



УДК 519.7:681.5

Н. Д. Поляхов, Д. Ф. Нгуен, В. Б. Второв, В. Е. Кузнецов,
И. А. Приходько, А. Д. Стоцкая

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Сравнительное исследование эффективности ПИ- и робастных регуляторов при построении слеящих систем высокой точности

Рассмотрена задача достижения наибольшей добротности при построении слеящей системы высокой точности с упругим двухмассовым электромеханическим объектом. Исследуется типовая двухконтурная структура с внутренней скоростной системой и внешним слеящим контуром с пропорциональным регулятором. Основные усилия связаны с получением наилучшей грубой динамики скоростной системы. С этой целью использовано робастное управление на основе H^∞ -теории. Для демонстрации преимуществ системы с робастным управлением построена слеящая двухконтурная система сравнения с ПИ-регулятором во внутреннем контуре на основе принципа подчиненного регулирования. Исследуется устойчивость слеящей системы с целью нахождения наибольшей добротности, при которой сохраняется робастность по отношению к вариациям параметров электромеханического объекта. Робастность качественно оценивается сохранением показателей качества динамики при изменении параметров электромеханического объекта – жесткости механической связи двигателя и приводимого им механизма, а также момента инерции второй массы двухмассовой системы. Сравнительное моделирование показало эффективную отработку слеящей системой с робастным регулятором возмущений (детерминированных и случайных процессов), а также улучшение динамической точности при обработке тестовых сигналов (ступенчатого и синусоидального).

ПИ-, ПИД²-регулятор, робастное управление

Электромеханическая система [1], занимая положение на нижнем уровне, обрабатывает множество команд на движение механизмов комплекса, причем с требуемой точностью. Однако в силу различных взаимосвязей и возмущений со стороны механизмов нужная точность отработки команд может быть недостижимой. Сильнее всего это проявляется, если имеются значительные изменения параметров механической части системы и упругие связи с механизмами, причем эти факторы в режимных условиях трудно поддаются описанию, и тогда их можно рассматривать (оценивать) как интервальную неопределенность (нестационарность). Одним из путей решения этой проблемы является построение алгоритма управления на основе робастного подхода в рамках H^∞ -теории [2], [3]. В статье представлены синтез

робастной слеящей системы на основе H^∞ -теории и исследование эффективности в сравнении с системой на основе ПИД-регулятора.

Для слеящих систем должны выполняться два естественных требования к качеству:

- высокое быстродействие и высокая точность отработки входного командного сигнала;
- грубость системы относительно неопределенности параметров объекта управления и влияния внешних возмущений – переменных нагрузки, неидеальностей в механизмах, в том числе различного рода трения, и т. п.

Структура предлагаемой высокоточной слеящей системы имеет следующие особенности:

- система состоит из внешнего (слеящего) контура по положению и внутренней скоростной подсистемы, входящей в указанный контур;

– астатизм следящей системы имеет первый порядок, и необходимая точность должна достигаться выбором достаточной по значению добротности, обеспечивающей высокую точность (без астатизма высокого порядка);

– единственный способ получения высокой добротности – это достижение высокого быстродействия внутреннего скоростного контура с грубой (нечувствительной к параметрическим изменениям в ограниченной области) динамикой. Поэтому основные усилия сосредоточиваются на получении качественного внутреннего контура: робастного, с широкой по возможности полосой пропускания;

– из известных методов построения регулятора внутреннего контура следует отметить синтез П-, ПИ-, ПИД²-регуляторов;

– другие методы построения регуляторов основаны на применении современных методов теории управления. Остановимся на выборе робастного управления.

Основные предположения:

1. При построении следящего контура исключаются структуры регуляторов на основе ПИ-законов, а также комбинированного управления. Используются только П-регуляторы с высоким усилением (добротностью).

2. Все датчики регулируемых координат считаются функционально идеальными.

3. Электромеханические объекты управления, в том числе упругие, считаются материальными объектами с сосредоточенными параметрами.

4. Точность следящей системы определяется наибольшим значением добротности, что позволяет получить высокую точность обработки входных стандартных сигналов, а также сигналов с ограниченной во времени скоростью изменения.

