УДК 62-83:621.77

С.Н. Балюта, канд. техн. наук, доц., **Т.Б. Никитина,** канд. техн. наук, доц.,
Л.А. Копылова, канд. техн. наук, доц., **М.О. Татарченко,** асп.
Национальный университете пищевых технологий, Украина
Национальный технический университет «ХПИ», Украина
Тел/факс +38(0572)99-21-62, E-mail: bikuznetsov@mail.ru

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье разработан эффективный алгоритм робастного управления скоростью вращения двухмассовой электромеханической системы, работающей при резкопеременных нагрузках. Приведены результаты сравнения динамических характеристик синтезированной робастной системы с традиционной системой. Установлено, что применение H_∞-теории для синтеза системы регулирования скорости вращения двухмассовой электромеханической системы позволяет получить лучшие динамические характеристики по заданию и по возмущению по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Ключевые слова: *двухмассовая электромеханическая система, робастная H_∞ система регулирования, значения сингулярности передаточной функции.*

Введение. Для многих металлорежущих станков, обрабатывающих центров, роботов, манипуляторов, прокатных станов и др. по условиям ведения технологического процесса требуется поддержание с высокой точностью скорости вращения либо перемещения обрабатываемой детали или обрабатывающего инструмента. Особенно напряженным режимом является движение с малой «ползучей» скоростью, когда движение сопровождается рывками, остановками и неравномерным движением. В этом случае математическую модель электромеханической системы исполнительный двигатель – обрабатываемая деталь либо инструмент приходится рассматривать как двухмассовую электромеханическую систему, у которой исполнительный двигатель и рабочий орган связаны упругой передачей.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Процессы металлообработки изделий сопровождаются колебаниями технологических параметров. Система управления приводным двигателем должна обеспечить минимально возможные значения статического и динамического падения скорости при изменении момента нагрузки. При этом характер переходных процессов, обусловленных набросом нагрузки, необходимо приблизить к апериодическому, а время протекания переходного процесса должно быть не более 0,1-0,3 с. Сложные системы автоматического управления характеризуются динамичностью свойств, нелинейностью, нестационарностью, влиянием внешних и внутренних возмущений в широком диапазоне. Робастная система автоматического управления должна обеспечивать необходимые регулировочные свойства, несмотря на существенную неопределенность характеристик объекта управления [1].

Анализ последних достижений и публикаций. В последнее время интенсивно развивается теория робастного управления [1-3]. Системы робастного управления обладают рядом несомненных преимуществ: они робастно устойчивы, т.е. сохраняют устойчивость при изменении параметров объекта управления в определенных пределах и имеют существенно меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с оптимальными системами, несмотря на то, что динамические характеристики робастных систем могут незначительно отличаться от соответствующих характеристик оптимальных систем [4]. Поэтому вопросы проектирования систем управления, работающих при параметрических и структурных возмущающих воздействиц объекта управления, являются актуальными. Однако, в работах [1-6] не приведены эффективные алгоритмы регулирования скорости вращения двухмассовой электромеханической сситемы, работающий при резкопеременных нагрузках методами H_∞-теории в условиях неполной информации об объекте управления и с учетом его параметрической неопределенности. Кроме того, в этих работах не рассмотрены вопросы оценки эффективности робастных регуляторов скорости двухмассовых электромеханических систем по сравнению с типовыми регуляторами.

Цель работы. Целью работы является повышение точности и снижение чувствительности системы управления скоростью вращения двухмассовой электромеханической системы к изменению параметров объекта управления для стабилизации её динамических характеристик путем применения теории робастного управления. Задачей работы является разработка методики, синтез и исследование динамических характеристик робастной системы управления скоростью вращения двухмассовой электромеханической системы.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Объект управления состоит из электрической части, представленной в виде апериодической передаточного звена и механической части, представленной в виде двухмассовой механической системы с упругими связью. Для обеспечения стационарной точности регулирования система управления скоростью вращения двухмассовой электромеханической системы дополнительно содержит ПИ регулятор. Схема такой системы показана на рис. 1. При этом ПИ регулятор рассматривается как предварительный фильтр, который обеспечивает регулирование разницы между заданной и текущей частотами вращения. Для получения необходимых характеристик регулирования замкнутого контура без слишком высоких уставок в качестве внешнего возмущения выбрано уставку частоты вращения, а для гашения колебаний вала в качестве внешнего возмущения выбран момент скручивания вала. Кроме того, учитывается наличие помех в измеряемых сигналах частоты вращения ротора двигателя и крутящего момента двигателя.

