

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Львівська політехніка"

Білецький Юрій Олегович

УДК 681.511.46:621.313.32:621.311.24

**ЕНЕРГОФОРМУЮЧЕ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ НА БАЗІ
СИНХРОННОЇ МАШИНИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Щур Ігор Зенонович,
професор кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету "Львівська політехніка"

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Островерхов Микола Якович,
професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

доктор технічних наук, доцент
Бушер Віктор Володимирович,
професор кафедри електромеханічних систем з комп'ютерним управлінням Одеського національного політехнічного університету

Захист відбудеться « 26 » грудня 2014 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.02 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 гол. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «21» листопада 2014 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент

Коруд В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом електромеханічні системи (ЕСМ) характеризуються щораз більшою складністю як їх структур, так і самих методів керування. Найчастіше це виявляється у суттєвому зростанні нелінійності системи, що призводить до значних труднощів синтезу систем автоматичного керування (САК). На даний час існує велика кількість підходів до синтезу нелінійних систем керування. Кожен з них має свої переваги і недоліки у порівнянні з іншими, і, як наслідок, має свою сферу застосування. Однак, у більшості випадків ці підходи є складними для синтезу систем керування і наступного їх налагодження та не завжди можуть виконати поставлене завдання. Вони є складними з математичної точки зору і незрозумілими з фізичної.

Одним з фундаментальних понять у науці є енергія, а отже, енергетичні закономірності можуть бути використані для опису будь-якої системи. На основі цього останнім часом почав розвиватися новий напрям сучасної теорії нелінійних систем керування, що базується на формуванні динаміки енергоперетворень в об'єкті і називається енергетичними підходами до керування. Вони беруть початок з механіки, де використовувались для керування динамікою маніпуляторів, а згодом поширилися і на інші об'єкти керування, в тому числі й ЕМС. Визначальною перевагою енергетичних підходів є фізична зрозумілість процесу керування, на відміну від багатьох інших підходів, в основі яких лежать математичні закономірності.

Сучасні ЕМС, до яких ставляться вимоги високої статичної і динамічної точності керування, доцільно виконувати на базі синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ), які відзначаються доброю керованістю, високими енергетичними та масо-габаритними показниками, проте відносяться до класу нелінійних систем. На жаль, запропоновані на сьогодні поодинокі випадки побудови систем керування електроприводами з СМПМ на основі енергетичних підходів є або малоефективними, або, через поєднання з іншими підходами складними для розуміння та налагодження. Тому створення систем енергоформуєчого керування (СЕФК) нелінійними ЕМС на базі СМПМ, які будуть водночас ефективними і простими для налагодження, є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводились відповідно до розробленого згідно із Законом України від 11 липня 2001 р. “Про пріоритетні напрямки розвитку науки та техніки” наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування Національного університету “Львівська політехніка” “Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності”. Основні результати дисертаційної роботи були використані у процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт: “Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії” (2011-2012 рр., держреєстрація №0111U001212) та “Гібридні автономні вітроенергоустановки, що виробляють теплову та електричну енергію” (2013-2014 рр., держреєстрація №0113U001358).

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження структур регуляторів та розроблення процедури синтезу систем керування

нелінійними ЕМС на базі СМППМ, що описуються як гамільтонові системи з керованими портами (входами і виходами).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- з метою досягнення кращих динамічних і статичних показників електроприводу на базі СМППМ, вдосконалити структури формувачів керуючих впливів (ФКВ) для СЕФК, а також дослідити вплив параметрів ФКВ і розробити на основі цього методику ручного налаштування СЕФК;
- розробити процедуру параметричного синтезу ФКВ для СЕФК електроприводами на базі СМППМ;
- синтезувати та дослідити ФКВ для СЕФК двомасовим електроприводом на базі СМППМ, що забезпечували б високі динамічні і статичні показники систем, а також мали широкі можливості у налаштуванні;
- розробити СЕФК реальною нелінійною ЕМС – систему керування оптимальним навантаженням вітроелектроустановки (ВЕУ) на базі синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ), яка забезпечувала б максимальний відбір енергії вітру при турбулентних, поривчастих та “малих” вітрах;
- створити дослідний стенд та провести фізичні експерименти з метою підтвердження одержаних теоретичних результатів.

Об’єктом дослідження є процеси керування нелінійними електромеханічними системами на базі СМППМ.

Предмет дослідження – структури формувачів керуючих впливів та синтез їх параметрів для керування електромеханічними системами з СМППМ як гамільтоновими з керованими портами.

Методи дослідження. Методи розв’язання алгебраїчних рівнянь, математичного аналізу і лінійної алгебри; методи теорії автоматичного керування, зокрема синтез систем підпорядкованого регулювання (СПР), синтез систем модального регулювання (СМР), алгебраїчні методи аналізу на стійкість, визначення стійкості за Ляпуновим; методи варіаційного числення, зокрема опис систем як ейлер-лагранжевих та гамільтонових з керованими портами, пасивація систем; використання середовища імітаційного моделювання MATLAB/Simulink; математичне моделювання та проведення розрахунків у середовищі Mathcad з використанням методів розв’язання систем нелінійних рівнянь Левенберга-Маркварда, інтерполяції сплайнами, оберненого перетворення Лапласа; обробка та аналіз одержаних результатів у Golden Grapher з апроксимацією характеристичними поліномами; систематизація та обробка даних у Microsoft Excel; методи експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі:

1. Вперше розроблено спосіб параметричного синтезу формувачів керуючих впливів систем енергоформуючого керування гамільтоновими системами з керованими портами для нелінійних електромеханічних систем на базі синхронної машини з постійними магнітами шляхом формування бажаного характеристичного поліному передавальної функції замкненої системи, що дало змогу формалізувати оптимізацію динаміки цих систем.

2. Отримав подальший розвиток структурний синтез систем енергоформуючого керування електромеханічними системами в напрямку введення додаткових регулюючих впливів у ланки механічної частини шляхом відповідної корекції роботи формувача керуючих впливів, що дало змогу розширити можливості налаштування таких систем та підвищити їх статичні і динамічні показники.

3. Вперше синтезовано системи енергоформуючого керування електричним навантаженням синхронного генератора з постійними магнітами у складі вітроелектроустановки на основі формування оптимальної динаміки, що дало змогу врахувати особливості роботи та нелінійності об'єкта керування і підвищити коефіцієнт відбору енергії від турбулентного вітру.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

На основі результатів досліджень структур СЕФК на базі СМПМ сформульовано рекомендації щодо їх використання та запропоновано алгоритм ручного налаштування ФКВ. Розроблена методика параметричного синтезу дає змогу здійснювати швидке налаштування ФКВ для СЕФК на заданий оптимум. Все це може бути використано у подальших дослідженнях та розробках реальних ЕМС.

Запропоновані структури ФКВ для СЕФК з механічним демпфуванням, які є простими у реалізації та налагодженні і забезпечують широкі регульовальні можливості та високі динамічні і статичні показники всієї системи, можуть бути використані для керування різними ЕМС на базі СМПМ.

Розроблені СЕФК оптимального навантаження генератора ВЕУ на базі СМПМ доцільно застосовувати у автономних малопотужних ВЕУ, що орієнтовані на індивідуальних споживачів, оскільки вони забезпечують кращий на 0,4 – 8,1%, порівняно з відомими системами керування, відбір енергії вітру, і особливо ефективні на турбулентних та поривчастих вітрах з малою середньою швидкістю, які є характерними для території України.

Отримані результати використовуються у науково-дослідних роботах, що проводяться в спеціальному конструкторському бюро ЕМС Національного університету “Львівська політехніка”, а також у навчальному процесі кафедри “Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи” Львівської політехніки.

Особистий внесок здобувача полягає у структурному синтезі та дослідженні нових ФКВ для СЕФК електропривода з СМПМ, двомасової механічної системи, двомасового електропривода на базі СМПМ та оптимального навантаження СГПМ у складі ВЕУ, розробленні процедури параметричного синтезу СЕФК, а також обґрунтуванні режиму “оптимальної швидкодії” для ВЕУ.

