

УДК 621.77

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ И УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ***Никитина Т.Б., к.т.н., доц.**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»**61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21**E-mail: [bikuznetsov@mail.ru](mailto:bikuznetsov@mail.ru)*

Розроблено метод параметричного синтезу нелінійного робастного управління багатоканальними системами, що працюють за принципом грубого і точного управління відповідно до ітераційного алгоритму. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

**Ключові слова:** багатоканальна система, параметричний синтез.

A method of parameters synthesis for robust control of multichannel system workings on rough and exact control principle in accordance with iteration algorithm is developed. The example of dynamic descriptions for synthesized system is resulted.

**Key words:** multichannel system, parameters synthesis.

**Введение.** Применение многоканальных систем, работающих по принципу грубого и точного управления, позволяет существенно повысить точность управления, а в ряде случаев, обеспечить точность, недостижимую в одноканальных системах [1-3]. Такие системы применяются в тех случаях, когда с помощью одноканальных систем принципиально невозможно обеспечить требуемую точность управления. Это, в частности, касается систем управления большими антеннами и радиотелескопами, тяжелыми станками с ЧПУ, роботами и манипуляторами, прокатными станами, системами частотной и фазовой автоподстройки генераторов, оптических дисковых систем записи информации, источников питания с высоким качеством выходной энергии и многих других. Особенно эффективно совместное использование в многоканальных системах электро-механических и электрогидравлических приводов, а также магнито-стрикционных либо пьезострикционных двигателей, жестко закрепленных на подвижной каретке, управляемой основными силовыми приводами.

Повышение точности многоканальных систем сдерживается наличием нелинейных и упругих элементов, что проявляется в неплавном движении рабочего органа, сопровождающегося остановками и рывками при движении рабочего органа на нижнем пределе рабочих скоростей. Рассмотрим параметрический синтез многоканальных систем цифрового нелинейного управления с учетом нелинейных и упругих элементов объекта управления

**Анализ предыдущих исследований.** Для реше-

ния задач параметрического синтеза динамических систем разработаны многочисленные подходы и выполнены их программные реализации. В частности, с помощью пакета программ MATLAB можно определить параметры системы таким образом, чтобы переходный процесс находился в допустимой области, заданной отрезками прямых линий. При этом модели объекта управления, регуляторов, обратных связей и т.д. могут задаваться как в виде передаточных функций, так и в виде блоков пространства состояний и содержать нелинейные элементы. Кроме того, имеются разнообразные программные средства для решения задач нелинейного программирования, к которым обычно сводятся задачи параметрического синтеза динамических систем.

Вопросы параметрического синтеза многоканальных систем данного класса рассмотрены в работах [1-3]. Однако, синтезированные таким образом многоканальные системы обладают высокой чувствительностью к изменению параметров и структуры объекта управления и внешних воздействий [4-5]. Кроме того, синтез параметров в этих системах выполнен по одному интегральному квадратичному критерию [3-6].

В последнее время широкое развитие получили методы синтеза робастных систем управления, обеспечивающих слабую чувствительность синтезированных систем к изменению параметров и структуры объекта управления и внешних воздействий. В работах [7-8] рассмотрены вопросы синтеза многоканальных систем робастного управления при непрерывном управлении. Современные системы

управління реалізуються на цифровій елементній базі. В роботі [9] розглянуті питання синтезу багатоканальних систем цифрового робастного управління при послідовальному синтезі окремих каналів.

Однак в цих роботах не приведена методика вибору самого критерію якості робастного управління, що не дозволяє реалізувати технічні вимоги, пред'явлювані до системи. Єстественно, що ні в одному технічному завданні на проектувану систему немає критерію робастного управління, однак до системи пред'являються численні вимоги по її роботі в різних режимах.

**Ціль роботи** – обґрунтування вибору структури та оптимізація параметрів цифрового нелінійного регулятора багатоканальної системи, що дозволяє забезпечувати спроможність системи при зміні моделей об'єктів управління та зовнішніх впливів та високої точності багатоканальної системи в різних режимах її роботи.