5. Объект управления в общем случае задан в виде

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \in [t_0, \infty), \quad (1)$$

где матрицы в выражении (1) представлены в следующем виде: $B = \{b_{ij}\}_{n \times m}$ – матрица с известными элементами; $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ – матрица с интервальной неопределенностью ее элементов; если элементы – нестационарные функции, то предполагается, что объект полностью управляем и наблюдаем; $x(t)$ – вектор состояния; $u(t)$ – вектор управления.

Оценка точности принимается в виде

$$\min_Q \int_{t_{ПП}}^t |e(t)| dt, \quad (2)$$

где $t_{ПП}$ – время переходного процесса (ПП).

Такая оценка выражает минимум площади под кривой $|e(t)|$ и соответствует динамической ошибке в функции добротности Q .

С учетом астатизма следящей системы ее статическая ошибка равна нулю, и поэтому оценка (2) не рассматривается.

Таким образом, точность следящей системы зависит от добротности Q и качества динамики: степени колебательности и времени переходного процесса.

Отсюда следует вывод: минимальное значение (2) следящей системы определяется верхней границей Q . Для каждой следящей системы (с соответствующими законом управления и составом датчиков) существует такое значение Q , при котором точность системы будет наилучшей в смысле достижения нижнего значения (2). Если значение Q будет достаточно большим (примем >500 с), то можно считать, что имеем следящую систему с высокой точностью (ССВТ).

Построение регуляторов высокоточных следящих систем. Система с ПИД-регулятором. Система сравнения. Для формирования частотной характеристики следящей системы распространенным воплощением линейной теории в прикладном отношении является группа П-, ПИ-, ПИД-регуляторов, обеспечивающих при относительной идеализации описания объекта управления (достаточно малых параметрических вариациях и внешних возмущениях) почти всегда удовлетворительное выполнение технических требований в отношении точности и быстродействия.

Синтез ПИД-регулятора для упругой системы. Пусть уравнения движения упругого объекта имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.036x_1 + 3x_2 + 0.036x_3; \\ \dot{x}_2 &= -100x_1 + 100x_3; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{x}_3 = 0.108x_1 - 9x_2 - 30.108x_3 + 30u.$$

Здесь контур тока принят в виде безынерционного звена и, следовательно, контур скорости представлен звеном первого порядка.

Учитывая упругость и необходимость создания дополнительного фазового запаса, ПИ-регулятор модифицируется введением двух реаль-

