УДК 621.77

Т.Б. Никитина, канд. техн. наук

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

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

Разработан метод параметрического синтеза нелинейного робастного управления многоканальными электроприводами, работающими по принципу грубого и точного управления в соответствии с итерационным алгоритмом. Приведен пример динамических характеристик синтезированного электропривода.

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

Введение. Применение многоканальных систем, работающих по принципу грубого и точного управления, в ряде случаев позволяет получать существенно более высокую точность по сравнению с одноканальными системами. Такие системы достаточно широко используются для управления большими антеннами и телескопами, тяжелыми станками с ЧПУ, прокатными станами, устройствами записи на различные носители, источниками постоянного тока с высоким качеством энергии и т.д. [1]. В работах [1-2] рассмотрены подходы к синтезу многоканальных систем с линейными моделями каналов управления. Дальнейшее повышение точности в таких системах сдерживается наличием в них нелинейных элементов. В работах [3-5] рассмотрены вопросы синтеза нелинейных систем с аналитическими нелинейностями.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. С инженерной точки зрения практический смысл имеет задача параметрической оптимизации регуляторов, когда основная структура системы управления остается постоянной, а часть параметров, а возможно и структуры, регулятора изменяется и тем самым отражает изменение параметров внешних воздействий и объекта управления. При таком подходе можно синтезировать регуляторы, незначительно отличающиеся от оптимальных.

При этом их техническую реализацию можно упростить. Упомянутые регуляторы обладают другими полезными свойствами, например, менее чувствительны (робастны) при изменении параметров и структуры объекта управления и входных сигналов.

При таком подходе не «умаляется» значение теории оптимального управления, позволяющей синтезировать «полностью» оптимальные регуляторы, так как, во-первых, оптимальные регуляторы позволяют оценить предельные возможности системы по принятому показателю качества, и, во-вторых, «подсказать» структуру системы для параметрического синтеза.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Синтезу многоканальных итерационных систем посвящено достаточно большое количество публикаций. В работах [5-6] рассмотрены вопросы синтеза оптимальных и робастных регуляторов многоканальных итерационных систем как во временной, так и в частотной области. Однако синтезированные таким образом регуляторы достаточно сложны.

Цель статьи. Целью данной работы является разработка методики параметрического синтеза нелинейных робастных регуляторов многоканальных итерационных систем, обладающих более простой технической реализацией и малой чувствительностью к изменению параметров и структуры моделей каналов и внешних воздействий.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Одним из эффективных подходов к задаче параметрического синтеза является оптимизация параметров системы, структура которой определяется из решения задачи оптимального синтеза. Рассмотрим многоканальную систему, состоящую из m автономных каналов с учетом аналитических нелинейностей, которая описывается нелинейными уравнениями состояния

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \Phi(\vec{x}(t),\vec{u}(t)),$$
$$\vec{y}(t) = \varphi(\vec{x}(t),\vec{u}(t)),$$

Синтез оптимального управления $\vec{u}(t)$, минимизирующего функционал

$$J = \int_0^\infty \psi(\vec{x}(t),\vec{u}(t)dt,$$

в предположении, что функция $\psi(\vec{x}(t),\vec{u}(t))$ является аналитической, согласно [2-4] сводится к нелинейному управлению $\vec{u}(t)$ в форме обратных связей по полному вектору состояния многоканальной системы

$$\vec{u}(t) = \sum_{i=1}^{n} \vec{u}_i(\vec{x}(t)).$$

Оптимальное управление находится из решения системы уравнений, эквивалентной уравнению Гамильтона-Якоби-Беллмана [2].

Оптимальное управление по полному вектору состояния $\vec{x}(t)$ многоканальной системы реализуется с помощью нелинейного наблюдателя [4]

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = \Phi_H(\hat{x}(t),\vec{u}(t),\vec{y}(t)),$$

в котором нелинейная векторная функция $\Phi_H(\hat{x}(t),\vec{u}(t),\vec{y}(t))$ также является аналитической.