У роботах, написаних у співавторстві, особистий вклад є наступним: [1] – здійснено аналіз впливів параметрів ФКВ на роботу СЕФК з СМПМ і проведено порівняльні дослідження роботи СЕФК та СПР; [3] – запропоновано використання у СЕФК регулюючої дії за механічною координатою та проведено порівняльні дослідження роботи СПР і СЕФК з різними структурами ФКВ; [4] – синтезовано СЕФК двомасовою механічною системою, проаналізовано вплив параметрів СЕФК та наведено рекомендації щодо їх застосування; [5] – застосовано СЕФК СМПМ для керування оптимальним навантаженням генератора ВЕУ, запропоновано режим “оптимальної швидкодії”, проведено порівняльні дослідження СЕФК та відомої систе-

ми керування за Morimoto при різних середніх швидкостях вітру; [7] – запропоновано поліфункціональні СЕФК навантаження ВЕУ різного виконання та проведено порівняльні дослідження їх роботи; [8] – проведено порівняльні дослідження основних структур регуляторів СЕФК СМІМ та обґрунтовано застосування регулюючої дії за механічною координатою; [9] – адаптовано СЕФК двомасовим електроприводом до системи «вітроротор – СГІМ – активний випрямляч – навантаження» і запропоновано структури ФКВ бездавачевої СЕФК двомасовою ВЕУ; [10] – запропоновано процедуру параметричного синтезу ФКВ для СЕФК, проведено порівняльні дослідження СЕФК та СМР електроприводу постійного струму.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи, основні положення та висновки доповідалися та обговорювалися на XVIII – XX міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика. (ПАЕП)” (м. Одеса, 2011 р.; смт. Миколаївка, Крим, 2012 р.; с. Малий маяк, Крим, 2013 р.), X міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів “Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації (ЕСМО-2012)” (м. Кременчук, 2012 р.), VI міжнародній науково-технічній конференції “Керування режимами роботи об’єктів електричних та електромеханічних систем (КРЕС-2013)” (м. Донецьк, 2013 р.), науковому семінарі «Моделі та методи комп’ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем» Вченої ради НАН України “Наукові основи електроенергетики” (Львів, 2013 р.), II міжнародній науково-технічній конференції “Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)” (м. Вінниця, 2013 р.), XI наукова конференції “Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE-2013)” (м. Лодзь, Польща, 2013 р.), IV міжнародній науковій конференції молодих вчених “Electric Power Engineering and Control Systems (EPECS-2013)” (м. Львів, 2013 р.).

Публікації. Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковано у 9-ти друкованих наукових працях та 1-й електронній, з них 7 у наукових фахових виданнях України і 1 у закордонному виданні. 6 наукових праць входять до міжнародних наукометричних баз даних, 2 праці написано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 4-х додатків. Дисертація займає 205 сторінок, повний обсяг дисертації складає 145 сторінок, містить 56 рисунків, 11 таблиць та 127 назв використаної літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі висвітлено проблему синтезу систем керування сучасними нелінійними об’єктами, а також наведено короткий огляд підходів до їх синтезу. Особливу увагу зосереджено на енергетичних підходах. Приведено процедуру побудови СЕФК для електроприводу на базі векторно керованої СМІМ як гамільто-

нової системи з керованими портами та одержано вирази ФКВ. Здійснено критичний аналіз запропонованих на сьогодні ФКВ для СЕФК.

Новими і перспективними підходами для синтезу систем керування нелінійними ЕМС є енергетичні підходи, які базуються на фізичних законах передачі та перетворення енергії. Виходячи з цих законів, будь-яка пасивна динамічна система може бути описана у формі гамільтонової системи з керованими портами:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{G}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{cases}, \quad (1)$$

де $\mathbf{x} \in R^n$ – вектор стану; $\mathbf{u} \in R^m$ – вектор вхідних енергетичних змінних; $\mathbf{y} \in R^m$ – вектор вихідних енергетичних змінних; $H(\mathbf{x})$ – функція повної енергії (Гамільтоніан системи); $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$ – кососиметрична матриця, що відображає взаємозв'язки в системі; $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x}) \geq 0$ – симетрична додатна матриця, що відображає втрати (демпфування) в системі; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – матриця портів (входів і виходів системи).

Керований об'єкт, регулятор і вся САК також можуть розглядатись у гамільтоновому представленні. Тоді проблему керування можна сформулювати як пошук такої сукупності взаємозв'язаних підсистем, щоб бажана функція енергії замкненої САК $H_d(\mathbf{x})$ набула потрібного вигляду, а саме – мала мінімум у заданій точці рівноваги (усталеного режиму) \mathbf{x}_0 , що забезпечуватиме прямування пасивної САК по завершенню усіх перехідних процесів до цієї точки. Таке керування відбувається за принципом енергоформування: $H_d(\mathbf{x}) = H(\mathbf{x}) + H_a(\mathbf{x})$, де $H_a(\mathbf{x})$ – коректуюча функція енергії системи керування. Модель бажаної замкненої гамільтонової системи, що забезпечує потрібний $H_d(\mathbf{x})$, а також асимптотичну стійкість системи, є такою:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}}, \quad (2)$$

де $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ – бажані взаємозв'язки; $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ – бажане демпфування.

Таким чином, сутність енергетичних підходів полягає в конструюванні різними способами керуючих зворотних зв'язків, що формально підпорядковується законам лагранжевої механіки та реалізують керування всією енергією і дисипативною структурою енергетичних процесів у системі.

Одним з найперспективніших енергетичних підходів є енергоформуєче керування шляхом формування бажаних взаємозв'язків та демпфування. За цим підходом керуючі узагальнені сили розбиваються на дві складові: енергоформувальну і дисипативну. Перша (взаємозв'язки) формує «потенціальну яму» в конфігураційному просторі гамільтонової системи над цільовим положенням рівноваги, змушуючи систему рухатись до цього положення. Введення додаткових взаємозв'язків $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ здійснюється з метою зміни перетоків енергії між підсистемами, що, у свою чергу, приводить до виникнення нових сил, які рухатимуть систему до заданої точки рівноваги \mathbf{x}_0 : $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x})$. Друга (демпфування) – розсіює енергію системи, забезпечуючи затухання перехідних процесів та її асимптотичну стійкість. Введення додаткового демпфування $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ здійснюється з метою природного перерозподілу енергії та прискорення затухання коливань у системі: $\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) \geq 0$.

Процедура синтезу СЕФК розпочинається з того, що модель керованої системи (традиційно записана алгебраїчними та диференціальними рівняннями у формі

Коші, які характеризують різні елементи системи, зв'язані між собою) зводиться до форми опису із вказаною структурою енергетичних компонент (1), де елементи \mathbf{x} , \mathbf{u} , $\mathbf{J}(\mathbf{x})$, $\mathbf{R}(\mathbf{x})$, $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ та $H(\mathbf{x})$ вибираються на основі аналізу об'єкта. Оскільки основною метою СЕФК є забезпечення поведінки об'єкта, що відповідає бажаній, то прирівнявши праві частини моделей бажаної замкненої системи (2) та керованого об'єкта, заданого у формі (1), можна знайти вирази керуючих впливів, які потрібно формувати на вході об'єкта:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) = \underbrace{[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})]}_{\text{бажана система}} \frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{x}} - \underbrace{[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})]}_{\text{об'єкт керування}} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}. \quad (3)$$

Під час синтезу необхідно вибрати структуру СЕФК, а саме – вигляд матриць $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ та $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$. Найчастіше вибирають такий вигляд, як і у відповідних матриць керованого об'єкта, що забезпечує цільове коректування усіх його процесів і, як наслідок, – ефективніше керування.

За даною методикою отримано низку СЕФК електроприводами на базі СМПМ.

Математична модель векторно керованої СМПМ, описаної в обертових з ротором координатах d - q як гамільтонова система з керованими портами, має вигляд:

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + p_p \omega L_q i_q + u_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - p_p \omega L_d i_d - p_p \omega \Phi + u_q \\ J_m \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q] - M_L \end{cases}, \quad (4)$$

де L_d і L_q – індуктивності обмотки якоря по осях d і q відповідно; R_s – фазний опір обмотки якоря; p_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість ротора; Φ – амплітуда потокозчеплення, зумовленого полюсом постійних магнітів ротора; J_m – загальний момент інерції; M_L – момент статичного навантаження.

Матриці для СМПМ у гамільтоновому описі мають вигляд:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d i_d \\ L_q i_q \\ J_m \omega \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ -M_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & p_p x_2 \\ 0 & 0 & -p_p (x_1 + \Phi) \\ -p_p x_2 & p_p (x_1 + \Phi) & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Матриці системи керування вибираються наступними:

$$\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & -J_{12} & -J_{13} \\ J_{12} & 0 & -J_{23} \\ J_{13} & J_{23} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де J_{12} , J_{13} , J_{23} – шукані елементи матриці взаємозв'язків системи керування, що відповідають за її структуру; r_1 та r_2 – демпфуючі коефіцієнти, що відображають електричне демпфування системою керування по осях d - q .

Підставивши (5), (6) та (7) у (3) одержимо три рівняння, що описують ФКВ. Шляхом підстановки у третє рівняння виразу електромагнітного моменту СМПМ знайдено елементи матриці взаємозв'язків $J_{13} = p_p L_d i_{q0}$, $J_{23} = -p_p L_q i_{d0}$ та $J_{12} = k$, де k – коригуючий коефіцієнт, що відображає компенсацію перехресних зв'язків між каналами керування напругою за осями d і q та є одним із параметрів налаштування.