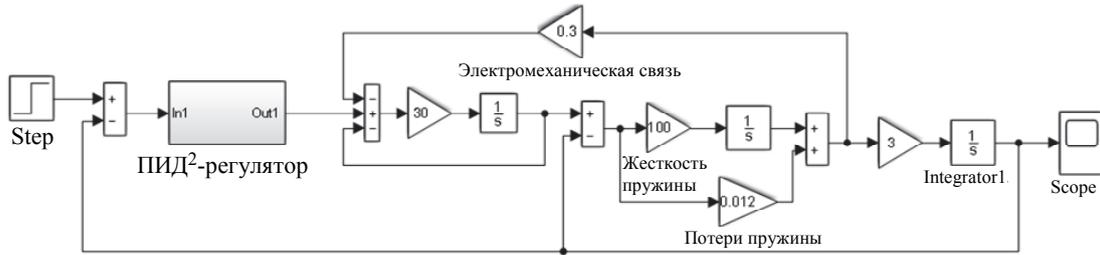


Рис. 1

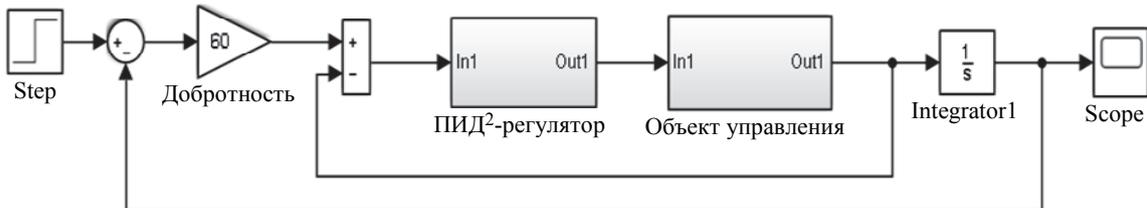


Рис. 2

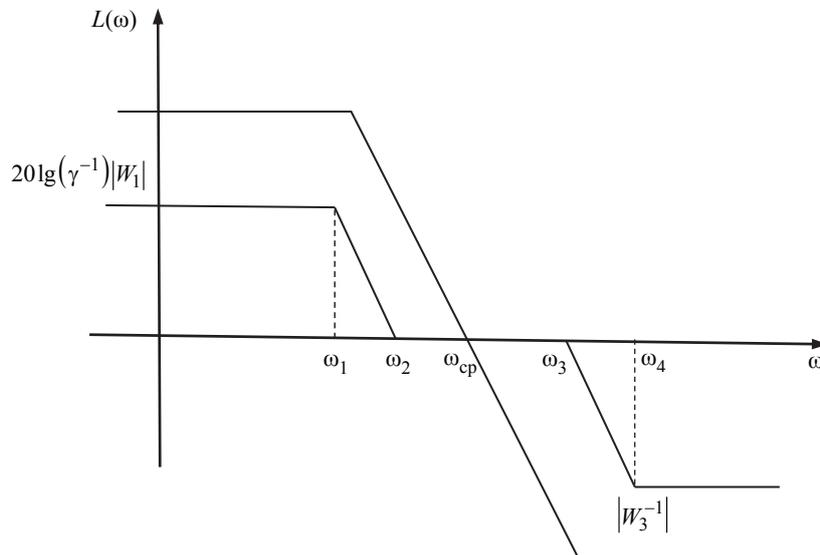


Рис. 3

ных дифференциаторов. Таким образом, получаем ПИД-регулятор. Параметрический синтез произведен при использовании Simulink Design Optimization / Signal Constraints (Design Optimization to Meet Step Response Requirements (GUI)). В результате получены параметры регулятора $\beta = 30$, $\tau = 0.25$; два реальных дифференциатора с округленными значениями параметров $T_d = 0.055$ с, $\tau_d = 0.001$ с. Структурная схема системы электропривода с ПИД-регулятором показана на рис. 1.

Добротность Q в следящем канале выбрана из условия наибольшей грубости динамики при вариации параметров механической части: изменении жесткости (уменьшении до 0.3 от номинала) и изменении момента инерции второй массы (увеличении до 2 раз). Допустимым значением перерегулирования принимаем 1–4 %. Этим тре-

бованиям соответствует добротность $Q = 60$ с⁻¹. Полученная система здесь выполняет роль системы сравнения.

Структурная схема следящей системы с ПИД-регулятором представлена на рис. 2.

Построение робастного регулятора для упругой электромеханической системы (контура скорости). Технология построения робастного регулятора $K(s)$ в определенной мере основана на выборе так называемых весовых матриц $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$, где $W_1(s)$ регламентирует средне- и низкочастотную логарифмическую амплитудную частотную характеристику разомкнутой оптимизируемой системы, $L(s) = W(s)K(s)$; $W_2(s)$ соответствует прогнозу (верхней оценке) на аддитивные возмущения вида $\Delta_a = W(s) - W_0(s)$;

$W_3(s)$ – то же самое на мультипликативные возмущения вида $W_3(s) = (I + \Delta_m)W_0(s)$ [4].

В дальнейшем полагается, что мультипликативная неопределенность (т. е. возмущения) «поглощает» аддитивную и в расчет принимается только первая. Таким образом, для $W_2(s)$ выбирается условие $W_2(s) = 0$. Требования к $W_1(s)$, $W_3(s)$ отражены на рис. 3, где обозначено: $L(\omega)$ – логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой системы (с ограничениями на ее низко- и среднечастотную части, а также с верхней оценкой мультипликативных возмущений); ω – круговая частота; γ – заданный уровень подавления ограниченного возмущения:

$$\omega_{cp} \geq \sqrt[3]{a_0 a_2}, \quad (4)$$

$$T_1 = \omega_1^{-1}, T_2 = \omega_2^{-1}, T_3 = \omega_3^{-1}, T_4 = \omega_4^{-1}. \quad (5)$$