Синтез робастного управления. Основная цель H_∞-субоптимального регулирования заключается в такой оптимизации свойств канала регулирования с ПИ регулятором, в том числе характеристик по заданию и возмущению, а также колебательных характеристик, чтобы замкнутый контур регулирования обеспечивал выполнение поставленных требований к качеству регулирования, т.е. H_∞-норма должна находиться ниже заданного уровня.

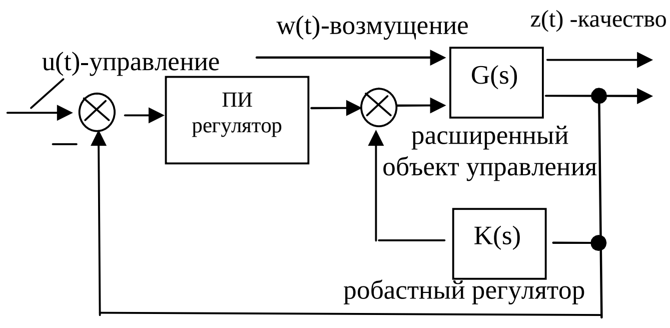


Рис. 1. Схема синтезируемой системы робастного управления

Для синтеза робастного регулятора согласно схеме системы с разделенными входами и выходами, показанной на рис. 1, запишем уравнения в переменных состояния в стандартной форме [1]:

$$\dot{\underline{x}}_s = \underline{A}_s x_s + \underline{B}_{1e}\underline{w}_e + \underline{B}_{2e}\underline{u}_e$$
$$\underline{z}_e = \underline{C}_{1e}\underline{x}_s + \underline{D}_{12e}\underline{u}_e$$
$$\underline{y}_e = \underline{C}_{2e}\underline{x}_s + \underline{D}_{2e}\underline{w}_e$$

где x_s – n-мерный вектор состояния системы (вектор фазовых координат; u_e – р-мерный вектор заданных сигналов управления, созданных регулятором; w_e – вектор внешних действий; A_s – переходная матрица системы; B_{2e} – матрица управления по внешним воздействиям; B_{1e} – матрица управления по сигналам управления; y_e – выходной вектор измеряемых переменных, z_e – выходной вектор регулируемых переменных (переменных качества), C_{1e}, C_{2e}, D_{1e}, D_{2e} – соответствующие матрицы формирования вектора цели робастного управления и вектора наблюдаемого выхода. Регулятор формирует управление по измеряемому выходу, схема такой системы показана на рис. 2.

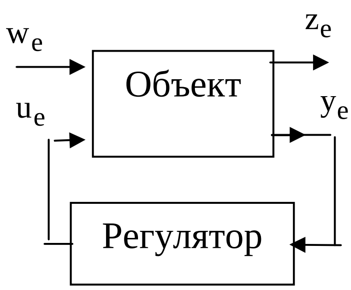


Рис. 2. Схема типовой системы робастного управления

Введем критерий оптимизации робастного управления в виде следующего уравнения:

$$J = \int_0^{\infty} \frac{1}{2}\left(\underline{z}(t)^T \cdot \underline{z}(t) - \gamma^2 \cdot \underline{w}(t)^T \cdot \underline{w}(t)\right)dt\,,$$

где γ - уровень толерантности, т.е. уровень осознания того, что решение является неоптимальным.

Введение в критерий оптимизации уровня толерантности обусловливает повышение надежности функционирования системы управления на этапе робастного управления. Изменение уровня толерантности к неоптимальности решения, обеспечивает надежную работу системы даже при невыполнении энергосбережения, минимизации затрат на расчеты или иных показателей.