Тоді вирази одного з ФКВ для СЕФК на базі СМПМ є наступними:

$$\begin{cases} u_d^* = -r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p_p L_d i_{q0}(\omega - \omega_0) - p_p L_q i_q \omega_0 \\ u_q^* = -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_p L_q i_{d0}(\omega - \omega_0) + p_p(\Phi + L_d i_d)\omega_0 \\ M_{ем}^* = M_L \end{cases} \quad (8)$$

Хоча енергетичні підходи, зокрема на основі (3), і починають застосовуватись до ЕМС на базі СМПМ, однак запропоновані на сьогодні структури ФКВ таких систем керування є або малоефективними (формуванням бажаних взаємозв'язків та демпфування при використанні лише електричного демпфування у \mathbf{R}_a ; на основі тільки пасивації), або, через поєднання з іншими підходами (з П-, І-, ІІ-, fuzzy-регуляторами; з демпфуванням збурень L2-ланкою; нейронними мережами, адаптивним керуванням тощо), – складними для розуміння та налагодження і не завжди забезпечують стійкість системи.

Таким чином, постає задача структурно-параметричного синтезу асимптотично стійкої СЕФК з високими динамічними і статичними показниками та простої в налаштуванні. Для вирішення цієї задачі запропоновано взяти за основу наведену вище методику синтезу СЕФК шляхом формування бажаних взаємозв'язків та демпфування за рівнянням (3). Вона є простою у використанні та дає змогу, виходячи зі структури керованого об'єкту, вносити у систему керування необхідні додаткові регулюючі впливи.

У другому розділі проведено дослідження та аналіз наявних структур ФКВ для СЕФК електроприводами на базі СМПМ. Запропоновано спосіб структурного синтезу повного ФКВ. Проведено порівняльні дослідження роботи СЕФК із системою векторного керування СМПМ на основі СПР. Запропоновано спосіб оптимального параметричного синтезу СЕФК гамільтоновими системами з керованими портами. Доведено ефективність використання цього способу для СЕФК із запропонованим повним ФКВ на прикладах електропривода постійного струму та на базі векторно керованої СМПМ.

ФКВ (8) для СЕФК має нетипову структуру, яку за своїми функціями можна розділити на дві частини (рис. 1). Перша – коректори – формує бажану точку рівноваги \mathbf{x}_0 (елементи $R_s i_{d0}$, $p_p L_q i_q \omega_0$, $R_s i_{q0}$ та $p_p(\Phi + L_q i_d)\omega_0$). Друга частина включає в себе підсилювачі похибок за відхиленнями регульованих координат і відповідає за форсування перехідних процесів (решта елементів ФКВ). Кожна з цих частин формує керуючі впливи, які потім сумуються. У випадку синтезу СЕФК з іншим виглядом матриць взаємозв'язків та демпфування системи керування ($\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ і $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$) структури коректорів і підсилювачів ФКВ будуть також іншими.

Було проведено низку досліджень відомих структур ФКВ (при різному виборі елементів k , r_1 та r_2 у рівнянні (8)) для електромеханічної СЕФК на базі СМПМ, що

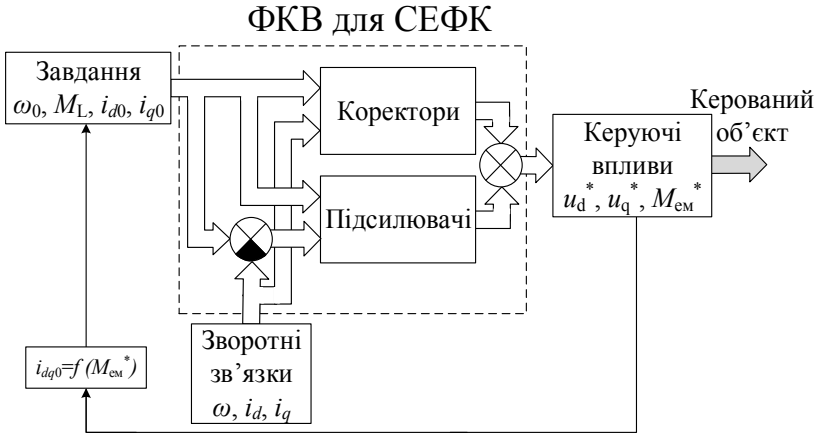


Рис. 1. Структурна схема інформаційної частини СЕФК електроприводу з СМПМ

ФКВ (8) поступається за швидкодією відомій СПР роботою векторно керованої СМПМ з компенсацією перехресних зв'язків, має статичну похибку і є більш чутливою до параметричних змін об'єкта керування. Таким чином, постає завдання синтезу СЕФК, що забезпечувала б кращі статичні і динамічні показники САК.

Для вирішення такого завдання було запропоновано ввести у СЕФК механічне демпфування, що буде виконувати форсування перехідних процесів основної регульованої координати системи – кутової швидкості СМПМ. Формування нової структури ФКВ відбувається зміною вигляду матриці демпфування $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ шляхом введенням в неї третього діагонального елемента r_3 – коефіцієнта механічного демпфування. Тоді матриці системи керування ($\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ і $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$) будуть повністю заповненими, і результуючий ФКВ, який назвемо повним, буде мати нові регульовальні можливості.

Реалізувати вказане механічне демпфування запропоновано шляхом корекції завдання на електромагнітний момент машини. Варто відзначити, що зміна моменту може здійснюватися лише шляхом регулювання струмів СМПМ, тобто електричним способом. Однак, оскільки струми формуються фазними напругами, то відпрацювання завдання на момент здійснюватиметься із інерційністю, зумовленою електромагнітними сталими часу обмотки якоря СМПМ. Це вноситиме деяку невідповідність з бажаним гамільновим формалізмом, яка, проте, не вплине на пасивність системи. Вираз повного ФКВ, знайдений з рівняння (3) із запропонованим способом реалізації механічного демпфування, має такий вигляд:

$$\begin{cases} u_d^* = \overbrace{R_s i_{d0} - p_p L_q i_q \omega_0}^{\text{коректори}} & \overbrace{-r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) - p_p L_d i_{q0}(\omega - \omega_0)}^{\text{підсилювачі}} \\ u_q^* = R_s i_{q0} + p_p(\Phi + L_d i_d)\omega_0 & -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + p_p L_q i_{d0}(\omega - \omega_0) \\ M_{em}^* = M_L & -r_3(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (9)$$

У випадку складнішої механічної частини приводу, наприклад, двомасової, введене запропонованим способом механічне демпфування другої маси буде ще більше віддалене від керуючої дії ФКВ, що зменшуватиме дієвість цього демпфування. Для усунення інерційності такої дії можна коректуючі впливи здійснювати через відповідні форсуючі ланки.

виявили наступне: коефіцієнти електричного демпфування r_1 та r_2 забезпечують форсування роботи САК за рахунок прискорення перехідних процесів у струмовому контурі по осях d та q відповідно; порівняно з r_2 , вплив параметра r_1 на динаміку системи є незначним; коефіцієнт компенсації перехресних зв'язків k покращує роботу системи у перехідних режимах. Дослідження показали, що СЕФК з

Новизна і велика кількість параметрів налагодження ФКВ (9) для СЕФК зумовили необхідність проведення детальніших досліджень (рис. 2) та аналізу, котрі показали наступне: 1) використання механічного демпфування дає змогу покращити динамічні і статичні показники системи; 2) застосування тільки параметра r_3 (система № 4) забезпечує високі динамічні і статичні показники, найменшу чутливість до параметричних змін, є простим у налагодженні; 3) використання усіх параметрів k , r_1 , r_2 , r_3 ускладнює налаштування системи, однак забезпечує найкращу якість переходного процесу, зокрема найменший час відпрацювання із заданим перерегулюванням, астатизм САК, а також лінійність динаміки системи; 4) СЕФК з наявністю механічного демпфування (№3 та №4) забезпечують кращу лінеаризацію системи, ніж СПР з компенсацією перехресних зв'язків, а також значно кращу реакцію системи на зміну навантаження.

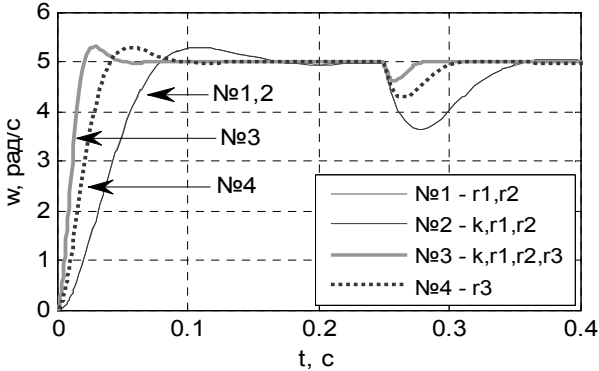


Рис. 2. Реакція кутової швидкості СМПМ $\omega(t)$ за дії тестового сигналу (завдання 10% ω_n і навантаження M_n) для різних налаштувань СЕФК

Як правило, у ФКВ для СЕФК є низка параметрів, вільних для налаштування (наприклад, r_1 , r_2 , r_3 та k). За їх значної кількості ручне налаштування ускладнюється. Тому постає завдання розроблення способу параметричного синтезу СЕФК з метою оптимізації динаміки системи щодо заданого критерію. За основу було вирішено взяти відомий спосіб параметричного синтезу шляхом формування бажаного характеристичного поліному. Застосування такого підходу з теорії лінійних систем керування до нелінійних гамільтонових систем є можливим завдяки тому, що загальний вигляд гамільтонової системи з керованими портами (1) записується у вигляді лінійної системи диференціальних матричних рівнянь, в той час як нелінійності знаходяться в елементах матриць, наприклад, взаємозв'язків $\mathbf{J}(\mathbf{x})$.