Полагаем

$$W_1(s) = \frac{(T_2 s + 1)^m}{\gamma (T_1 s + 1)^n}, \quad (6)$$

$0 \leq \gamma \leq 1, T_2/T_1 \gamma < 1, n, m \geq 1, n \geq m; W_3(s) = \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1}$. Часто рекомендуется более простой выбор W_3 :

$$W_3 = \frac{s^n}{\beta \omega_{cp}^n}, \quad \beta \in [1 \ 10]. \quad (7)$$

Определение весовых матриц. Упругий электромеханический объект согласно (3) имеет передаточную функцию вида

$$W(s) = \frac{1.08s + 9000}{s^3 + 30.144s^2 + 1201.1s + 9000}. \quad (8)$$

По формулам (4), (5) и (8) получаем

$$\omega_{cp} \geq \sqrt[3]{a_0 a_2} = \sqrt[3]{9000} = 20.8 \text{ c}^{-1} \rightarrow \omega_{cp} \geq 20.8 \text{ c}^{-1}.$$

Можно принять $\omega_{cp} = 40 \text{ c}^{-1}$. Тогда $\omega_2 = (0.5 \dots 0.2)\omega_{cp}; \omega_3 = (5 \dots 2)\omega_{cp}$ (рис. 3).

Далее выберем значения параметров ω_2, γ, m и n :

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 0.3; \\ m &= n = 1; \\ \omega_2 &= \gamma \omega_{cp} = 0.3 \cdot 40 = 12 \text{ c}^{-1}. \end{aligned} \right\}$$

Следовательно, получаем:

$$\omega_1 = \gamma \omega_2, \quad \omega_1 = 0.3 \cdot 12 = 3.6 \text{ c}^{-1}.$$

Из формул (5) и (6) определяем:

$$T_1 = \omega_1^{-1} = 3.6^{-1} = 0.278 \text{ c};$$

$$T_2 = \omega_2^{-1} = 12^{-1} = 0.083 \text{ c};$$

$$W_1(s) = \frac{(T_2 s + 1)^m}{\gamma (T_1 s + 1)^n} = \frac{0.083s + 1}{0.3(0.278s + 1)};$$

$$W_2(s) = 0.00000001.$$

Воспользуемся рекомендованной формулой (7) для определения $W_3(s)$:

$$\beta = [1, 10]; \beta = 4; W_3(s) = \frac{s^n}{\beta \omega_{cp}^n} = \frac{s}{160}.$$

Программа для расчета параметров робастного регулятора в Matlab:

```
[a1,b1,c1,d1]=linmod('un1');
w1=[0.083 1;0.3*[0.278 1]];
w2=[0.00000001];
w3=[1 0;0 160];
ss1=mksys(a1,b1,c1,d1);
[TSS]=augtf(ss1,w1,w2,w3);
[ssf,sscl]=hinf(TSS);
[ac,bc,cc,dc]=branch(ssf)
[ar,br,cr,dr]=schbal(ac,bc,cc,dc,1, 4);
[num,den]=ss2tf(ar,br,cr,dr)
```

Комментарии к результату: после запуска программы получаем числитель и знаменатель робастного регулятора (Hinf-controller):

```
num =
1.0e+14 *
    0    0.0002    0.0055    0.2211    1.6568
den =
1.0e + 13 *
    0.0000    0.0000    0.0008    1.9740    7.0904
```

Структурная схема системы робастного электропривода показана на рис. 4.

Исследуется устойчивость замкнутой следящей системы с целью нахождения наибольшей добротности, при которой сохраняется грубость к вариациям параметров электромеханического объекта. Таким образом, для следящей системы с робастным регулятором добротность $Q = 500 \text{ c}^{-1}$.

Структурная схема робастной следящей системы показана на рис. 5.