Вместо нахождения нелинейного оптимального регулятора путем решения уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана может быть решена задача параметрической оптимизации матриц коэффициентов усиления нелинейного регулятора F и коэффициентов усиления нелинейного наблюдателя K. Сформируем вектор искомых параметров $\vec{R}$, компонентами которого являются элементы искомых матриц коэффициентов усиления

$$\vec{R} = \{F,K\}.$$

Тогда задача параметрической оптимизации может быть сведена к задаче математического программирования – поиску значений вектора искомых параметров $\vec{R}$, при которых значение исходного критерия J принимает минимальное значение.

Смысловая постановка этой задачи сводится к синтезу такой системы, при которой обеспечивается минимальное значение основного показателя качества системы, например, ошибки, либо дисперсии ошибки $\bar{\varepsilon}^2$, характеризующей точность системы

$$\vec{Z}_{опт} = arg\ min\, \bar{\varepsilon}^2\left(\vec{Z}\right)$$

при выполнении ограничений [7-8] на дисперсии компонент вектора состояния

$$\bar{x}^2\left(\vec{z}\right) \le \bar{x}^2_{max}$$

и вектора управления

$$\bar{u}^2\left(\vec{z}\right) \le \bar{u}^2_{max}.$$

При этом отпадает необходимость в выборе матриц весовых функций в исходном критерии J, а сам критерий $\bar{\varepsilon}^2$ имеет существенно более простое аналитическое выражение.

Параметрический синтез многоканальных систем робастного управления. В последнее время получили широкое распространение методы синтеза систем, нечувствительных к изменению параметров объекта управления. Известны различные подходы для решения этой задачи. Наиболее успешные результаты получены при использовании максиминного критерия [9-10].

Введем вектор параметров регулятора и наблюдателя $\vec{R}$ и вектор параметров объекта управления $\vec{p}$ и сформулируем задачу поиска таких векторов значений параметров $\vec{R}$ и $\vec{p}$, при которых

$$J^* = \min_{\mathrm{R}} \max_{\mathrm{p}} J\left(\vec{R},\vec{p}\right).$$

Естественно, что при параметрической оптимизации необходимо учитывать ограничения на переменные состояния объекта управления и на само управление в виде

$$\vec{G}\left(\vec{R},\vec{p}\right) \le \vec{G}_{max},$$

а возможно и на сами значения параметров $\vec{R} \in \mathbf{R}$, $\vec{p} \in \mathbf{p}$.

При синтезе систем робастного управления получил широкое распространение игровой подход, позволяющий свести задачу синтеза системы к игре. При этом область варьируемых параметров разбивается на два множества своих $\vec{R}$ и противника $\vec{p}$. Цель своих игроков заключается в выборе таких значений $\vec{R}$, при которых минимизируется значение оптимизируемого критерия качества J, а задача противника заключается в выборе таких значений параметров $\vec{p}$, при которых максимизируется значение критерия качества. Эта задача также может быть сформулирована как задача минимакса.

Необходимым условием существования седловой точки $\vec{R}^*, \vec{p}^*$ является равенство нулю градиентов целевой функции

$$\nabla_{\vec{R}} J /_{\vec{R}=R^*} = \vec{0},$$

$$\nabla_{p} J /_{\vec{p}=\vec{p}^*} = \vec{0}.$$

Достаточным условием существования седловой точки является изменение знака градиента $\nabla_R J$ при прохождении точки минимума с минуса на плюс, и изменение знаков градиента $\nabla_p J$ при прохождении точки максимума с плюса на минус. Эти условия могут быть сформулированы в виде положительной определенности матрицы вторых производных – матрицы Гессе по выбору параметров $\vec{R}$ т.е. $H_R > 0$, и отрицательной определенности матрицы Гессе по параметрам $\vec{p}$. Задача существенно усложняется, если критерий качества J векторный. Методы векторной оптимизации существенно более сложные и, как правило, сводятся к нахождению области Парето – оптимизации.