**Матеріал та результати дослідження.** К синтезуваній системі пред'являються різноманітні, часто протирічливі вимоги по роботі системи в різних режимах та при різних зовнішніх впливах: ступінчатих, лінійно – змінюючись, гармонічних, випадкових та т.д. Крім того, в різних режимах роботи змінюються та самі показники якості: при обробці великих розбіжностей необхідно мінімізувати час перехідних процесів, а при обробці малих розбіжностей необхідно мінімізувати помилку системи, яка, в значній мірі, визначається випадковими зовнішніми впливами та шумами вимірювання. Як приклад наведемо окремі критерії оптимізації, звичайно пред'явлювані до слідуючої системи. Час обробки заданого кута розбіжності –  $t_{\text{пер}}$ . Час розгону до номінальної швидкості та час гальмування до повного зупинки –  $t_{\text{раз}}$ . Помилка обробки гармонічного сигналу заданої амплітуди та частоти  $\epsilon_{\text{гар}}$ . Помилка стабілізації при випадкових зовнішніх впливах  $\epsilon_{\text{сл}}$ . Максимальна швидкість наведення  $\omega_{\text{max}}$ . Мінімальна швидкість наведення  $\omega_{\text{min}}$ . Неплавність наведення при мінімальній швидкості  $\Delta\omega_{\text{min}}$ . Єстественно, що при цьому повинні бути враховані обмеження напружень та струмів, а також швидкостей обертання приводних двигачів.

В технічних вимогах до системи звичайно задаються максимальні значення цих окремих критеріїв, що дозволяє виконати нормування. При цьому нормовані окремі критерії  $y_i$  знаходяться в діапазоні  $0 \leq y_i \leq 1$ . Приближення нормованого значення  $i$ -го окремого критерію до одиниці відповідає напруженій ситуації.

При синтезі високоточних систем управління таким напруженим окремих критерієм часто вважається нерівномірність руху робочого органу при наведенні з мінімальною швидкістю. Якщо ж величина нормованого значення окремого критерію наближається до нуля, то це відповідає спокійній ситуації. Для рішення цієї задачі багатокритеріальної оптимізації використовувалася найпростіша нелінійна схема компромісів, при якій початкова багатокритеріальна задача зводилася до однокритеріальної

де  $\alpha_i$  – вагові коефіцієнти, що характеризують важливість окремих критеріїв та визначають пріоритет окремих критеріюм, що приймає рішення. Єстественно, що така формалізація рішення задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом зведення до однокритеріальної задачі дозволяє обґрунтовано вибрати одну єдину точку з області компромісів – області Парето. Однак ця «єдинна» точка в подальшому може бути підвергнута випробуванню з метою подальшого покращення схеми компромісів з точки зору особи, що приймає рішення.

$$\mathbf{X}^* = \arg \min_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\mathbf{X})]^{-1}.$$

Замітимо, що така нелінійна схема компромісів фактично відповідає методу штрафних функцій з внутрішньою точкою, так як при наближенні  $i$ -го критерію  $y_i$  до одиниці, т.е. при напруженій ситуації, скалярна оптимізація фактично виконується тільки по цьому напруженому окремих критерію, а інші критерії со спокійною ситуацією при оптимізації практично не враховуються. Однак для початку оптимізації необхідно переконатися, що всі окремі критерії знаходяться в допустимих областях, т.е., що виконуються умови  $0 \leq y_i \leq 1$  для всіх нормованих окремих критеріїв. В протилежному випадку, окремі критерії, для яких ці умови не виконуються, переводяться в прямі обмеження.

Сучасна теорія управління в своєму арсеналі має численні та різноманітні засоби управління. Найпоширенішими, звичайно, вважаються ПІД-регулятори. Широке використання ПІД-регуляторів обумовлено цілим рядом їх непересомних переваг. По-перше, їх простота синтезу, налаштування та реалізації. По-друге, в межах структур систем підпорядкованого регулювання в ході поконтурної налаштування таких регуляторів одночасно виконується та ідентифікація об'єкта управління кожного контуру регулювання.

Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2008 (51). Частина 1

ния. В третьих, в структуре систем подчиненного регулирования достаточно просто можно ограничить переменные состояния и управления каждого контура регулирования, что является неоспоримым эксплуатационным преимуществом таких систем, как в штатных, так и в аварийных режимах работы. И, наконец, несомненным преимуществом ПИД-регуляторов является их робастность, особенно при использовании специальных методов настройки их параметров. Несмотря на то, что применение ПИД-регуляторов в подавляющем большинстве случаев позволяет получать приемлемые показатели качества регулирования, попытка их использования для управления сложными объектами с нелинейными и упругими элементами, как правило, не позволяет удовлетворить требованиям, предъявляемым к системе.