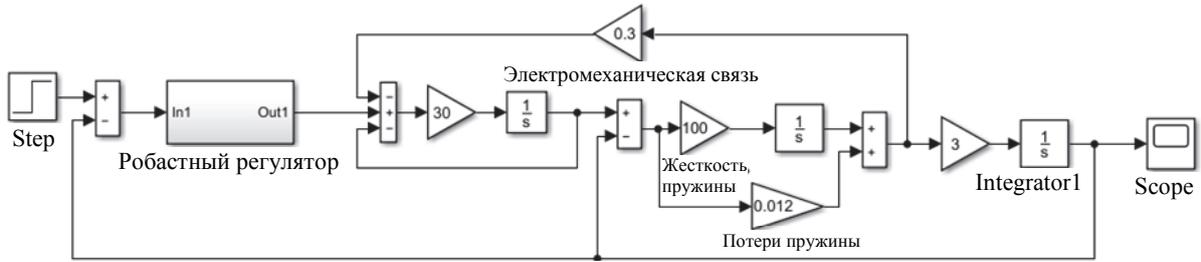


Рис. 4

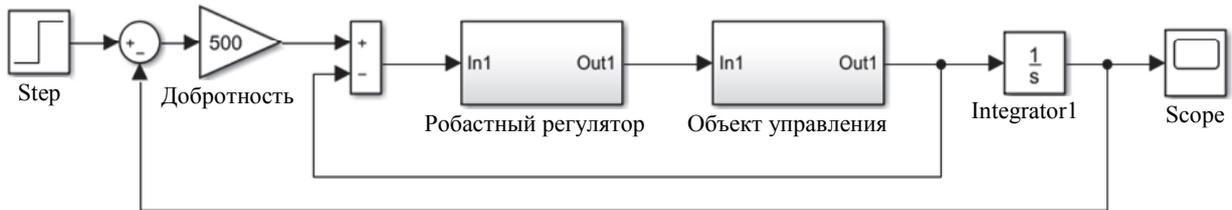


Рис. 5

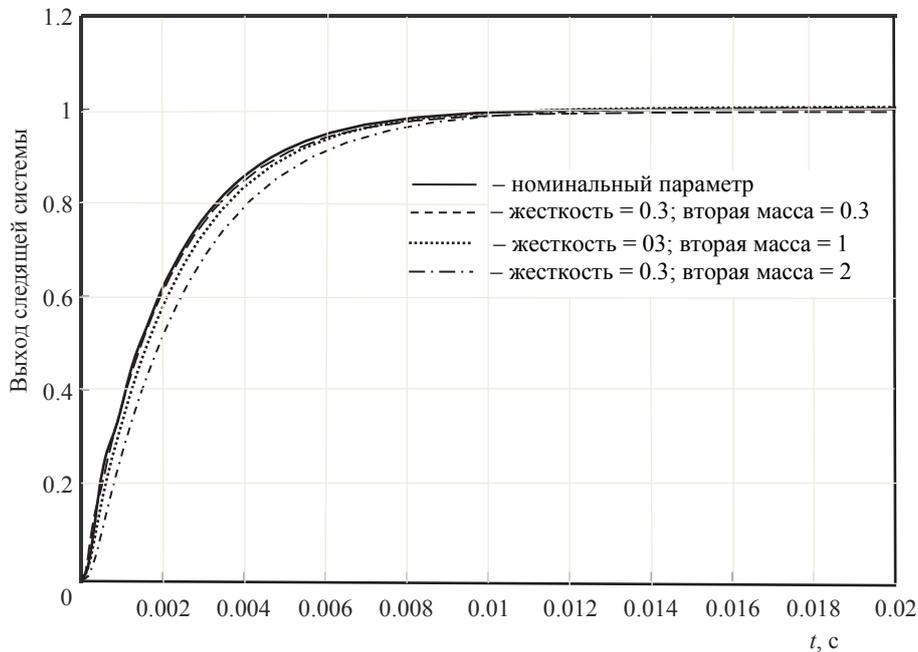


Рис. 6

Робастность качественно оценивается сохранением динамических характеристик при изменении параметров электромеханического объекта в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
Жесткость, множитель	1	0.3	0.3	0.3
Вторая масса, множитель	1	0.3	1	2

Результаты анализа робастности показаны на рис. 6.

Программа исследования точности робастной системы на основе системы сравнения. Моделирование работы следящей системы и сравнительная оценка точности выполнены для следующих возмущений:

- детерминированных сигналов (синусоидальные);
- случайных процессов при использовании разных формирующих фильтров (оценка дисперсии).

Общая схема исследований. Обе системы сведены в одну с параллельным включением, рис. 7.

