобувач брав участь у розробці та створенні лабораторного стенду, розробив концепцію та створення універсальної експериментальної установки для можливості практичної реалізації робастних алгоритмів керування.

16. Руднев Е. С. Выбор весовых функций в H_∞ -теории робастного управления электроприводами / Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – вып. 37. – С.307-316.

Здобувачем розроблено практичні рекомендації щодо вибору вагових функцій в H_∞ -теорії робастного керування електроприводами. Запропоновано алгоритм вибору параметрів вагових функцій.

17. Руднев Е. С. Сравнительный анализ H_2 , H_∞ и μ -регуляторов робастных систем управления синхронным электроприводом / Е. С. Руднев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – вып. 37. – С.330-337.

18. Руднев Е. С. Практическая реализация и исследование робастных алгоритмов управления синхронным электроприводом / Е. С. Руднев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – вип. 3 (19). – С.102-107.

АНОТАЦІЇ

Руднев Є. С. Розробка і дослідження робастних систем керування електроприводів змінного струму із синхронними двигунами. – На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013 р.

Дисертація присвячена синтезу робастної системи керування автоматизованим синхронним електроприводом з H_2 - і H_∞ -регуляторами швидкості, що функціонує в умовах неповної інформації про об'єкт і з урахуванням його структурних невизначеностей. Синтезовані H_2 - і H_∞ -регулятори забезпечують робастну стійкість та якість для всіх допустимих невизначеностей об'єкта. Розроблені математичні моделі одномасового і двомасового синхронного ЕП як ОК з урахуванням невизначеностей. Наведені практичні рекомендації з вибору вагових функцій, використовуваних в H_∞ -теорії керування для забезпечення необхідної якості перехідних процесів і додання системі властивостей робастності. Показана можливість незалежного управління швидкодією, усталеною похибкою і характером протікання перехідних процесів регульованої координати в синтезованій робастній САР. Запропоновані алгоритми керування реалізовані на лабораторній установці, проведені експериментальні дослідження роботи синхронного ЕП, перевірена адекватність основних теоретичних висновків та результатів математичного моделювання реальним фізичним об'єктом.

Ключові слова: електромеханічна система, система керування, електропривод синхронний, невизначеність, робастний регулятор.

Руднев Е. С. Разработка и исследование робастных систем управления электроприводов переменного тока с синхронными двигателями. – На правах рукописи.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013 г.

Диссертация посвящена синтезу робастной системы управления синхронным электроприводом с H_2 - и H_∞ -регуляторами скорости, функционирующей в условиях неполной информации об объекте и с учетом его структурных неопределенностей. Синтезированные H_2 - и H_∞ -регуляторы обеспечивает робастную устойчивость и качество для всех допустимых неопределенностей объекта.

Решение задачи синтеза робастных регуляторов связано с потребностями в снижении необходимого объема априорной информации об объектах управления, стремлением к универсальности управляющих систем и сокращению затрат на их наладку. В связи с этим разработка метода синтеза робастных систем управления синхронным ЭП является актуальной научно-технической задачей.

Разработаны математические модели одномассового и двухмассового синхронного ЭП как объектов управления с учетом неопределенностей,

представленных как ЛДП. Решена задача синтеза робастных H_2 - и H_∞ -регуляторов скорости одномассового и двухмассового синхронного электропривода.

Впервые приведены практические рекомендации по выбору весовых функций, используемых в H_∞ -теории управления для обеспечения требуемого качества переходных процессов и придания системе свойств робастности. Показана возможность независимого управления быстродействием, установившейся ошибкой и характером протекания переходных процессов регулируемой координаты в синтезируемой робастной САР.

Исследованы динамические характеристики робастных систем с синтезированными робастными регуляторами. Проанализировано влияние изменения параметров ОУ в ходе эксплуатации на динамические характеристики робастных систем управления. Разработаны программные коды (m-файлы) в системе MATLAB / Robust Control Toolbox, позволяющие алгоритмизировать процедуру синтеза робастных САР для электромеханических объектов n-го порядка.

Предложенные алгоритмы управления реализованы на лабораторной установке, проведены экспериментальные исследования работы синхронного электропривода, проверена адекватность основных теоретических выводов и результатов математического моделирования реальным физическим процессом.

Ключевые слова: электромеханическая система, система управления, электропривод синхронный, неопределенность, робастный регулятор.

Rudnev E. S. Development and research of robust control systems of electric AC drives with synchronous motors. - As a manuscript.

Dissertation for the degree of Philosophies Doctor in specialty 05.09.03 – electrical complexes and systems. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2013

The thesis is devoted to the synthesis of robust control systems automated synchronous electric drive with H_2 - and H_∞ -speed controller that operates under incomplete information about the object and subject of its structural uncertainties. Synthesis of H_2 - and H_∞ -controllers provide robust stability and quality for all admissible uncertainties object.

Mathematical models one masses and two masses synchronous electric as control objects in view of uncertainties. Practical advice on choosing weighting functions used in H_∞ -control theory to ensure the required quality of transients and giving the system robustness properties. The possibility of independent control speed, accuracy and established the character of the transition process variable values in synthesized robust automatic control system. The proposed control algorithms are implemented on a laboratory installation conducted experimental studies of synchronous electric confirming the basic ideas underlying the H_∞ -control theory.

Key words: electromechanical system, control system, electric drive synchronous, uncertainty, robust controller.



Підписано до друку 17.01.2013 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90 /16. Папір офсетний. Друк – ризографія.
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 085149

Надруковано у СПДФО Ізрайлев С. М.
свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2011 р.
61002, м. Харків вул. Фрунзе, 16