Параметры робастного регулятора определяют по следующим формулам [2]

$$\underline{K}_\infty(s) = \begin{bmatrix} \underline{A}_K & \underline{B}_K \\ \underline{C}_K & \underline{D}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}'_\infty & -\underline{Z}_\infty \underline{L}_\infty \\ \underline{F}_\infty & 0 \end{bmatrix},$$

где $\underline{Z}_\infty = (I - \gamma^{-2}\underline{Y}_\infty \underline{X}_\infty)^{-1}$; $\underline{A}'_\infty = \underline{A} + \gamma^{-2}\underline{B}_1\underline{B}_1^T\underline{X}_\infty + \underline{B}_2\underline{F}_\infty + \underline{Z}_\infty\underline{L}_\infty\underline{C}_2$

$\underline{F}_\infty = -\underline{B}_2^T \cdot \underline{X}_\infty$; $\underline{L}_\infty = -\underline{Y}_\infty \underline{C}_2^T$.

При этом, для обеспечения отсутствия взаимных связей между отдельными параметрами системы управления должно выполняться следующее условие

$$\rho(X_\infty, Y_\infty) < \gamma^2,$$

т.е. ограничение спектрального радиуса выражения в скобках (собственные значения с максимальным модулем). Это обеспечивает устойчивость системы управления, замкнутой через регулятор.

Метод решения**.** Для определения матриц $\underline{X}_\infty$ и $\underline{Y}_\infty$ необходимо найти решение двух независимых уравнений Риккати [1] для матриц Гамильтона:

$$\underline{H}_\infty = \begin{bmatrix} \underline{A}_e & \underline{B}_{2e}\underline{B}_{2e}^T - \gamma^{-2}\underline{B}_{1e}\underline{B}_{1e}^T \\ -C_{1e}^T C_{1e} & -A_e^T \end{bmatrix}$$

и

$$\underline{J}_\infty = \begin{bmatrix} \underline{A}_e^T & \underline{C}_{2e}^T\underline{C}_{2e} - \gamma^{-2}\underline{C}_{1e}^T\underline{C}_{1e} \\ -\underline{B}_{1e}\underline{B}_{1e}^T & -\underline{A}_e \end{bmatrix}.$$

Решение уравнения Риккати $\underline{X}_\infty$ для оптимального регулятора имеет вид:

$$\underline{A}_T\underline{X}_\infty + \underline{X}_\infty\underline{A} - \underline{X}_\infty(\underline{B}_2\underline{B}_2^T - \gamma^{-2}\underline{B}_1\underline{B}_1^T)\underline{X}_\infty + \underline{C}_1^T\underline{C}_1 = 0.$$

В результате, с помощью матрицы $\underline{H}_\infty$ определяют оптимальные значения коэффициентов усиления управления по переменным состояния для обеспечения работы системы при неблагоприятных возмущениях $\underline{w}_e$.

Решение уравнения Риккати Y_∞ для оптимального наблюдателя имеет следующий вид

$$\underline{A}_T\underline{Y}_\infty + \underline{Y}_\infty\underline{A} - \underline{Y}_\infty(\underline{C}_2\underline{C}_2^T - \gamma^{-2}\underline{C}_1\underline{C}_1^T)\underline{Y}_\infty + \underline{B}_1\underline{B}_1^T = 0$$

Таким образом, с помощью матрицы Гамильтона $\underline{J}_\infty$ оценивают оптимальные значения переменных состояния (наблюдателя), которые необходимы для регулирования по переменным состояния.

Порядок синтезированного робастного регулятора равен порядку системы, тогда как порядок «классического» регулятора оказывается более высоким [3].

Математическая модель объекта управления. Математическая модель двухмассовой электромеханической системы состоит из электрической части, механической части, ПИ регулятора частоты вращения приводного двигателя и робастного H_∞-регулятора.

При создании математической модели, используемой при синтезе робастного H_∞-регулятора для обеспечения необходимого качества регулирования учтено наличие помех в сигналах измерения частоты вращения ротора двигателя $n_{1пер}$ и момента двигателя в воздушном зазоре $m_{Mпер}$. При синтезе робастного H_∞-регулятора для параметров качества использовались постоянные весовые коэффициенты β_i.

Весовые коэффициенты β_{m_w}, β_{n1}, β_{n2}, и β_{nu} позволяют по-разному оценить значимость влияния таких параметров качества, как момент на валу двигателя, частота вращения ротора двигателя, частота вращения вала нагрузки и изменение уставки частоты вращения. При этом требуется, чтобы величины значений сингулярности переходной матрицы для каждой входной величины, относящиеся к переменным качества во всем частотном диапазоне находились ниже некоторого заданного уровня.