Для синтеза робастной системы по вектору варьируемых параметров $\vec{R}$ исходной системы необходимо решить задачу определения параметров матриц регулятора F и наблюдателя G, минимизирующих критерий качества, а противник выбирает такой вектор параметров объекта управления $\vec{p}$, при котором критерий качества максимальный. Эта задача разбивается на две подзадачи – нахождения матрицы коэффициентов усиления нелинейного регулятора F и нелинейного наблюдателя K.

Параметры матрицы наблюдателя определяются из решения задачи

$$J_1 = \min_{G} \max_{\vec{p}} \int \vec{\varepsilon}^T (G, \vec{p}) \vec{\varepsilon}(G, \vec{p}) dt,$$

а параметры матрицы регулятора определяются из условия

$$J = \min_{F} \max_{\vec{p}} \int \vec{z}^T (F, \vec{p}) \vec{z}(F, \vec{p}) dt.$$

Естественно, что такая параметризация использует информацию о структуре робастного регулятора и робастного наблюдателя.

При таком подходе находится «осторожный» регулятор, при котором недоиспользуются потенциальные возможности исполнительных устройств.

Для улучшения качества регулирования найдем оптимальные значения регулятора $\vec{R}^{**}$ при номинальных значениях вектора параметров $\vec{p}_{ном}$ путем решения задачи

$$J^{**} = \min_{\vec{R}} J(R, \vec{p}_{ном}).$$

Тогда вектор значения параметров $\vec{p}$ может быть выбран в виде

$$\vec{p} = (1-\varepsilon)\vec{p}^{**} + \varepsilon\, \vec{p}^*,$$

где параметр $0 < \varepsilon < 1$ характеризует степень осторожности регулятора. При $\varepsilon = 0$ значение вектора параметров регулятора соответствует самому неосторожному – оптимальному регулятору. По мере увеличения ε от 0 до 1 значения параметров регулятора приближаются к осторожному регулятору. Заметим, что самой большой чувствительностью к изменению параметров системы обладает оптимальный регулятор, а минимальной чувствительностью обладает осторожный регулятор.

Для упрощения решения этой задачи использована процедура последовательного синтеза параметров отдельных каналов, начиная с первого силового канала и заканчивая последним маломощным быстродействующим каналом. Естественно, что эта задача имеет существенно меньшую размерность, чем исходная задача параметрического синтеза многоканальной системы. Для уточнения параметров при последовательном синтезе отдельных каналов может быть использован алгоритм, приведенный в [1].

Результаты моделирования. В качестве примера рассмотрим синтез робастных регуляторов двухканальной системы с раздельной нагрузкой [1], у которой каждый канал представляет собой трехмассовую электромеханическую систему, схема которой показана на рис.1.