На рис. 3 представлено матричну структурну схему об'єкта керування – гамільтонової системи з керованими портами (1). У структурно синтезованій СЕФК об'єкт керування доповнюємо матричною структурною схемою ФКВ (рис. 3), що забезпечить відповідність СЕФК бажаній гамільтонової системі (2). Тоді параметричний синтез СЕФК можна здійснювати з умови формування характеристичного поліному передавальної функції саме бажаної гамільтонової системи. Підставивши у рівняння бажаної гамільтонової системи (2) описані вище вирази для формування взаємозв'язків \mathbf{J}_d і демпфування \mathbf{R}_d , а також вираз Гамільтоніана $H_d = f(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$, було одержано матричний вираз, з якого було знайдено передавальну функцію бажаної гамільтонової системи (2):

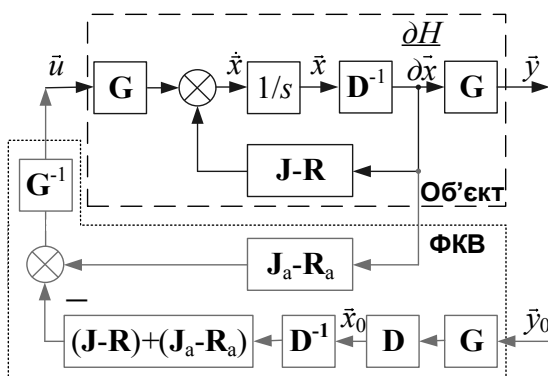


Рис. 3. Матрична структурна схема СЕФК

$$W_d(s) = \bar{\mathbf{y}} \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{y}}_0} \right)^T = - \left(s \cdot \mathbf{E} - (\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d) \mathbf{D}^{-1} \right)^{-1} \cdot (\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d) \mathbf{D}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{x}}_0 \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{x}}_0} \right)^T. \quad (10)$$

З виразу (10) було отримано характеристичний поліном СЕФК:

$$H_{W_d}(s) = \det[s \cdot \mathbf{E} - (\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d)\mathbf{D}^{-1}] = \det[s \cdot \mathbf{E} - (\mathbf{J} - \mathbf{R} + \mathbf{J}_a - \mathbf{R}_a)\mathbf{D}^{-1}]. \quad (11)$$

Прирівнявши вирази при однакових степенях s характеристичного полінома передавальної функції (11) і відповідного бажаного характеристичного полінома стандартної форми, одержимо рівняння для знаходження оптимальних значень параметрів ФКВ.

Однак, застосування даного підходу має певні обмеження. Знайдені значення параметрів ФКВ, зокрема додатково введених демпфувальних, можуть бути від'ємними, що суперечить умові $\mathbf{R}_a \geq 0$ і може негативно відбитися на стійкості САК. Тому пропонується використовувати знайдені за допомогою параметричного синтезу значення параметрів, взяті за модулем, що забезпечуватиме деяку відмінність від заданої форми перехідного процесу у напрямку збільшення швидкодії. Правильність такого підходу було підтверджено низкою досліджень. Так, для електроприводу потужністю 1 кВт при значенні середньо-геометричного кореня $\omega'_0 = 25 \text{ c}^{-1}$ середньоквадратичне відхилення перехідного процесу налаштованої САК відрізняється від заданого на 5,8% і зменшується зі зростанням ω'_0 .

Для СЕФК електроприводу на базі СМПМ з електричним та механічним демпфуваннями в результаті параметричного синтезу на біноміальну форму I-го порядку одержано наступні рівняння для знаходження параметрів ФКВ:

$$r_1 = |L_d(J\omega'_0 - K)/2J - R_s|, \quad r_2 = |L_q(J\omega'_0 - K)/2J - R_s|, \quad r_3 = |J(J\omega'_0 + K)/2J|, \quad (12)$$

де $K = \sqrt{J^2\omega'^2_0 + 4Jj_{d13}^2/L_d + 4Jj_{d23}^2/L_q}$; j_{d13} та j_{d23} – елементи матриці взаємозв'язків бажаної системи, які залежать від вектора стану.

Одержані рівняння (12) додаються до виразів ФКВ (9). Вони забезпечуватимуть динамічну зміну параметрів ФКВ в процесі роботи СЕФК, тобто ФКВ є адаптивним.

Оскільки СЕФК з пропонованим повним ФКВ самі по собі забезпечують більшу швидкодію, порівняно зі звичайними СЕФК, а синтезовані параметри беруться за модулем, що також збільшує швидкодію, порівняно із заданою ω'_0 , то динаміка налаштованої САК відрізнятиметься від бажаної. З метою знаходження параметрів, які б забезпечували перехідний процес такої СЕФК, ближчий до оптимального, а також для спрощення самої процедури параметричного синтезу, запропоновано знехтувати адаптивною складовою K у виразах (12).

Прийняті рішення були перевірені комп'ютерним симулюванням (рис. 4).

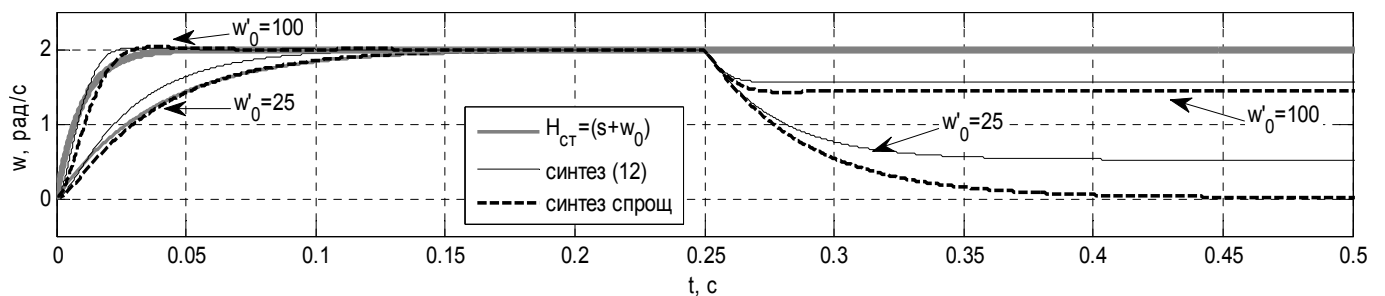


Рис. 4. Перехідні процеси кутової швидкості СМПМ при дії збурення за завданням і навантаженням для СЕФК із синтезованими параметрами ФКВ

На рис. 4 показано роботу нових СЕФК електроприводу на базі СМПМ з різними варіантами налаштувань на різну швидкодію ($1 - \omega'_0 = 30 \text{ c}^{-1}$, $2 - \omega'_0 = 100 \text{ c}^{-1}$) порівняно із заданою бажаною перехідною характеристикою $H_{ст}$. Як видно з рис. 4, обидва варіанти налаштувань забезпечують близьку до оптимальної форму перехідної характеристики.

У третьому розділі виконано синтез СЕФК двомасової ЕМС, приведено можливі структури ФКВ такої СЕФК і виділено найбільш ефективні з них, знайдено вирази для параметричного синтезу ФКВ. Проведено порівняльні дослідження роботи СЕФК, налаштованих вручну і за отриманими виразами параметризації, з СМР. Дослідження проводились за наявності проміжків у зачепленнях редуктора і без них. Перевірено ідею синтезу СЕФК об'єктами високого порядку на основі принципу суперпозиції (на прикладі двомасової ЕМС з векторно керованою СМПМ).