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_1 \\ m_w \\ n_2 \\ m_M \\ x_{\Pi I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{T_M} & 0 & \frac{1}{T_M} & 0 \\ \frac{T_M}{(1+k_n)\cdot T_e^2} & 0 & -\frac{T_M}{(1+k_n)\cdot T_e^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_n}{T_M} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_p}{T_{el}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{el}} & \frac{1}{T_{el}} \\ -\frac{K_p}{T_I} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ m_w \\ n_2 \\ m_M \\ x_{\Pi I} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{T_{el}} \end{bmatrix} \cdot m_{u,H_\infty} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_n}{T_M} & 0 & 0 \\ \frac{K_p}{T_{el}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_p}{T_I} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_u \\ m_H \\ n_{1пер} \\ m_{Mпер} \end{bmatrix}.$$

$$\underline{z}_e = \underline{C}_{1e}\underline{x}_s + \underline{D}_{12}u_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{m_w} & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{n1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{n2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x}_s + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{w}_e + \begin{bmatrix} \beta_{n,u} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \underline{u}_s .$$

Проблема состоит в том, что в оптимизированной системе, состоящей из электромеханической системы привода и ПИ-регулятора, что входные переменные усиливаются с помощью ПИ регулятора, в то время как используемый для управления крутящий момент нагрузки не усиливается. Это различие в усилении приводит к тому, что изменение уставки $n_{1задан}$ по сравнению с изменением момента нагрузки $m_{нагр}$ в общем случае обуславливает частотно-зависимое изменение сингулярных значений. Норма H_∞ рассматривает в первую очередь только максимальные сингулярные значения, поэтому реализуется оптимизация по заданию.

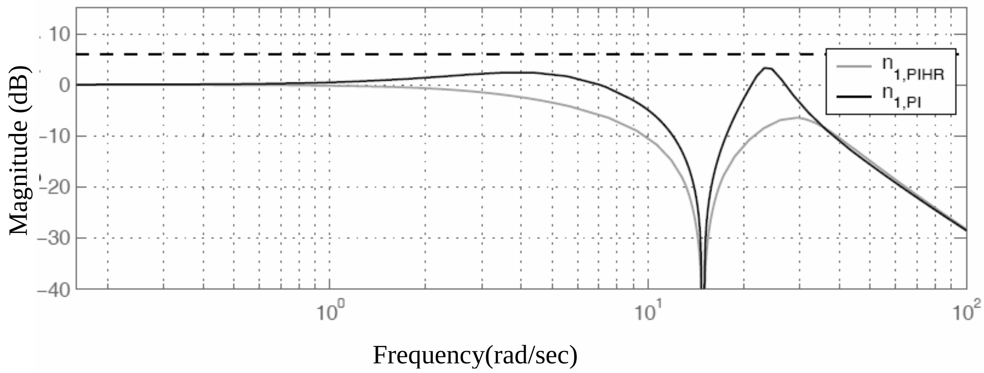
Для одинаковой оценки характеристик системы по заданию и по возмущению величина β_H задается с помощью уравнения:

$$m_H^* = \beta_H \cdot m_H ,$$

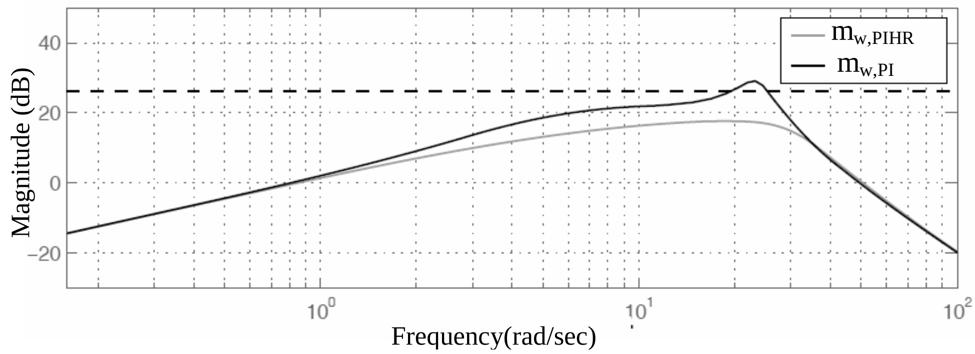
где: $\beta_H = \frac{\overline{\sigma}(\underline{W}_{n_u \to m_w})}{\overline{\overline{\sigma}}(\underline{W}_{m_H \to m_w})}$ – отношение значений сингулярности передаточной функции уставки частоты вращения по отношению к моменту скручивания вала

($\bar{\sigma}(\underline{W}_{n_u \to m_w})$ к значениям сингулярности передаточной функции момента нагрузки по отношению к моменту скручивания вала ($\bar{\sigma}(\underline{W}_{m_H \to m_w})$).