Применение управления по состоянию сложными электромеханическими системами, содержащими нелинейные и упругие элементы, позволяет получать приемлемые показатели качества. Для снижения чувствительности синтезированных систем к изменению параметров и структуры объекта управления и внешних воздействий в качестве управления по состоянию используется робастное управление. В настоящее время наиболее широкое распространение получило решение задачи нелинейного цифрового робастного управления во временной области. Нахождение нелинейного робастного управления сводится к решению уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана [6] для нелинейных моделей задающего и возмущающего воздействий и модели объекта управления многоканальной системы.

При параметрической оптимизации структура регулятора определяется в виде нелинейных обратных связей по вектору состояния и обратных связей наблюдателя, с помощью которого восстанавливается вектор состояния по вектору измеряемых переменных. Вместо решения уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана решается выше сформулированная задача многокритериальной оптимизации.

В настоящее время теория нейронных сетей является бурно развивающимся направлением и выделилась в самостоятельное научное направление. Нейронные сети применяются при решении разнообразных задач во многих областях. По-видимому, широкому применению нейронных сетей послужило, с одной стороны, стремительное развитие вычислительной техники и ее колоссальные вычислительные возможности а, с другой стороны, - совершенствование алгоритмов обучения нейронных сетей. В частности, применительно к обучению нейронных сетей хорошо зарекомендовал метод обратного распределения ошибки и другие алгоритмы.

Структура нейрорегулятора определяется интуитивно последовательным наращиванием сложности нейронной сети. Критерием правильности выбора структуры является достижение приемлемых значений компонент вектора ошибки  $\dot{\epsilon}(t)$ .

Задача синтеза нейрорегулятора по существу постановки является задачей параметрической оптимизации. При этом задается структура регулятора в виде нейронной сети, определяемой количеством скрытых слоев, количеством нейронов в слоях, а также типом функций. Далее фактически решается задача параметрической оптимизации по определению весовых коэффициентов нейронов так, чтобы критерий качества принимал минимальные значения и выполнялись ограничения на переменные состояния и управления. Эта задача нелинейного программирования может решаться с помощью разработанных методов, имеющих алгоритмическую и программную реализацию. В частности, для синтеза нейронных сетей в последнее время широкое распространение получили генетические алгоритмы. Несмотря на то, что работа этих алгоритмов копирует процесс гибели и размножения живых организмов, а его работа описывается в терминах гибели и размножения живых популяций, по существу математической постановки задачи генетический алгоритм является одним из методов решения задачи нелинейного программирования. Более того, опыт применения генетических алгоритмов для решения практических задач параметрического синтеза сложных технических систем подтвердил его высокую эффективность, однако существенных преимуществ по сравнению с правильно подобранными стандартными методами решения задач нелинейного программирования генетический алгоритм не имеет.

Рассмотрим синтез параметров регуляторов двухканальной системы с отдельной нагрузкой [3], у которой каждый канал представляет двухмассовую электромеханическую систему, схема которой показана на рис.1. Система предназначена для обработки заданных значений  $\varphi_{31}$  и  $\varphi_{32}$  углов поворота  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  первой и второй платформ. На первую и вторую платформы действуют внешние моменты сопротивления  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$ , которые являются внешними возмущающими моментами.

Платформы приводятся во вращение с помощью асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В системе используется векторное управление асинхронными двигателями с помощью преобразователей частоты (ПЧ).

Каждый канал содержит программно – аппаратный контур прямого управления моментом (ПУМ).

С помощью гироскопических датчиков углов ГДУ<sub>1</sub> и ГДУ<sub>2</sub> измеряют ошибку  $\varepsilon_1 = \varphi_{31} - \varphi_{п1}$  отработки заданного значения угла поворота  $\varphi_{31}$  с помощью первой платформы  $\varphi_{п1}$  и ошибку  $\varepsilon_2 = \varphi_{32} - \varphi_{п2}$  отработки заданного угла поворота  $\varphi_{32}$  с помощью второй платформы  $\varphi_{п2}$ . Скорости вращения первой и второй платформ  $\omega_{п1}$ ,  $\omega_{п2}$ , измеряют с помощью гироскопических датчиков угловых скоростей ДУС<sub>1</sub> и ДУС<sub>2</sub>, а скорости вращения роторов первого и второго двигателей  $\omega_{д1}$ ,  $\omega_{д2}$  измеряют с помощью датчиков скорости ДС<sub>1</sub> и ДС<sub>2</sub>.

В системе учтены нелинейные характеристики моментов внутреннего трения на валах двигателей  $M_{д1}$ ,  $M_{д2}$  и платформ  $M_{п1}$ ,  $M_{п2}$ .