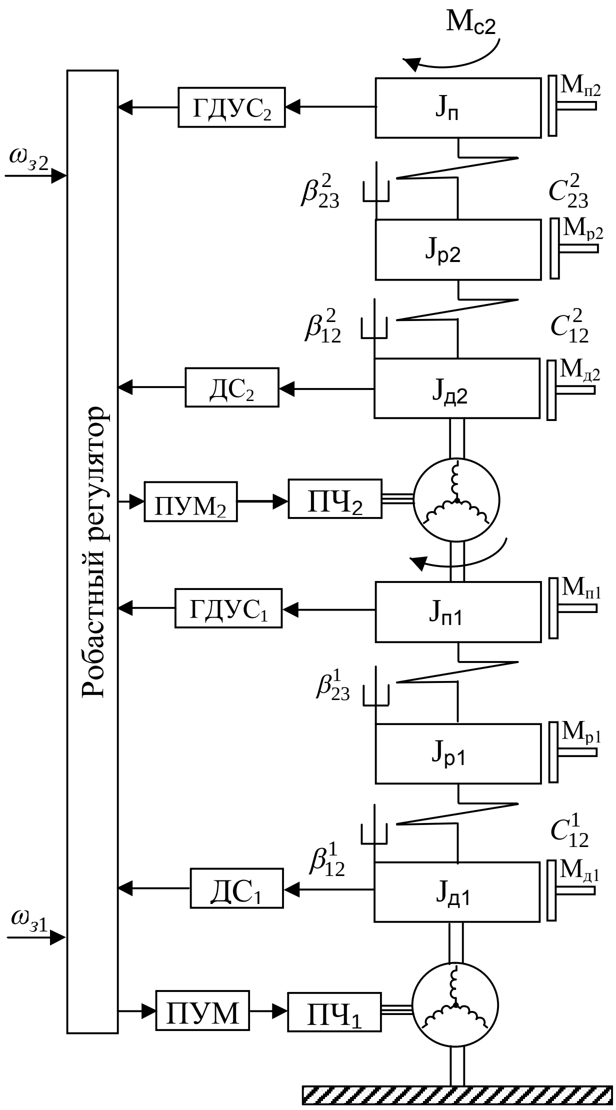

Рис. 1. Схема двухканальной системы с раздельной нагрузкой с упругими связями

Система предназначена для отработки заданных значений скоростей вращения ω_{31}, ω_{32} первой и второй платформ.

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).