В это выражение входят максимальные значения сингулярных чисел по заданию и по возмущению на крутильный момент вала, т.е. ограничение, чтобы максимальных значения этих обеих величины были одинаковыми.



а)



б)

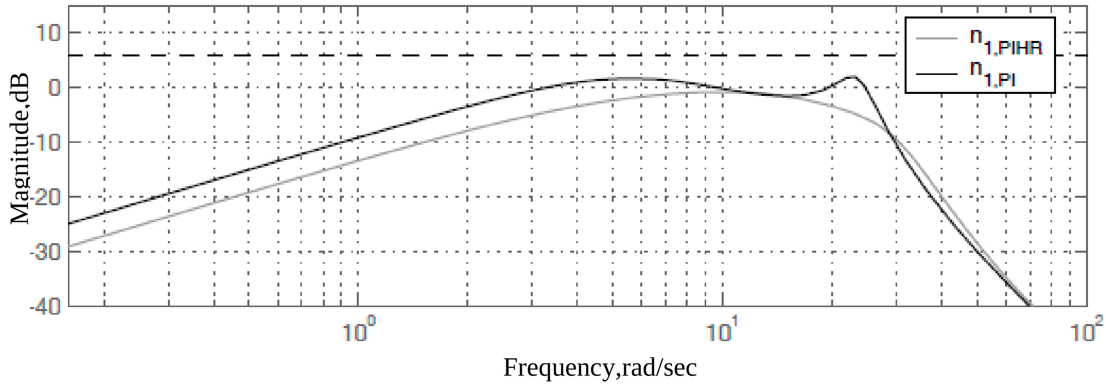
Рис. 3. Частотные характеристики сингулярных значений передаточной функции уставки частоты вращения к частоте вращения ротора приводного двигателя (а) и передаточной функции уставки частоты вращения к моменту скручивания вала (б)

$$\underline{y}_e = \begin{bmatrix} n_{1,nep} \\ m_{M,nep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ m_w \\ n_2 \\ m_M \\ x_{PI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{n,nep} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{m,nep} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_u \\ m_H \\ n_{nep} \\ m_{nep} \end{bmatrix}$$

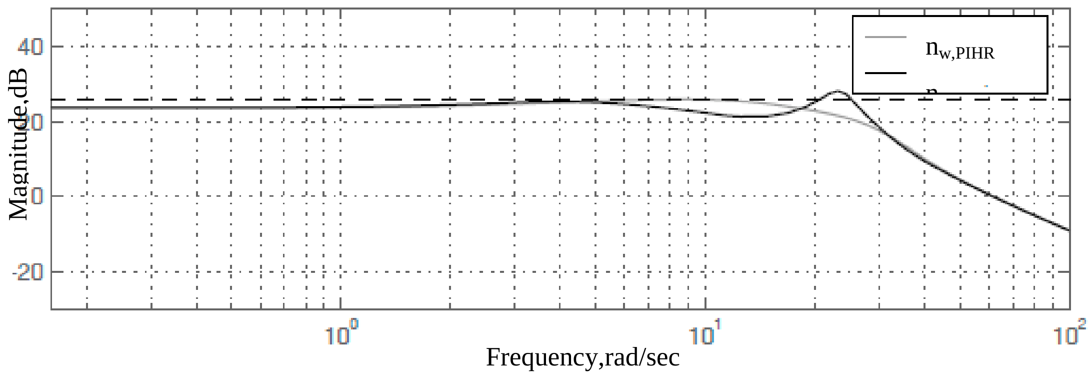
Измеряемые величины, входящие в вектор y_e, являются входными величинами робастного H_∞-регулятора, описываются следующим уравнением:

Результаты экспериментальных исследований на ЭВМ. Для оценки качества синтезированной робастной системы управления и системы с ПИ регулятором выполнено сравнение сингулярных значений по задаче для системы управления с ПИ регулятором и робастного регулятором. На рис. 3 показаны частотные характеристики сингулярных значений: а) передаточной функции уставки частоты вращения к частоте вращения ротора приводного двигателя и б) передаточной функции уставки частоты вращения к моменту скручивания вала. Как видно из этих графиков, показатели качества для момента скручивания вала, а также частоты вращения ротора синтезированной робастной САК показывают значительно лучше затухание колебаний. Однако, сингулярные значения, характеризующие затухание торсионных колебаний вала при изменении нагрузки демонстрируют худшие характеристики затухания. На рис. 4 показаны частотные характеристики сингулярных значений передаточной функции канала передачи момента загрузки: а) к частоте вращения приводного двигателя и б) крутящему моменту на валу для САУ с ПИ-регулятором и робастным регулятором.

Представленные частотные характеристики показывают значительное улучшение динамических характеристик системы с H_∞ регулятором по сравнению с системой управления с ПИ регулятором.



а)



б)

Рис. 4. Частотные характеристики сингулярных значений передаточной функции канала передачи момента нагрузки а) по частоте вращения приводного двигателя и б) по крутящему моменту на валу для системы управления с ПИ-регулятором и робастным регулятором

Рассмотрим теперь переходные процессы в системе с робастным и с типовым регулятором. На рис. 5 показаны результаты моделирования переходных процессов системы с робастным и с ПИ регулятором при изменении уставки частоты вращения на 5%. На рисунке показаны следующие переходные процессы: а) частота вращения ротора двигателя; б) момент скручивания вала; в) момент двигателя в воздушном зазоре.

Как видно из этих переходных процессов, синтез системы регулирования скорости вращения двухмассовой электромеханической системы с использованием H_∞-теории позволило улучшить динамические характеристики регулирования по заданию и по возмущению по сравнению с системой с типовым регулятором. Синтезированная система робастного управления практически не имеет перерегулирования по скорости вращения приводного двигателя и не имеет колебаний скручивающего момента вала. Робастная система более устойчива к наличию помех в измерительных сигналах и может работать при отличных от принятых при синтезе параметрах объекта управления.