При исследовании также предусматриваются тестовые воздействия:

- входные типовые воздействия (ступенчатый сигнал, синусоидальный сигнал) – для оценки уровня ошибки рассогласования в динамике и статике;
- динамическая оценка по формуле (2). Построен соответствующий модуль для динамической оценки и для оценки ошибок рассогласования по синусоидальному сигналу;

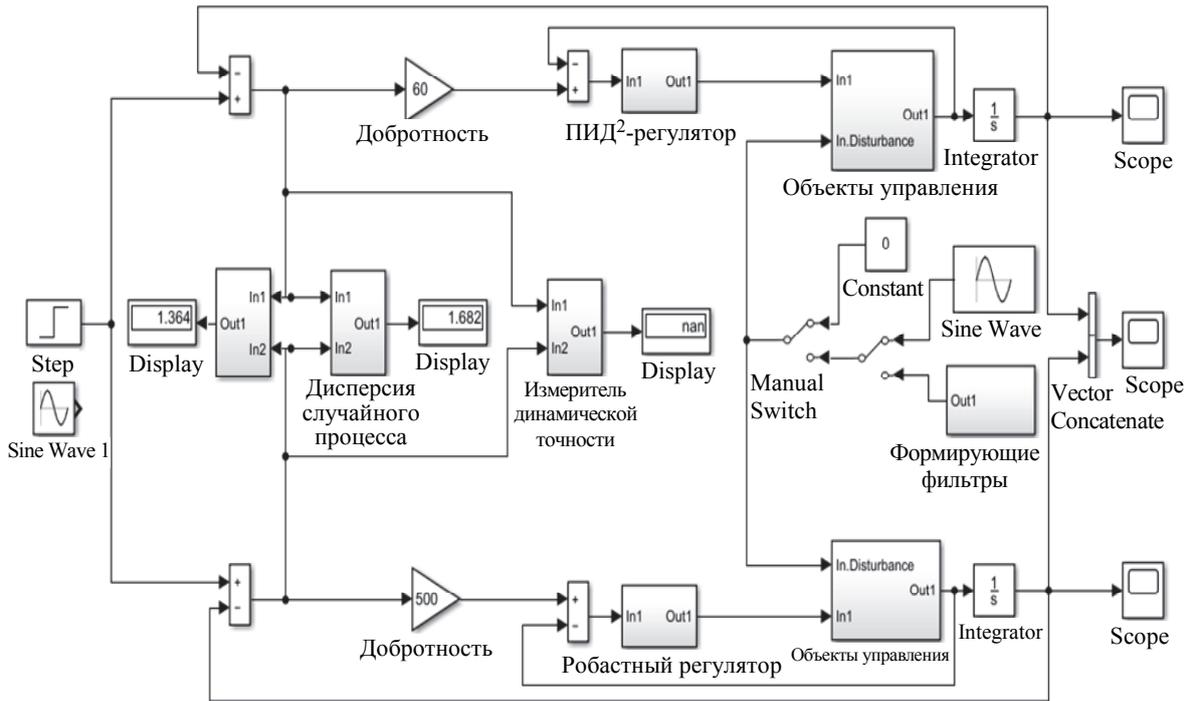


Рис. 7

Таблица 2

Номер эксперимента	Формирующий фильтр	$\sigma_{\text{ПИД}^2}^2$	$\sigma_{\text{РР}}^2$	$\frac{\sigma_{\text{ПИД}^2}^2}{\sigma_{\text{РР}}^2}$	Добротность, с ⁻¹
1	$\frac{0.326s}{s^2 + 0.453s + 3.265}$	1.261.10	2.99.10	42.19	60
					500
2	$\frac{0.23s}{s^2 + 0.87s + 4.809}$	6.338.10	1.451.10	43.67	60
					500
3	$\frac{0.0826s}{s^2 + 1.165s + 5.74}$	8.142.10	1.853.10	43.95	60
					500

– типовые возмущения в виде детерминированного и случайных процессов на основе формирующих фильтров. Оцениваются сравнительная степень подавления по амплитуде детерминированных возмущений и интенсивности (дисперсий) случайных процессов. Построен соответствующий оценочный модуль.

Приведение полученных показателей к оценке относительной точности сравниваемых следящих систем (следящая система с ПИД-регулятором/следящая система с робастным регулятором):

1. Динамическая точность $ДТ = \frac{\int_0^{t_{\text{ин}}} |e(t)| dt}{|y(t)|_{t \geq t_{\text{ин}}}}$,

$y(t)$ – выход робастной системы.