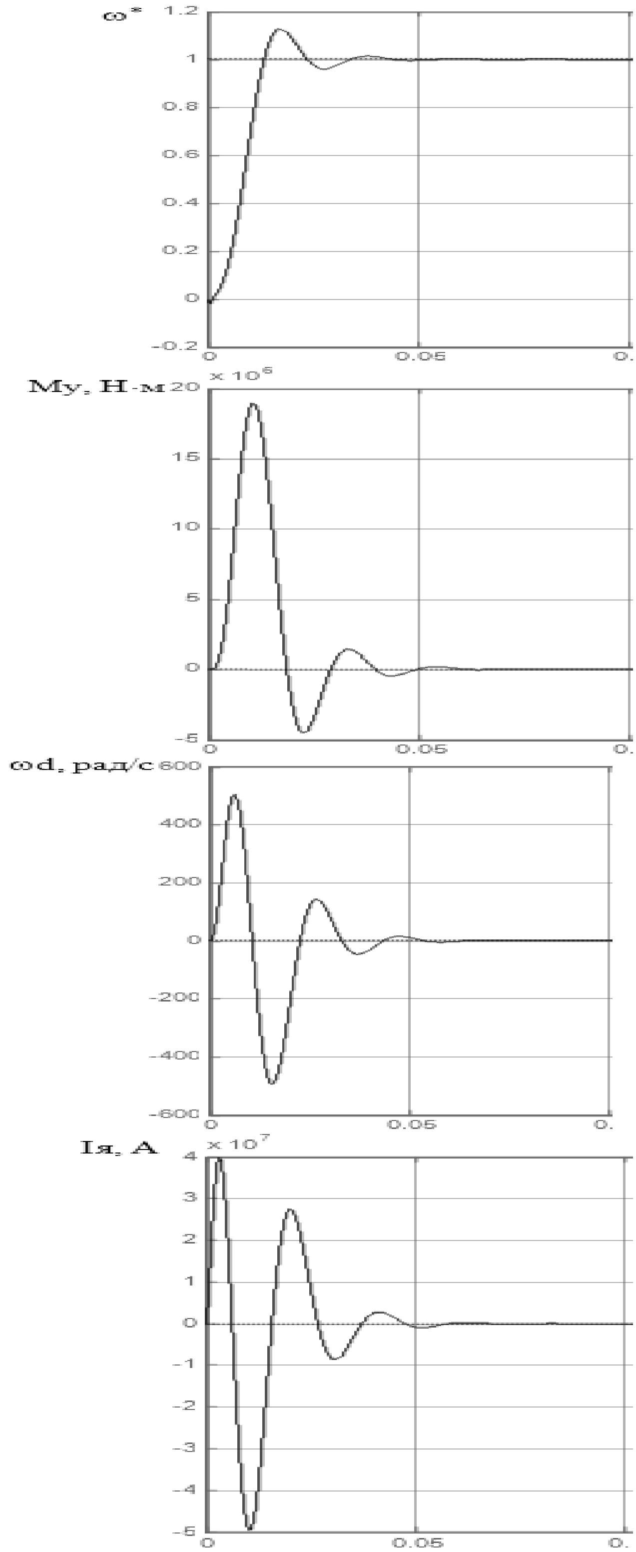

Рис.2. Переходные процессы скорости вращения первой платформы ω_{n1}, момента упругости вала между редуктором и первой платформой M^1_{y23}, скорости вращения двигателя первой платформы $\omega_{\partial 1}$, момента двигателя первой платформы $M_{\partial 1}$ по заданию на первый канал

Скорости вращения платформ измеряются с помощью гироскопических датчиков угловых скоростей (ГДУС), а скорости вращения роторов двигателей измеряются с помощью датчиков скорости (ДС).

В системе учтены нелинейные характеристики моментов трения на валах двигателей $M_{\partial 1}$, $M_{\partial 2}$, редукторов M_{p1}, M_{p2} и платформ M_{n1}, M_{n2}.

Введем вектор состояния системы, компонентами которого являются: скорость вращения второй платформы ω_{n2}, момент упругости вала между редуктором и второй платформой M^2_{y23}, скорость вращения редуктора второй платформы ω_{p2}, момент упругости вала между двигателем и редуктором второй платформы M^2_{y12}, скорость вращения двигателя второй платформы $\omega_{\partial 2}$, момент двигателя второй платформы $M_{\partial 2}$, скорость вращения первой платформы ω_{n1}, момент упругости вала между редуктором и первой платформой M^1_{y23}, скорость вращения редуктора первой платформы ω_{p1}, момент упругости вала между двигателем и редуктором первой платформы M^1_{y12}, скорость вращения двигателя первой платформы $\omega_{\partial 1}$, момент двигателя первой платформы $M_{\partial 1}$. Тогда вектор состояния примет следующий вид

$$\vec{X} = \begin{Bmatrix} \omega_{n2}, M^2_{y23}, \omega_{p2}, M^2_{y12}, \omega_{\partial 2}, M_{\partial 2}, \\ \omega_{n1}, M^1_{y23}, \omega_{p1}, M^1_{y12}, \omega_{\partial 1}, M_{\partial 1}, \end{Bmatrix}.$$

Матрица состояния линейной части объекта управления двухканальной системы с раздельной нагрузкой примет вид, представленный ниже.

Структура синтезированной системы выбрана в виде нелинейного робастного регулятора и наблюдателя каждого канала, приведенных в [9,10].

В качестве примера на рис. 2 показаны графики переходных процессов скорости вращения первой платформы ω_{n1}, момента упругости вала между редуктором и первой платформой M^1_{y23}, скорости вращения двигателя первой платформы $\omega_{\partial 1}$, момента двигателя первой платформы $M_{\partial 1}$ по заданию на первый канал. Как видно из этих графиков, переходные процессы имеют достаточно хорошие показатели качества и удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе. Исследование синтезированной системы показало низкую чувствительность к изменению параметров и структуры моделей объектов управления и моделей задающих и возмущающих воздействий.