Розглянемо керування двомасою ЕМС на базі СМПМ на основі енергетичних підходів. Спершу модель керованого об'єкту складатиметься з пропорційної ланки, що відображає актуатор, і моделі механічної частини (13), а процедура синтезу зведеться до знаходження виразів ФКВ для СЕФК двомасової механічної системи:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{c1} - b_1\omega_1 - c\Delta\varphi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c\Delta\varphi + \beta(\omega_1 - \omega_2) - M_{c2} - b_2\omega_2 \\ c \frac{d\Delta\varphi}{dt} = c(\omega_1 - \omega_2) \end{cases}, \quad (13)$$

де J_1 та J_2 – відповідно моменти інерції ротора двигуна та механізму; ω_1 і ω_2 – кутові швидкості машини і механізму (приведена до валу машини); M – електромагнітний момент двигуна; M_{c1} та M_{c2} – статичні моменти, що діють на двигун та привідний механізм відповідно; b_1 і b_2

– коефіцієнти зовнішнього в'язкого тертя двигуна і механізму; c – коефіцієнт жорсткості трансмісії; $\Delta\varphi$ – кут скручування; β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя.

За пропонуванням підходом було знайдено низку структур повного ФКВ для нової СЕФК за використання параметра механічного демпфування за швидкістю керованого об'єкта A_{22} і параметра зв'язку між двигуном й керованим об'єктом A_{12} . Найефективнішою визнано таку структуру ФКВ двомасової механічної системи:

$$M^* = M_{c1} + M_{c2} + b_1\omega_{1,0} + b_2\omega_{2,0} - A_{11}(\omega_1 - \omega_{1,0}) - A_{12}(\omega_1 + \omega_2 - 2\omega_{2,0}) - A_{22}(\omega_2 - \omega_{2,0}). \quad (14)$$

Знайдені вирази для синтезу оптимальних параметрів ФКВ для СЕФК двомасової системи, що в подальшому були застосовані до ФКВ (14), є наступними:

$$\begin{cases} A_{11} = A_{d11} - \beta - b_1 = J_1\omega'_0 - \beta - b_1 \\ A_{12} = \beta - A_{d12} = \beta \\ A_{22} = A_{d22} - \beta - b_2 = J_2\omega'_0 - \beta - b_2 \end{cases}. \quad (15)$$

Результати порівняльних досліджень роботи нової СЕФК із синтезованими за (15) налаштуваннями з СМР показано на рис. 5 (розгін до $\omega_0 = 0,05 \omega_n$, накидання номінального навантаження M_n та гальмування). Як видно з отриманих осцилограм та проведених досліджень, СЕФК, на відміну від СМР, забезпечує астатизм відпра-

цювання сигналу завдання на швидкість, практично нульову статичну похибку (за наявності спостерігача M_c) при накиданні навантаження, потребує меншої кількості відомостей про керований об'єкт, є простішою у реалізації і параметричному синтезі, а також стійкою до параметричних змін і введення нелінійності у формі люфту. Однак, за відсутності інформації про навантаження у двомасовій СЕФК з'являється статична похибка, яка є співмірною з СМР.

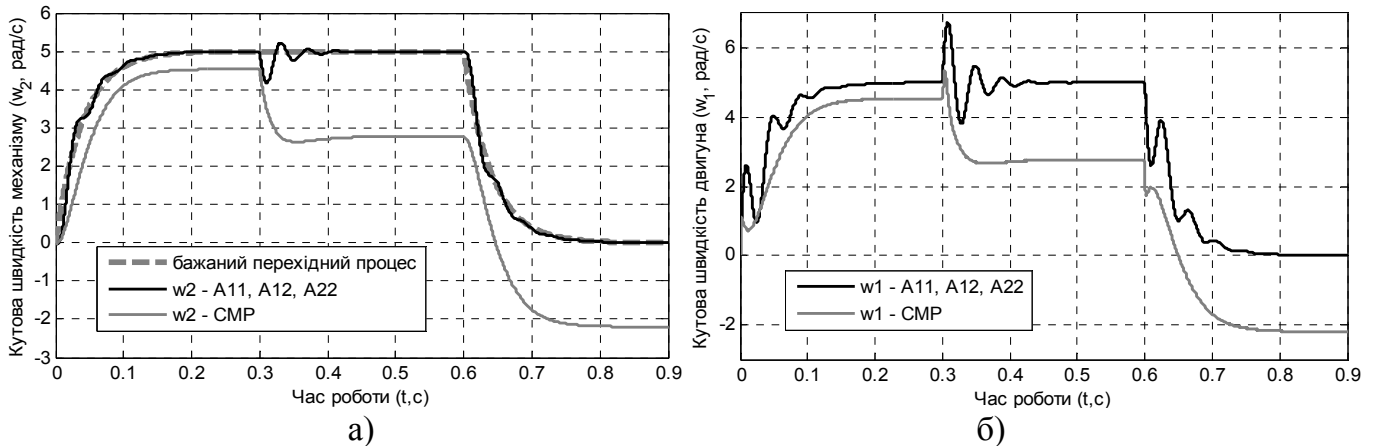


Рис. 5. Порівняння кутових швидкостей привідного механізму (а) і двигуна (б) двомасової системи з СМР та СЕФК

Перевірено ідею щодо здійснення синтезу СЕФК нелінійними об'єктами високого порядку за таким алгоритмом: їх розбиття на простіші лінійно зв'язані підсистеми, синтезу ФКВ для кожної з підсистем та наступного об'єднання отриманих ФКВ для підсистем у загальний ФКВ. Таким чином було побудовано ФКВ для цілої двомасової ЕМС шляхом доповнення ФКВ електроприводу СМПМ виразами ФКВ двомасової механічної системи. При цьому третє рівняння у (9) було замінено виразом (14). У результаті було одержано математичну модель ФКВ загальної СЕФК двомасової ЕМС:

$$\begin{cases} u_d^* = -r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - pL_d i_{q0}(\omega - \omega_0) - pL_q i_q \omega_0 \\ u_q^* = -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + pL_q i_{d0}(\omega - \omega_0) + p(\Phi + L_d i_d)\omega_0 \\ M_{ем}^* = M = M_{c1} + M_{c2} + b_1 \omega_{1.0} + b_2 \omega_{2.0} - A_{11}(\omega_1 - \omega_{1.0}) - \\ \quad - A_{12}(\omega_1 + \omega_2 - 2\omega_{2.0}) - A_{22}(\omega_2 - \omega_{2.0}) \end{cases}, \quad (16)$$

Як показали дослідження, така СЕФК є асимптотично стійкою та забезпечує ефективне керування процесами як у механічній, так і електричній частинах.

У четвертому розділі описано особливості конструкції і роботи малопотужних вітроелектроустановок (ВЕУ) та завдання керування ними, обґрунтовано актуальність синтезу СЕФК для ВЕУ як реальної нелінійної ЕМС. Одержано ФКВ для СЕФК ВЕУ як з одно-, так і з двомасовою механічними частинами, вдосконалено структури ФКВ для здійснення керування без давача швидкості вітру. Проведено порівняльні дослідження розробленої СЕФК з відомою системою керування за Morimoto. Запропоновано режим «оптимальної швидкодії» ВЕУ.

З метою перевірки ефективності використання, енергетичні підходи було засто-

совано для синтезу СЕФК реальної нелінійної ЕМС – автономної ВЕУ малої потужності з вертикальною віссю обертання та з СГПМ. Вибір такої ЕМС зумовлено стрімким розвитком «зеленої» енергетики та високою ефективністю використання саме таких установок за метеоумов, характерних для України, а також відносною складністю будови системи та низкою її нелінійностей.

Потужність вітроротора (ВР) при дії вітру певної швидкості V_B описується виразом: $P_{BR} = 0,5 \rho_{\Pi} A C_P(\lambda) V_B^3$, де ρ_{Π} – густина повітря; $C_P(\lambda)$ – коефіцієнт використання потужності вітру; A , $\lambda = \omega R / V_B$, R і ω – відповідно, площа омивання, швидкохідність, радіус і кутова швидкість ВР. Для забезпечення максимального відбору потужності від вітру потрібно підтримувати максимальне значення коефіцієнта $C_{Pmax}(\lambda) = C_P(\lambda_{opt})$, а отже, – оптимальну кутову швидкість ВР $\omega_{opt} = \lambda_{opt} V_B / R$. Одним із найбільш поширених способів автоматичного керування роботою ВЕУ є бездавачеве (без давача швидкості вітру) керування за Morimoto – для біжучої кутової швидкості ВР ω системою керування створюється таке електричне навантаження генератора, яке відповідає оптимальному для цієї кутової швидкості значенню створюваного генератором моменту на валу ВР: $M_{BR} = K_M \omega^2$, де $K_M = 0,5 \rho_{\Pi} A C_{Pmax} (R / \lambda_{opt})^3$. Таке керування є фактично регулюванням за відхиленням значення кутової швидкості ВР від оптимального для конкретної швидкості вітру. В усталеному режимі система прямує до цього оптимального значення, тобто здійснюється екстремальне регулювання, за якого ВР відбирає від вітру максимальну потужність. Проте за швидкозмінних (турбулентних) вітрів з малою середньою швидкістю швидкодія такого регулювання суттєво знижується.