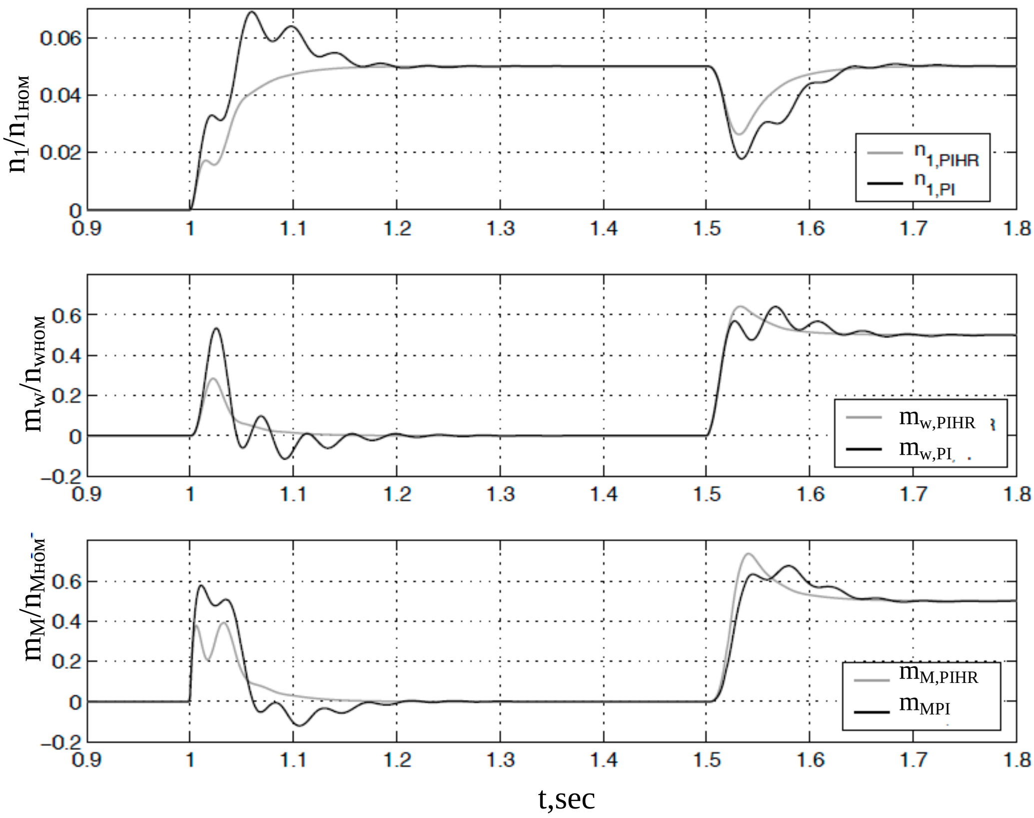


Рис. 5. Результаты моделирования переходных процессов: а) частоты вращения ротора двигателя; б) момента скручивания вала и в) момента двигателя в воздушном зазоре системы с робастным и с ПИ регулятором при изменении уставки частоты вращения на 5%

Выводы. В работе разработан эффективный алгоритм регулирования скорости вращения двухмассовой электромеханической системы, работающей при резкопеременных нагрузках. При H_∞-субоптимальном регулировании проводится оптимизация свойств канала регулирования с ПИ регулятором, в том числе характеристик по заданию и возмущению, а также колебательных характеристик с целью обеспечения замкнутым контуром регулирования поставленных требований к качеству регулирования. Для того, чтобы синтезированная субоптимальная система обеспечивала эффективное управление как по заданию, так и по компенсации момента нагрузки предложено оценивать момент нагрузки. Оптимизация проводится путем решения двух уравнений Риккати.

Приведены результаты исследования синтезированной системы и их сравнение с традиционной системой автоматического управления. Установлено, что использование для синтеза системы регулирования скорости вращения двухмассовой электромеханической системы H_∞-теории позволяет получить систему управления, которая имеет лучшие динамические характеристики регулирования по заданию и по возмущению, чем для система управления с ПИ регулятором по переменным состояния. При этом синтезированная система управления имеет значительно меньшие колебания и может работать при отличных от принятых при синтезе параметрах объекта управления.

Список литературы:

1. Пупков К.А. и др. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления / К.А. Пупков− М.: МГТУ, – 1996.- 437 с.

2. Glover K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L_∞ error bounds / Glover K. // Int. J. Control. – 1984. – Vol. 39.

3. Doyle J.C. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems / J.C. Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar, B.A. Francis // IEEE Trans. Automat. Control. – 1989. – Vol. 34. – №8. – P.831-847.

4. Petersen I.R. Robust Control Design Using H_∞ Methods /I.R. Petersen, V.A. Ugrinovskii, A.V. Savkin. – Springer-Verlag London Berlin Heidelberg, 2000. – 451 p.

5. Bhattacharyya Shankar P. Linear Control Theory. Structure, Robustness and Optimization/S.P. Bhattacharyya, Datta Anirudda, L.H. Keel. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – 930 p.

6. Slotine J.J., W. Li. Applied Nonlinear Control – Prentice Hall. – 1991. – 461 p.

S. Baluta, T. Nikitina,
L. Kopilova, M. Tatarchenko

THE SYNTHESIS OF ROBUST SPEED CONTROL TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM

The algorithm of effective stabilization speed two-mass electromechanical system that operates at the sudden change in loads are presented. Results of dynamic descriptions comparison of synthesized robust control system with the traditional systemю are presented. Found that H_∞-theory application for rotation speed of twomass electromechanics system synthesis allows to get the best dynamic descriptions compared to the system with model regulators

Key words: *twomass electromechanics system, robust H_∞ control system, transfer function singularity values.*

С.М. Балюта, Т.Б. Нікітіна,
Л.О. Копилова, М.О. Татарченко

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Розроблений ефективний алгоритм робастного керування швидкістю обертання двомасової електромеханічної системи, що працює при різкозмінних навантаженнях. Наведені результати порівняння динамічних характеристик синтезованої робастно системи із традиційною системою. Встановлено, що застосування H_∞-теорії для синтезу системи керування швидкості обертання двомасової електромеханічної системи дозволяє отримати кращі динамічні характеристики за завданням та по збуренню в порівнянні із системою з типовими регуляторами.

Ключові слова: *двомасова електромеханічна система, робастна H_∞ система регулювання, значення сингулярності передавальної функції.*

Надійшла до редколегії 15.04.2013 р.