2. Точность при обработке синусоидального сигнала $T_{\text{син}} = \frac{|e(t)|_{t \geq t_{\text{ин}}}}{\max_{t \geq t_{\text{ин}}} |A|}$.

3. Точность при обработке случайных возмущений $T_{\text{СВ}} = \max \sigma_y^2$.

Сравнительное исследование следящих систем с ПИД²-регулятором и робастным регулятором с возмущениями. Отношение амплитуды реакции системы с ПИД²-регулятором на синусоидальное возмущение к реакции в системе с робастным регулятором (РР) составляет до 6 раз.

Отношение дисперсий составляет $\frac{\sigma_{\text{ПИД}^2}^2}{\sigma_{\text{РР}}^2} = 75.67$.

Результаты исследования системы с возмущением типа «белый шум – формирующий фильтр» приведены в табл. 2.

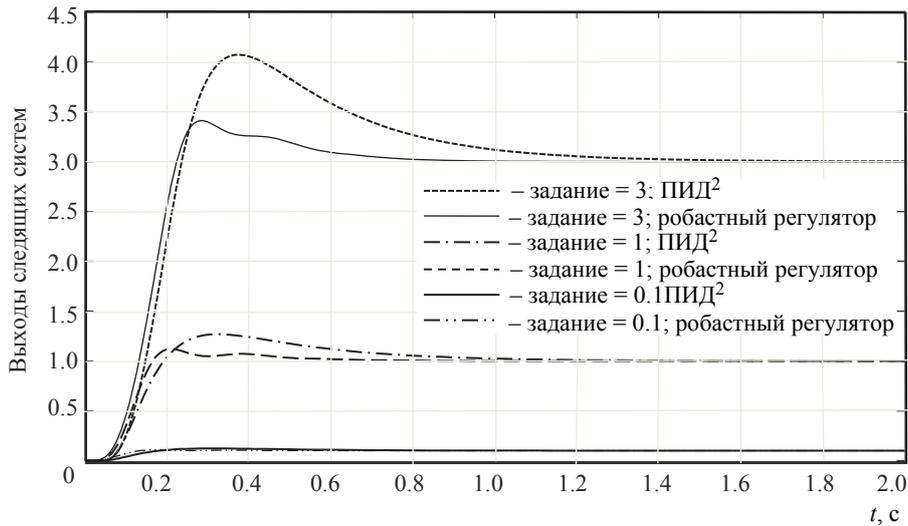


Рис. 8

Учет ограничений по управлению. Вставляется ограничительное звено (± 30) между выходом регулятора (ПИД²- и робастного) и электромеханического объекта. Проверяется сохранение устойчивости в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Номер эксперимента		
	1	2	3
Значение входного сигнала step для ПИД ² -регулятора	3	1	0.1
Значение входного сигнала step для робастного регулятора	3	1	0.1

На рис. 8 дан переходный процесс с оценкой устойчивости: устойчивость сохраняется при различных условиях входного воздействия.

Достижение высокой добротности (более 500 с^{-1}) в следящей системе является одним из главных факторов в создании следящих систем высокой точности с упругим электромеханическим объектом. Основная особенность синтеза

таких систем состоит в создании грубой быстродействующей скоростной системы. В работе использовано робастное управление, которое, помимо робастности, оптимально по энергии управления. Однако всплеск управления остается достаточно высоким, до 10^4 , что ограничивает по устойчивости использование робастного управления. Вынужденная мера – введение в скоростной контур после регулятора ограничивающего звена (здесь до 30...50) с последующей проверкой устойчивости. Проверка дала удовлетворительные результаты. Для демонстрации преимуществ системы с робастным управлением была построена следящая система сравнения с ПИД-регулятором в скоростной системе и добротностью 60 с^{-1} . Сравнительное моделирование показало эффективную отработку следящей системой с робастным регулятором возмущений (детерминированных и случайных процессов), а также улучшение динамической точности при обработке тестовых сигналов (ступенчатого и синусоидального).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyakhov N. D., Stotckaia A. D., Nguyen D. Ph. An adaptive control of electromechanical plant with limited uncertainty // Proc. of the 2016 XIX IEEE Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM). SPb.: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2016. SPb., 2016. P. 73–75.
2. Позняк А. С. Основы робастного управления (H_∞ -теория). М.: МФТИ, 1991.