З метою усунення вказаних недоліків, для ВЕУ на базі СГПМ, навантаженого через активний випрямляч напруги (АВН) на акумуляторну батарею, з одномасовою та двомасовою (для різних варіантів конструктивного виконання) ЕМС синтезовано різні СЕФК. У випадку двомасової ВЕУ одержано наступний вираз для ФКВ:

$$\begin{cases} u_{dc} \mu_d^* = -r_1(i_d - i_{d0}) - k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - p L_d i_{q0}(\omega - \omega_0) - p L_q i_q \omega_0 \\ u_{dc} \mu_q^* = -r_2(i_q - i_{q0}) + k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p L_q i_{d0}(\omega - \omega_0) + p(\Phi + L_d i_d) \omega_0 \\ M_{em}^* = M_{BR} + \omega_0(b_1 + b_2) - A_{11}(\omega_1 - \omega_0) - A_{12}(\omega_1 + \omega_2 - 2\omega_0) - A_{22}(\omega_2 - \omega_0) \end{cases}, (17)$$

де μ_d^* і μ_q^* – сигнали завдання на щільність АВН у координатах $d-q$; $M_{BR} = 0,5 \rho_{\Pi} A C_P(\lambda) (R / \lambda)^3 \omega^2$ – момент, що розвивається ВР; ω_1 та ω_2 – кутові швидкості відповідно першої (СГПМ) та другої (ВР) мас.

У випадку одномасової механічної частини третє рівняння системи (17) набуде вигляду $M_{em}^* = M_{BR} - r_3(\omega - \omega_0)$.

Для здійснення екстремального швидкодіючого керування, основним сигналом завдання даної СЕФК повинен бути сигнал завдання на кутову швидкість: $\omega_0 = \omega_{opt}$. Як момент ВР M_{BR} на вхід коректора ФКВ подається сигнал завдання на момент, оптимальний для конкретної швидкості вітру $M_0 = 0,5 \rho_{\Pi} A R C_{Pmax} V_B^2 / \lambda_{opt}$, що забезпечить точніше формування коректорами бажаної точки рівноваги x_0 . Отож, ФКВ (17) передбачає наявність давача швидкості вітру.

З метою спрощення апаратної частини системи керування ВЕУ, зокрема забезпечення керування без давача швидкості вітру та давача кутової швидкості ВР, в структурі ФКВ (17) як момент ВР було взято його біжуче значення, аналогічно до регулювання за Morimoto. Таким чином отримано наступні вирази ФКВ бездавачевої двомасової СЕФК:

$$\begin{cases} u_{dc}\mu_d^* = -k(i_q - i_{q0}) + R_s i_{d0} - pL_d i_{q0}(\omega_{z1} - \omega_1) - pL_q i_q \omega \\ u_{dc}\mu_q^* = k(i_d - i_{d0}) + R_s i_{q0} + p_p L_q i_{d0}(\omega_z - \omega) + p(\Phi + L_d i_d)\omega \\ M_{em}^* = K_m \omega_1^2 + \omega_1(b_1 + b_2) - A_{11}(\omega_{z1} - \omega_1) - A_{12}(\omega_{z1} + \omega_{z2} - 2\omega_1) - A_{22}(\omega_{z2} - \omega_1) \end{cases}, (18)$$

де $\omega_{z1} = \omega_1 / (T_{w1}s + 1)$ і $\omega_{z2} = \omega_1 / (T_{w2}s + 1)$ – є сигналами кутових швидкостей, що пройшли через фільтри нижніх частот, а T_{w1} і T_{w2} – сталі часу фільтрів зворотних зв'язків у контурах швидкості СМПМ і ВР відповідно (призначені для здійснення форсування за відповідними швидкостями).

Для бездавачевої СЕФК з одномасовою механічною частиною третє рівняння системи (18) набуде вигляду $M_{em}^* = K_m \omega^2 - r_3 (\omega_{z1} - \omega)$.

Місцям де використовуються вказані малопотужні ВЕУ притаманні турбулентні вітри, за яких робота в режимі максимального відбору енергії вітру є обтяженою, оскільки потрібно своєчасно відслідковувати робочу точку з C_{Pmax} . Це призводить до постійної роботи системи у перехідних режимах, що, у свою чергу, зумовлює додаткові втрати енергії, як аеродинамічні, так і електричні, в СГПМ. Тому було запропоновано поняття «оптимальної швидкодії», яке полягає у такій оптимальній динаміці СЕФК для ВЕУ, при якій досягається компроміс між аеродинамічними втратами енергії вітру та втратами у генераторі, що дає змогу отримувати максимум електричної енергії від турбулентного вітру. Робота у такому режимі передбачає почергову роботу СМПМ як в режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Представлені ФКВ (17) і (18) мають широкі можливості для налагодження, зокрема можуть бути налаштовані на потрібну швидкодію ВЕУ, наприклад, за допомогою найбільш дієвого параметра механічного демпфування r_3 . На рис. 6 показано, як змінюються показники роботи дослідної ВЕУ з номінальною потужністю 0,5 кВт при роботі на турбулентному вітрі для СЕФК різної швидкодії (від r_3), а саме: σ_ω – середньоквадратичне відхилення ω від ω_{opt} , що ілюструє аеродинамічні втрати ВР; $W_{\Delta P}$ – втрати енергії в обмотках якоря генератора; $K_{відб}$ – відносна кількість відібраної енергії, порівняно з ідеальною системою. Як видно із показаних залежностей, «оптимальна швидкодія» забезпечується приблизно значенням $r_3 = 7$, найбільше проявляється на малих швидкостях вітру і практично не залежить від середньої величини швидкості вітру.

Результати комп'ютерного симулювання у вигляді накопичення енергій – вихідної електричної і втрат в генераторі – під час роботи на турбулентному вітрі ($V_B = 2 \div 10$ м/с) дослідної ВЕУ з СЕФК (18) при налаштуванні на різну швидкодію ($r_3 = 0$ – мала, $r_3 = 7$ – «оптимальна швидкодія», $r_3 = 100$ – висока) показано на рис. 6. За час симулювання протягом 400 с ВЕУ з СЕФК і «оптимальною швидкодією» отримано на 8% більше електроенергії, ніж при $r_3 = 0$ (регулювання подібне Morimoto)

і на 9% більше, ніж при $r_3 = 100$ (швидке регулювання для підтримання C_{Pmax}).

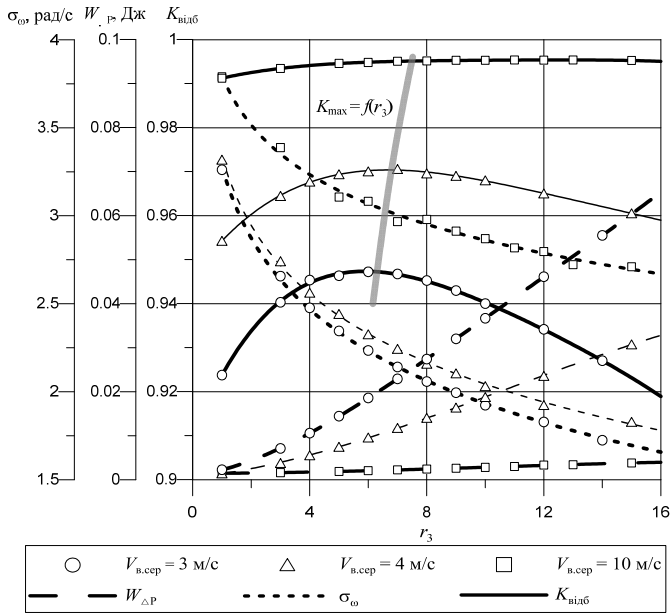


Рис. 6. Залежності показників роботи ВЕУ від коефіцієнта механічного демпфування для різних середніх швидкостей турбулентного вітру

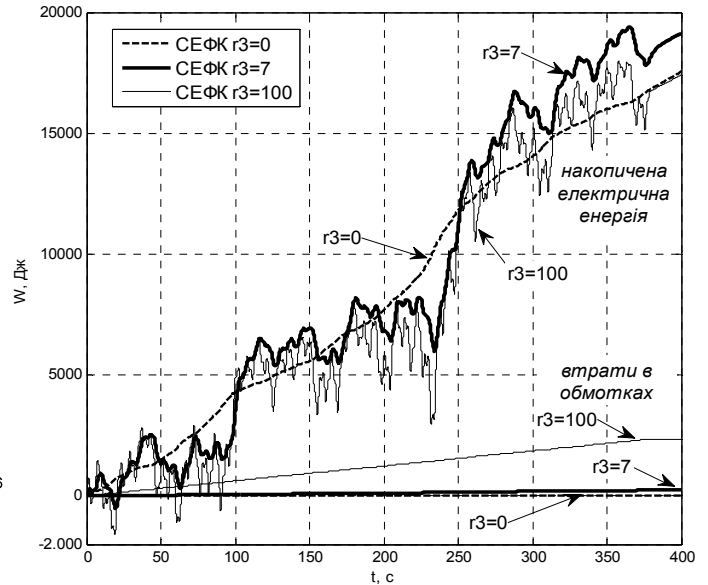


Рис. 7. Результати моделювання енергії, отриманої від генератора протягом дослідного періоду при роботі ВЕУ з різними системами керування за $V_{в.ср} = 4$ м/с

У п'ятому розділі приведено опис створеної експериментальної установки для дослідження СЕФК електроприводу з СМПМ та порівняно результати експериментальних і комп'ютерних досліджень роботи СЕФК з різними структурами ФКВ.