Для построения математической модели двухканальной системы с отдельной нагрузкой при цифровом управлении рассмотрим вспомогательную непрерывную динамическую систему. Воспользуемся уравнениями динамики основных элементов двухканальной системы с отдельной нагрузкой следуя работе [3].

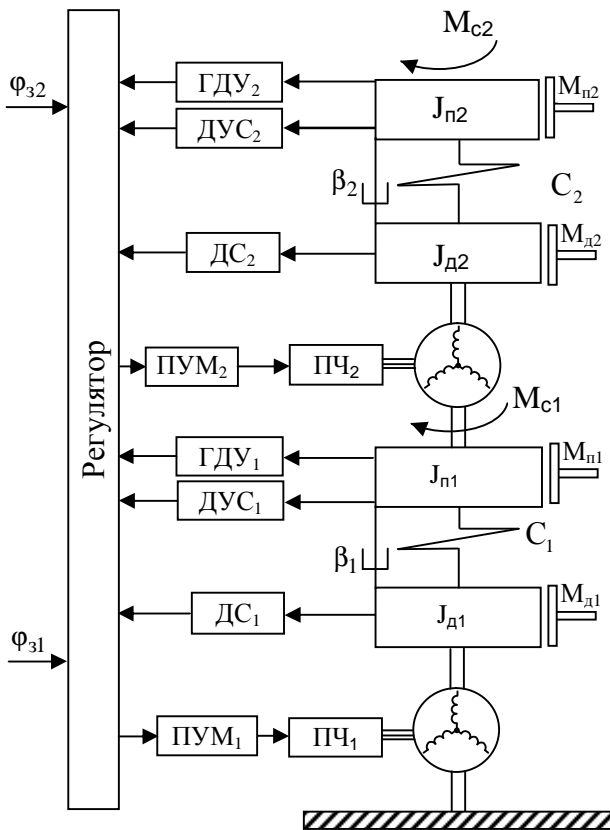


Рисунок 1 – Схема двухканальной системы

Введем вектор состояния этой вспомогательной системы, компонентами которой являются скорость вращения первого двигателя  $\omega_{д1}$ , скорость вращения первой платформы  $\omega_{п1}$ , момент упругости пер-

вой платформы  $M_{y1}$ , угол поворота первой платформы  $\varphi_{п1}$ , скорость вращения второго двигателя  $\omega_{д2}$ , скорость вращения второй платформы  $\omega_{п2}$ , момент упругости второй платформы  $M_{y2}$ , угол поворота второй платформы  $\varphi_{п2}$ , так что вектор состояния примет следующий вид

$$\mathbf{X}(t) = \{\omega_{д1}, \omega_{п1}, M_{y1}, \varphi_{п1}, \omega_{д2}, \omega_{п2}, M_{y2}, \varphi_{п2}\}^T.$$

Тогда матрица состояния примет следующий вид:

$$A = \begin{matrix} \begin{matrix} \frac{-\beta_1 - \beta_{д1}}{J_{д1}} & \frac{\beta_1}{J_{д1}} & -\frac{1}{J_{д1}} \\ \frac{\beta_1}{J_{п1}} & \frac{-\beta_1 - \beta_{п1}}{J_{п1}} & \frac{1}{J_{п1}} \\ C_1 & -C_1 & \end{matrix} \\ \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \frac{-\beta_2 - \beta_{д2}}{J_{д2}} & \frac{\beta_2}{J_{д2}} & -\frac{1}{J_{д2}} \\ \frac{\beta_2}{J_{п2}} & \frac{-\beta_2 - \beta_{п2}}{J_{п2}} & \frac{1}{J_{п2}} \\ C_2 & -C_2 & \\ & 1 & \end{matrix}$$

В матрице состояния линеаризованной системы учтены лишь линейные составляющие нелинейных характеристик моментов внутреннего трения на валах двигателей  $M_{д1}$ ,  $M_{д2}$  и платформ  $M_{п1}$ ,  $M_{п2}$  в виде соответствующих линейных коэффициентов  $\beta_{д1}$ ,  $\beta_{д2}$ ,  $\beta_{п1}$ ,  $\beta_{п2}$ .