3. Дезоер Ч., Видьясагар М. Системы с обратной связью: вход-выходные соотношения / пер. с англ. А. С. Бернштейна. М.: Наука, 1983.
4. Поляхов Н. Д., Чунг Нгуен Вьет. Построение робастно-нечеткого регулятора системы управления курсом надводного корабля // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2005. Вып. 1. С. 21–26.

N. D. Polyakhov, D. Ph. Nguyen, V. B. Vtorov, V. E. Kuznetsov, I. A. Prikhodko, A. D. Stotskaia
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF PI- AND ROBUST CONTROLLERS IN THE DESIGN OF HIGH-ACCURACY TRACKING SYSTEMS

In the article the problem of achieving the best velocity error constant in the design of a high-accuracy tracking system with an elastic two-mass electromechanical object is investigated. A typical two-loop structure with an internal speed system and an external tracking loop with a proportional controller is considered. The main efforts are aimed at obtaining the best robust dynamics of the speed system. For this purpose, the robust control based on H^∞ -theory has been used. In order to demonstrate the advantages of a system with robust control, a tracking two-loop comparison system with a PI controller in the internal loop is designed on the basis of the cascade control principle. The stability of the tracking system is investigated with the aim of finding the highest velocity error constant, at which the robustness is preserved without regard to variations in the parameters of the electromechanical object. Robustness is qualitatively estimated by means of preserving the dynamic performance measures while changing the parameters of the electromechanical object – the rigidity of mechanical coupling between the motor and the mechanism driven by it, as well as the moment of inertia of the second mass in a two-mass system. Comparative modeling has shown that the tracking system with a robust controller copes effectively with disturbances (both deterministic and random processes), and demonstrates the improved dynamic accuracy in the reproduction of test signals (both stepped and sinusoidal).

PI-, PID²-controller, robust control

УДК 004.93'1

А. Н. Кококулин, А. И. Тур, А. А. Южаков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Вопросы применения нейронных сетей при разработке автоматов по приему тары

Приводятся результаты разработки оригинального автомата по приему тары на основе IoT и нейронных сетей. Эти автоматы должны выполнять возложенные на них функции (распознавать контейнеры – бутылки ПЭТ и алюминиевые банки), быть безопасными (не подвергать опасности здоровье и материальные ценности пользователя), но и в то же время обладать низкой ценой производства и обслуживания (из-за низкой рентабельности деятельности по сбору контейнеров в текущих условиях рынка). По традиции данные машины разрабатываются на базе контроллеров IoT и одноплатных компьютеров. Они имеют весьма ограниченные память и вычислительные возможности, однако позволяют использовать для реализации проекта различные специализированные устройства (камеры, сканеры штрих-кода, спектрометры и прочее). Для снижения себестоимости была предпринята попытка отказаться от дорогостоящей электроники, используя только визуальное распознавание объекта на основе нейронных сетей. Для этого были выбраны и обучены некоторые из наиболее популярных сетей, основанных на нейросетевой надстройке Keras над фреймворком Tensorflow и Caffe: LeNet, AlexNet, SqueezeNet, проведены сравнительные тесты и сделаны выводы.

Автомат по приему тары, нейронная сеть, сверточная нейронная сеть, переработка

Reverse vending machine (дословно «обратный торговый автомат», автомат по приему тары, RVM) – это автомат, позволяющий людям возвращать пустые контейнеры (бутылки ПЭТ (полиэтилентерефталат) и алюминиевые банки) для напитков для переработки. Обычно автомат устроен таким образом, чтобы возвращать конечному пользователю сумму, эквивалентную сто-

имости сданной тары. Это и делает его «реверсивным» торговым автоматом – вместо того, чтобы пользователь вкладывал деньги и получал продукт, он помещает продукт в автомат и получает за это денежное вознаграждение. Другими словами, это – автоматизированный способ сбора, сортировки и обработки использованной тары. «Обратные торговые автоматы» особенно распро-