З метою підтвердження одержаних у розділі 2 результатів роботи різних СЕФК електроприводів на базі СМПМ, було створено дослідну установку (рис. 8). Вона складається з: СМПМ 6, АВН з мікроконтролерним керуванням 2, персонального комп'ютера 1, навантажувальної машини постійного струму 5, пасової передачі 4, абсолютного енкодера 3 і двох давачів струму на ефекті Хола 7.

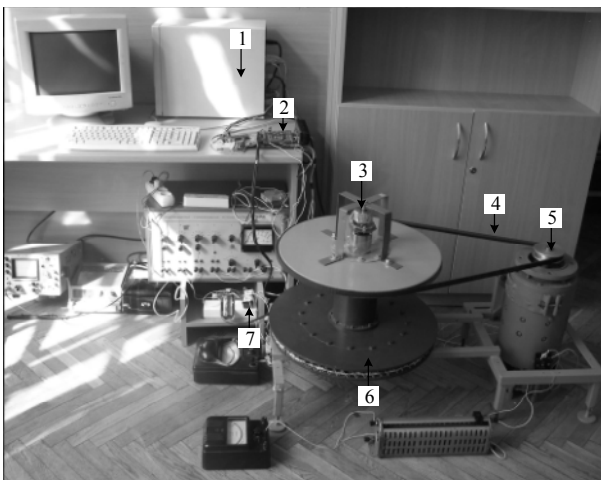


Рис. 8. Загальний вигляд дослідної установки

та затримками в комунікаціях між комп'ютером та мікроконтролером. Порівняння результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання підтве-

Експериментальні дослідження (рис. 9) показали, що ФКВ з електричним демпфуванням забезпечує прискорення перехідного процесу та незначне зменшення статичної похибки. Підтверджено також, що введення механічного демпфування дає змогу СЕФК суттєво покращити як динаміку системи, так і її статику. Однак, залежність такої структури ФКВ від сигналу зворотного зв'язку за швидкістю призвело до зростання коливань у системі, які зумовлені багатополосністю СМПМ (38 пар полюсів), наявністю значного зубцевого моменту, недостатньою для такої машини роздільною здатністю енкодера

рджують відповідність розробленої комп'ютерної моделі: розбіжності знаходяться в допустимих межах – до 15%.

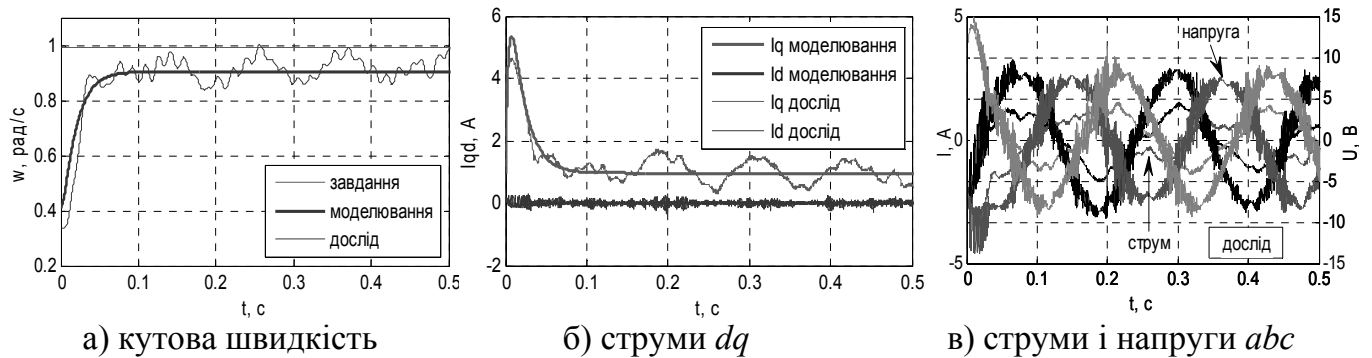


Рис. 9. Порівняння результатів моделювання та експерименту при $\omega_0 = 0,11\omega_H$

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу синтезу системи енергоформуючого керування нелінійними електромеханічними системами на базі СМПМ, які описуються як гамільтонові системи з керованими портами. Розширено можливості їх структурного синтезу та запропоновано процедуру параметричного синтезу формувачів керуючих впливів для них, що дало змогу покращити динамічні і статичні показники САК та формалізувати процедуру оптимізації їх параметрів.

1. Одним з нових і перспективних напрямків побудови систем керування складними нелінійними об'єктами є енергоформуюче керування шляхом формування бажаних взаємозв'язків та демпфування, яке відноситься до енергетичних підходів. Відомо лише поодинокі випадки застосування енергетичних підходів до ЕМС на базі СМПМ, однак, проведений аналіз показав, що отримані в результаті структури ФКВ є або малоефективними, або стають складними для розуміння та налагодження. Тому розроблення СЕФК для ЕМС з СМПМ, що будуть водночас ефективними і простими для налагодження, є актуальною науковою задачею.

2. Запропонований спосіб синтезу повного ФКВ для ЕМС дає змогу, без втрати асимптотичної стійкості СЕФК, вводити додаткові регулюючі впливи у ланки механічної системи шляхом відповідної корекції роботи ФКВ, що суттєво розширює можливості для налаштування і покращує показники СЕФК.

3. Запропоновані структури ФКВ для ЕМС з СМПМ, де основним регулюючим впливом є демпфування за механічною координатою (швидкістю) електричним шляхом, забезпечують: простоту у налагодженні (є один основний параметр налаштування), прискорення протікання перехідних процесів порівняно з відомими структурами втричі, зменшення статичної похибки, стабільність динаміки усієї системи, широкі можливості формування структури ФКВ в залежності від поставленої задачі.

4. Розроблена процедура параметричного синтезу ФКВ, у якій використовується принцип формування бажаного характеристичного поліному замкненої САК, дає змогу отримати СЕФК з оптимальними за заданим критерієм налаштуваннями. Такі СЕФК виключають необхідність у найважчому – первинному налаштуванні системи для забезпечення необхідного перехідного процесу, з одного боку, а з іншого, – їх параметри є прив'язаними до фізичних координат системи і тому суттєво спро-

щується процедура остаточного кінцевого налаштування системи, яке може бути виконано за запропонованим алгоритмом.

5. Для синтезу СЕФК нелінійних ЕМС високого порядку на базі векторно керованої СМПП достатньо: розбити їх на лінійно-зв'язані підсистеми, провести синтез СЕФК для цих підсистем і об'єднати знайдені ФКВ в один ФКВ комплексної СЕФК всією системою, що відповідатиме повному ФКВ, синтезованому одразу для всієї системи. За допомогою даного підходу було одержано простий і ефективний ФКВ для СЕФК двомасовою ЕМС, що враховує особливості її підсистем і забезпечує широкі можливості для налаштування.

6. Використання СЕФК електричного навантаження СГПМ у складі ВЕУ, яка працює у режимі «оптимальної швидкодії», дає змогу збільшити у порівнянні з відомими системами керування відбір енергії від турбулентного вітру на 0,4-8,1%; перевага особливо проявляється при турбулентних та поривчастих вітрах з малою середньою швидкістю, які є характерними для України.

7. З метою досягнення нових властивостей, СЕФК може бути поєднана з іншими типами систем керування. Так, при поєднанні розробленої СЕФК електричного навантаження СГПМ у складі ВЕУ з відомою бездавачевою системою керування ВЕУ за Morimoto одержано нову СЕФК без давача швидкості вітру, яка не поступається за своїми показниками базовій СЕФК з давачем швидкості вітру і має значні переваги порівняно з САК за Morimoto.

8. Результати експериментальних досліджень на виготовленому стенді з комп'ютерно-контрольною реалізацією системи керування збігаються з результатами симулювання на розробленій комп'ютерній імітаційній моделі в межах допустимої похибки до 15%, що підтверджує адекватність отриманих в результаті математичного моделювання показників ефективності використання запропонованих структур ФКВ для СЕФК векторно керованою СМПП.

9. Отримані теоретичні результати впроваджено у навчальний процес кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка», а практичні результати використовуються у науково-дослідних роботах, що виконуються на основі госпдоговорів у Спеціальному конструкторському бюро ЕМС Львівської політехніки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Щур І. З. Застосування принципів пасивного керування до синхронної машини з постійними магнітами як Гамільтонової системи з керованими входами/виходами [Текст] / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – К.: Техніка, 2011. – № 3 (79). – С. 77–79.