При параметрическом синтезе двухканальной системы с отдельной нагрузкой параметры двигателей, редукторов, моментов инерции и жесткостей валов платформ взяты из работы [3]. Приведем результаты синтеза ПИД-регулятора для этой двухмассовой электромеханической системы с помощью программы нелинейной оптимизации. В синтезированной таким образом системе длительность переходных процессов превышает более чем на порядок требуемое время регулирования. Кроме того, в системе устанавливаются практически незатухающие

автоколебания, вызванные наличием трения в приводных двигателях и рабочих механизмах в сочетании с интегральным регулятором. Применение ПД-регулятора позволяет избавиться от незатухающих высокочастотных колебаний в переходных процессах, однако, при этом система имеет недопустимо большую статическую ошибку в установившемся режиме и, естественно, большое время регулирования.

Рассмотрим теперь параметрический синтез системы с нелинейными обратными связями по состоянию и с оценкой неизмеряемых переменных состояния с помощью нелинейных наблюдателей [6]. На рис. 2 показаны переходные процессы скорости двигателя первого канала (а), скорости платформы первого канала (б), момента упругости первого канала (в) и угла платформы первого канала (г) в синтезируемой системе по заданию на первый канал с учетом нелинейностей объекта управления. В этой сис-

теме путем решения задачи многокритериальной оптимизации удалось обеспечить все требования, которые предъявляются к системе при различных внешних сигналах и в различных режимах работы.

Рассмотрим теперь применение нейронных сетей для управления такой двухканальной системой. Применение нейронных сетей на основе модели авторегрессии со скользящим средним и контроллера на основе эталонной модели не позволило получить показатели качества синтезируемой системы, удовлетворяющие техническому заданию. Применение контроллера с предсказанием предикативного управления для рассматриваемой системы позволило получить практически те же показатели качества замкнутой системы, что и при использовании управления по состоянию с оптимизацией параметров нелинейных обратных связей регуляторов и наблюдателей.