$$A = \left\| \begin{array}{cccccccccccc}
\frac{-\beta_{n2}-\beta^2_{23}}{J_{n2}} & \frac{1}{J_{n2}} & \frac{\beta^2_{23}}{J_{n2}} & & & & & & & & & \\
-C^2_{23} & & C^2_{23} & & & & & & & & & \\
\frac{-\beta^2_{23}}{J_{p2}} & \frac{-1}{J_{p2}} & \frac{-\beta^2_{12}+\beta^2_{23}-\beta_{p2}}{J_{p2}} & \frac{1}{J_{p2}} & \frac{\beta^2_{12}}{J_{p2}} & & & & & & & \\
 & & -C^2_{12} & & C^2_{12} & & & & & & & \\
 & & \frac{\beta^2_{12}}{J_{\partial 2}} & \frac{-1}{J_{\partial 2}} & \frac{-\beta^2_{12}-\beta_{\partial 2}}{J_{\partial 2}} & \frac{1}{J_{\partial 2}} & & & & & & \\
 & & & & & \frac{-1}{T_{\mu 2}} & & & & & & \\
 & & & & & -\frac{1}{J_{n1}} & \frac{-\beta_{23}-\beta_{n1}}{J_{n1}} & \frac{1}{J_{n1}} & \frac{\beta_{23}}{J_{n1}} & & & \\
 & & & & & & -C_{23} & & C_{23} & & & \\
 & & & & & & \frac{-\beta^2_{23}}{J_{p1}} & -\frac{1}{J_{p1}} & \frac{-\beta'_{12}+\beta'_{23}-\beta_{p1}}{J_{p1}} & \frac{1}{J_{p1}} & \frac{\beta_{12}}{J_{p1}} & \\
 & & & & & & & & -C_{12} & & C_{12} & \\
 & & & & & & & & \frac{\beta_{12}}{J_{\partial 1}} & \frac{-1}{J_{\partial 1}} & \frac{-\beta_{12}-\beta_{\partial 1}}{J_{\partial 1}} & \frac{1}{J_{\partial 1}} \\
 & & & & & & & & & & & -\frac{1}{T_{\mu 1}}
\end{array} \right\|$$

β_{23}^{1}

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Предложена методика параметрического синтеза нелинейных робастных регуляторов многоканальных итерационных систем, позволяющих свести синтез регуляторов к решению задачи нелинейного программирования.

Использование робастных регуляторов позволяет получать стабильные динамические характеристики многоканальной итерационной системы при изменении параметров моделей внешних воздействий и объекта управления.

Приводится пример параметрического синтеза нелинейного робастного управления двухканальной следящей системой с раздельной нагрузкой, с помощью которого удалось получить приемлемые показатели качества.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. Харьков: Изд-во УИПА, 2005. – 511 с.

2. Никитина Т.Б. Ограничение динамических нагрузок в нелинейной системе совместного управления главными приводами блюминга с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл //Вест. НТУ «ХПИ». – 2006. - № 9. – С. 95 - 102.

3. Никитина Т.Б. Ограничение нагрузок в нелинейных многоканальных системах с оптимальным управлением //Техніч. електродин. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». - 2006. - Ч.4. - С. 90 - 96.

4. Никитина Т.Б. Приближенно оптимальное цифровое управление электроприводами с аналитическими нелинейностями //Вестн. НТУ «ХПИ». .- 2003. - №10. Т1. – С.321-322.

5. Никитина Т.Б. Робастная стабилизация дискретно – континуального объекта //Техн. електродин. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехн». - 2007. - Ч.4. - С. 60 – 64.

6. Никитина Т.Б. Робастная стабилизация танкового вооружения //Вестн. НТУ «ХПИ». Темат. вып. «Автоматика и приборостроение». – 2007. - №10. - С. 134 – 144.

7. Никитина Т.Б. Робастное управление многоканальными итерационными электроприводами по H^2 и H^∞ критериям //Електромашинобуд. та електрообладн.- 2006. – Вип. № 67. - С. 13 – 17.

8. Никитина Т.Б. Синтез многоканальных нелинейных электромеханических систем //Вестн. НТУ «ХПИ».– 2005. - № 45. – С. 130 – 131.

9. Никитина Т.Б. Синтез приближенно – оптимальных нелинейных систем цифрового управления технологическими процессами с аналитическими нелинейностями //Автомат. виробн. проц..-2003. - № 2(17). – С.62-65.

10. Никитина Т.Б. Синтез цифровых нелинейных многоканальных систем управления //Автомат.виробн.проц. – 2005. - № 2(21). – С. 115 – 121.

Получено 24.10.07

Никитина
Татьяна Борисовна,
канд.техн.наук, доц.
кафедры системного
анализа и управления
НТУ «ХПИ»
61002, г. Харьков,
ул. Фрунзе 21