2. Білецький Ю. О. Структури системи енергоформуючого керування синхронною машиною з постійними магнітами як Гамільтоновою системою [Текст] / Ю. О. Білецький // Зб. мат. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 104–105.

3. Щур І. З. Енергетичні підходи в керуванні нелінійними системами (на прикладі синхронної машини з постійними магнітами) [Текст] / І. З. Щур,

Ю. О. Білецький // Вісн. Націон. ун-ту "Львівська політехніка": «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – Львів, 2012. – № 736. – С. 139–145.

4. Щур І. З. Енергоформуєче керування двомасовою електромеханічною системою у гамільтоновому представленні [Текст] / І.З. Щур, Ю.О. Білецький // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Кременчук: КрНУ, 2012. – № 3 (19). – С. 435–438.

5. Щур І. З. Енергоформуєче оптимальне керування навантаженням вітроелектроустановки з синхронним генератором на постійних магнітах [Текст] / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Наук. пр. Донецьк. націон. тех. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика». – Д.: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – № 2 (15). – С. 280–286.

6. Білецький Ю.О. Енергоформуєче оптимальне керування синхронним генератором з постійними магнітами у складі вітроелектроустановки без давача швидкості вітру [Текст] / Ю. О. Білецький // Вісн. Націон. тех. ун-ту «ХП», Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків, 2013. – № 36 (1009) – С. 403–407.

7. Щур І. З. Поліфункціональне енергоформуєче керування роботою вітроелектроустановки [Текст] / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 2 (26). – С. 79–82.

8. Biletskyi Y. Mechanical damping in energy-shaping control system of permanent magnet synchronous motor [Electronic Resource] / Y. Biletskyi, I. Shchur, S. Shcherbovskyh // Proc. of the 4th Int. Conf. of Young Scientists EPECS-2013: Electr. edition on CD-ROM. – Lviv, 2013. – P. 76–77.

9. Shchur I. Optimization of energy-shaping control of port-controlled hamiltonian system [Text] / I. Shchur, Y. Biletskyi // Computational problems of electrical engineering. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – Vol. 3. – N 2. – P. 101–106.

10. Shchur I. Energy-shaping optimal load control of PMSG in a stand-alone wind turbine as a port-controlled Hamiltonian system [Text] / I. Shchur, A. Rusek, Y. Biletskyi // Przegląd elektrotechniczny (Electrical review). – 2014. – Vol. 5. – P.50–55.

АНОТАЦІЯ

Білецький Ю. О. Енергоформуєче керування електромеханічними системами на базі синхронної машини з постійними магнітами. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – "Електротехнічні комплекси та системи". – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню наукової задачі синтезу системи енергоформуєчого керування (СЕФК) нелінійними електромеханічними системами (ЕМС) на базі СМПМ. Проведено дослідження та аналіз наявних структур ФКВ для СЕФК електроприводами на базі СМПМ. Запропоновано спосіб введення додаткових впливів у ланки механічної частини ЕМС, за яким одержано нові структури ФКВ з параметром механічного демпфування. Проведено аналіз та порівняльні дослідження роботи СЕФК за різних структур ФКВ з відомою системою векторного керування СМПМ на основі підпорядкованого регулювання. Запропоновано спосіб оптимального параметричного синтезу гамільтонових систем, який перевірено на СЕФК еле-

ктроприводів постійного струму та на базі СМПМ. Виконано синтез СЕФК двома-совою ЕМС. Одержано ФКВ для СЕФК електричним навантаженням вітроелектроустановки (ВЕУ) з на базі синхронного генератора з постійними магнітами та одно- і двомасовою механічною частинами. Запропоновано режим «оптимальної швидкості» ВЕУ. Проведено порівняння результатів експериментальних та комп'ютерних досліджень роботи СЕФК з різними структурами ФКВ.

Ключові слова: енергетичні підходи, енергоформуєче керування, гамільтонова система з керованими входами/виходами, синхронна машина з постійними магнітами, векторне керування, двомасовий електропривід, структурно параметричний синтез, вітроелектроустановка, оптимальне керування.

АННОТАЦІЯ

Билецкий Ю. О. Энергоформирующее управление электромеханическими системами на базе синхронной машины с постоянными магнитами. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – "Электротехнические комплексы и системы". – Национальный университет "Львівська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2014.

Диссертация посвящена решению важной научной задачи синтеза системы энергоформирующего управления (СЭФУ) нелинейными электромеханическими системами (ЭМС) на базе синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ).

Освещена проблема синтеза систем управления нелинейными объектами и приведен краткий обзор подходов к их синтезу. Особое внимание сосредоточено на энергетических подходах. Описано процедуру одного из них – синтезу СЭФУ. Подробно описана процедура построения СЭФУ электропривода на базе векторно управляемой СМПМ как гамільтоновой системы с управляемыми портами и получены выражения формирователя управляющих воздействий (ФУВ). Исследованы существующие структуры ФУВ для СЭФУ электроприводами на базе СМПМ. Предложены новые структуры ФУВ путем введения в матрицы системы управления параметра механического демпфирования, что обеспечивает форсирование переходных процессов. Проведены анализ и сравнительные исследования работы СЭФУ для различных структур ФУВ с известной системой векторного управления СМПМ на основе системы подчиненного регулирования. Разработаны алгоритм ручной настройки СЭФУ и процедура оптимального параметрического синтеза ФУВ. Представлены результаты сравнительных исследований с другими известными системами. Выполнен синтез СЭФУ двухмассовой ЭМС, приведены возможные структуры ФУВ и выделены наиболее эффективные из них, также найдены выражения для параметрического синтеза ФУВ. Проведены сравнительные исследования работы СЭФУ, настроенных вручную и по полученным выражениям параметризации, с системой модального управления. Исследования проводились при наличии щелей в зацеплениях редуктора и без них. Предложено осуществлять синтез СЭФУ сложными ЭМС (на примере двухмассовой ЭМС с векторно управляемой СМПМ) путем разбития системы на простые подсистемы, синтеза ФУВ для СЭФУ каждой из них в

отдельности с последующим объединением этих ФУВ в один ФУВ комплексной СЭФУ.

В качестве примера использования полученных теоретических результатов они применены к реальному нелинейному объекту – ветроэлектроустановке (ВЭУ) с синхронным генератором с постоянными магнитами, электрическая нагрузка которого оптимально регулируется с помощью активного выпрямителя. Описаны особенности маломощных ВЭУ и задачи управления ими, обоснована актуальность синтеза СЭФУ для ВЭУ как нелинейной ЭМС. Получены ФУВ для ВЭУ как с одно-, так и двухмассовой механическими частями, усовершенствованы структуры ФУВ для осуществления управления ВЭУ без датчика скорости ветра. Проведены сравнительные исследования с известной системой управления по Morimoto. Предложен режим «оптимального быстрогодействия» ВЭУ. Разработаны полифункциональные СЭФУ для работы ВЭУ на порывчатых ветрах.

Приведено описание экспериментальной установки для исследования СЭФУ электроприводом на базе СМПМ. Проведено сравнение результатов физических и компьютерных экспериментов работы СЭФУ с разными структурами ФУВ.

Ключевые слова: энергетические подходы, энергоформирующее управление, гамильтоновая система с управляемыми портами, синхронная машина с постоянными магнитами, векторное управление, двухмассовый электропривод, структурно-параметрический синтез, ветроэлектроустановка, оптимальное управление.

ABSTRACT

Biletskij Y. O. Energy-shaping control of electromechanical systems based on permanent magnet synchronous machine. – *On manuscript*.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – "Electrotechnical complexes and systems". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2014.

Dissertation is devoted to solution of scientific task of synthesis of energy-shaping control system (ESCS) for nonlinear electromechanical systems (EMS) based on permanent magnet synchronous machine (PMSM). There were conducted the analysis and the researches of present control signal former (CSF) structures for ESCS with PMSM. There was proposed the way of injecting the additional actions to the mechanical part of EMS, by which the new CSF structures with mechanical damping parameter were obtained. The analysis and the comparative researches of various CSF structures of ESCS with a known vector control system were conducted. The way of optimal parametric synthesis of port-controlled Hamiltonian systems was proposed and tested on ESCSs of DC and PMSM electric drives. The synthesis of ESCS was made for two-mass EMS. Different CSFs were obtained for ESCS of PMSG for wind turbine with a single and two-mass mechanical parts. There was proposed the optimal performance mode for wind turbines. The comparison results of experimental and computer researches of ESCSs work with different CSF structures is shown.

Keywords: energy-based approaches, energy-shaping control, port-controlled Hamiltonian system, permanent magnet synchronous machine, vector control, two-mass electric drive, structurally parametrical synthesis, wind energy conversion system, optimal control.