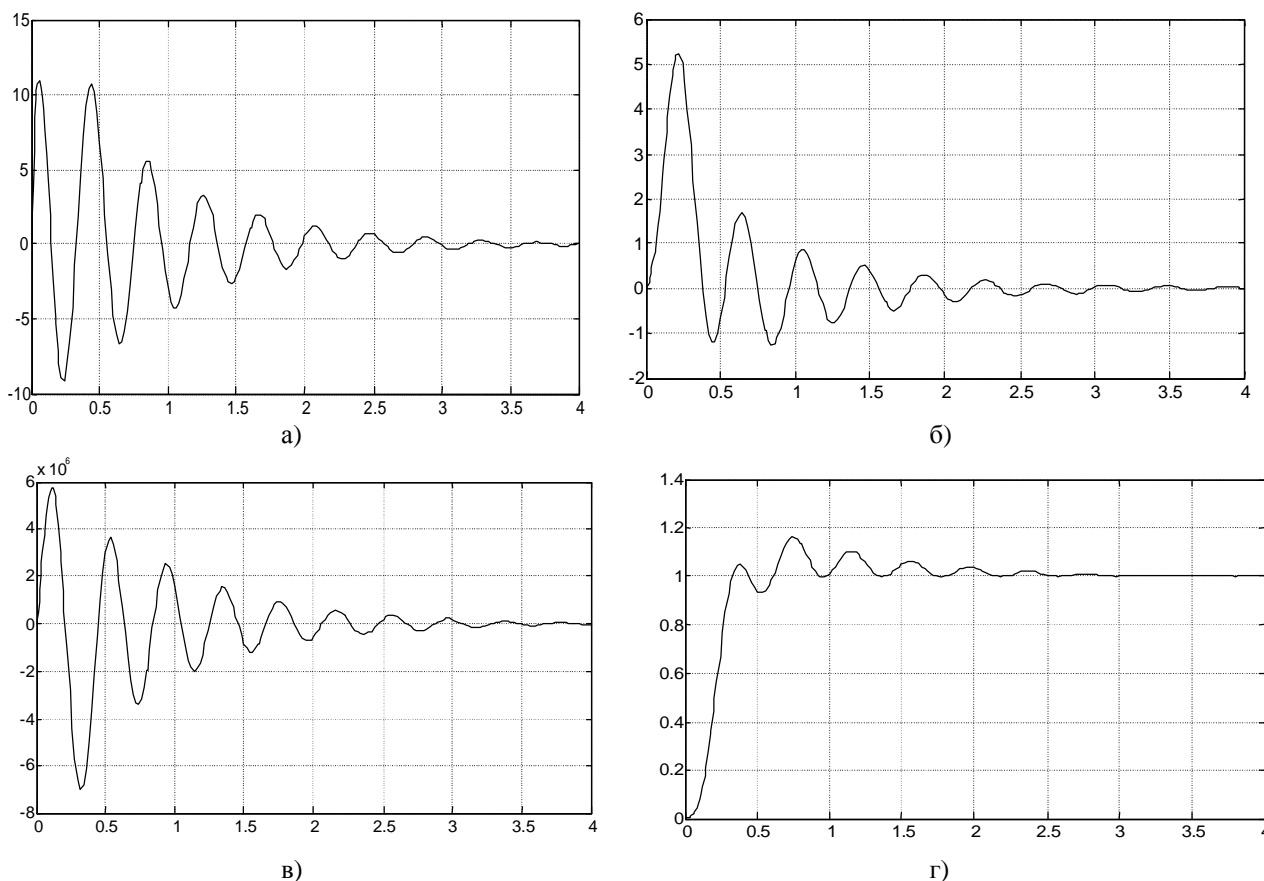


Рисунок 2 – Переходные процессы:

а) скорости двигателя первого канала; б) скорости платформы первого канала; в) момента упругости первого канала и г) угла платформы первого канала в синтезируемой системе по заданию на первый канал

**Выводы.** Сформулирована задача многокритериальной оптимизации, позволяющая решить задачу параметрической оптимизации многоканальной системы таким образом, чтобы удовлетворить разнообразным требованиям, предъявляемым к системе в

различных режимах работы и при различных внешних воздействиях.

Несмотря на то, что применение ПИД-регуляторов в подавляющем большинстве случаев позволяет получать приемлемые показатели качест-

ва регулювання, попытка їх використання для управління складними об'єктами з нелінійними та упругими елементами не дозволяє задовольнити вимогам, пред'являемым к системі.

Використання нейронної мережі в якості регулятора фактично приводить до нелінійного регулятора за рахунок нелінійних функцій активації, що дозволяє ефективно керувати нелінійними системами. Застосування в якості регулятора нейронної мережі зводило задачу навчання нейронної мережі до знаходження вагових коефіцієнтів нейронів. Єстественно, що ця мережа є надлишковою порівняно, наприклад, з звичайним ПД-регулятором і навіть з регулятором стану і спостеріачем безпосередньо невимірюваних змінних стану, а її навчання зводилося до рішення багатокрихітальної задачі нелінійного програмування.

Технічна реалізація предикативного управління потребує невимірно більших витрат машинного часу, реалізація якого для таких електромеханічних систем на сучасних промислових контролерах в реальному масштабі часу не представляє можливим. Тому, основним варіантом управління такими системами є нелінійне управління по стану з оцінкою безпосередньо невимірюваних змінних стану з допомогою нелінійних спостеріачів. Крім того, як показали дослідження синтезованих таким чином систем, вони мають суттєво меншу чутливість до змін параметрів об'єкта управління порівняно з системами з нейрорегуляторами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е.Е., Борисюк М.Д., Кузнецов Б.И. Параметрическая оптимизация многоканальных систем автоматического управления. Харьков, Основа, 1995. – 272 с.

2. Александров Е.Е., Богаенко И.Н., Кузнецов Б.И. Параметрический синтез систем стабилизации танкового вооружения. – К.: Техніка, 1997. – 112 с.

3. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Богаенко И.Н. Проектирование многоканальных систем оптимального управления. Киев. Техника, 1993. – 242 с.

4. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. Харьков, УИПА.2005.– 511 с.

5. Кузнецов Б.И., Новоселов В.В., Богаенко И.Н. Проектирование систем со сложными кинематическими цепями. Киев, Техника. 1996. – 282 с.

6. Никитина Т.Б. Синтез нелінійних багатоканалних систем підвищеної точності // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчуг. – 2005, №4/2005 (33). – С. 39-42.

7. Никитина Т.Б. Робастное управление многоканальными итерационными электроприводами по  $H_2$  и  $H_\infty$  критериям // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково – технічний збірник: Одеса. – 2006, Вип. №67. – С. 13–17.

8. Никитина Т.Б. Синтез робастных регуляторов многоканальных итерационных систем // Радиоэлектроника и информатика. Научно – технический журнал: Харьков. ХНУР. – 2007, №4(35). – С. 24 –30.

9. Никитина Т.Б. Синтез цифровых робастных регуляторов многоканальных электромеханических систем // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2007. – С. 391-392.

Стаття надійшла 15.03.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н. проф.  
Родькіним Д.Й.