

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.015.24

**Анатолий Анатольевич Анисимов**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-53, e-mail: anis@eims.ispu.ru

**Сергей Вячеславович Тарарыкин**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-96, e-mail: tsv@ispu.ru

**Георгий Николаевич Рощин**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент магистратуры кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-53, e-mail: dartgeorge@mail.ru

### Разработка и практическая реализация методов автоматической настройки цифровых управляющих устройств мехатронных систем<sup>1</sup>

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В настоящее время в системах управления мехатронными объектами широко применяются регуляторы состояния, высокие потенциальные возможности которых могут быть реализованы только при наличии средств автоматической настройки. Актуальность настройки в данном случае обусловлена повышенным числом степеней свободы регуляторов состояния, а также параметрической неопределенностью большинства мехатронных объектов управления. Применение известных методов автоматической настройки подобных регуляторов в режиме реального времени осложняется большим количеством экспериментов, существенным влиянием начальных условий на результат, появлением локальных экстремумов целевой функции из-за нелинейности реальных объектов.

**Материалы и методы.** Используются методы пространства состояния, модального управления, цифрового проектирования систем, алгоритмы численной оптимизации, имитационного моделирования в среде MatLab.

**Результаты.** Выполнены разработка, реализация и экспериментальные исследования методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов, основанных на применении эталонной модели, полученной путем оптимизации системы по комплексному критерию качества, а также на использовании априорной информации о мехатронном объекте. Методика настройки включает вариацию оценок неизвестных параметров объекта в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации и расчет значений параметров регулятора методом модального управления на каждой итерации.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания на 2020 г.

**Выводы.** Результаты проведения вычислительных и натурных экспериментов подтвердили работоспособность и эффективность предложенных методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов мехатронных систем. Использование эталонной модели системы, а также априорной информации об объекте управления позволяет решать задачи настройки при минимальном количестве опытов в реальном масштабе времени.

**Ключевые слова:** мехатронная система, регулятор состояния, полиномиальный регулятор, эталонная модель, параметрическая оптимизация, настройка цифровых управляющих устройств, компьютерное моделирование

**Anatoly Anatolyevich Anisimov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-53, e-mail: anis@eims.ispu.ru

**Sergey Vyacheslavovich Tararykin**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-96, e-mail: tsv@ispu.ru

**Georgiy Nikolaevich Roschin**

Ivanovo State Power Engineering University, Master student, Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-53, e-mail: dartgeorge@mail.ru

## Development and practical implementation of automatic tuning methods for mechatronic system digital controllers

### Abstract

**Background.** Currently, the great potential abilities of digital state controllers widely applied in mechatronic systems may be fully realized only with the presence of automatic tuning instruments. The importance of automatic tuning in this case is related to high number of variable parameters for state controllers as well as to parametric indeterminacy of the majority mechatronic controlled objects. The application of optimization methods for automatic tuning of such controllers in real time mode is complicated by a large number of experiments, a significant influence of initial conditions on the result, and the local extremes of the fitness function due to the nonlinearity of real objects.

**Materials and methods.** Methods of state space, modal control, digital system design, numerical optimization algorithms and simulation in MatLab environment were used.

**Results.** The development, implementation and experimental research of automatic tuning methods for digital polynomial controllers are performed during the studying. The proposed approach based on application of reference model, obtained by optimizing the system according to a complex quality criterion, as well as using a priori information about a mechatronic object. The tuning method includes variation of the object unknown parameters in accordance with the accepted optimization algorithm and calculation of the controller parameters values by modal control method at each iteration.

**Conclusions.** As a result of computer simulation and field experiments, the efficiency of the proposed methods for automatic tuning of digital polynomial controllers of mechatronic systems was confirmed. Using the reference model of the system and a priori information about the control object allows us to solve tuning problems with a minimum number of experiments in real time.

**Key words:** mechatronic system, state controller, polynomial controller, reference model, parametric optimization, tuning digital controllers, computer simulation

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.4.034-043

**Введение.** Высокие потенциальные возможности систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами состояния [1–6] могут быть реализованы в полной мере только при наличии средств автоматической настройки, применяемых на этапах проектирования и ввода в эксплуатацию.

Актуальность настройки регуляторов состояния мехатронных систем обусловлена их параметрической неопределенностью, которая вызвана, в свою очередь, погрешностями идентификации, а также изменением режимов работы объекта – например, сменой обрабатываемой детали

на станке или конфигурации робота при перемещении [7–10].

Проведение настройки в ручном режиме в данном случае неэффективно, поскольку системы автоматического управления (САУ) на базе регуляторов состояния различных типов обладают большим количеством степеней свободы, то есть настраиваемых параметров, вариация которых неявным образом влияет на качество процессов управления.

В соответствии с предложенной ранее методикой [1, 8], разработка микропроцессорной системы автоматического управления мехатронным объектом включает в себя проектирование, конструирование и ввод в эксплуатацию. В процессе проектирования осуществляются идентификация мехатронного объекта, структурно-параметрический синтез робастного управляющего устройства, а также параметрическая оптимизация системы управления.

На первом этапе процедуры синтеза осуществляется выбор оптимальной структуры регулятора состояния на основе предложенных принципов робастного управления мехатронными объектами [1, 2, 7, 8]. Затем выполняется предварительный расчет параметров полученного регулятора состояния методом модального управления, позволяющим обеспечить основные показатели качества линеаризованной системы.

На втором этапе синтеза проводится дополнительная параметрическая оптимизация мехатронной системы на основе прямых показателей качества управления с использованием поисковых алгоритмов [1, 11–14]. Это позволяет решать задачу синтеза цифровой системы управления с учетом влияния возмущений, нелинейных факторов, вычислительного запаздывания и прочих особенностей реального объекта.

Автоматическая настройка управляющего устройства на реальном объекте управления, проводящаяся на этапе ввода системы в эксплуатацию, также может рассматриваться как задача параметрической оптимизации. Однако в данном случае оптимизация системы управления проводится в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и сходимости применяемых алгоритмов.

Как показывает анализ результатов экспериментов, а также ряда опубликован-

ных ранее работ [1, 11–14], непосредственное применение методов параметрической оптимизации для решения задач автоматической настройки управляющих устройств мехатронных систем в режиме реального времени осложняется следующими обстоятельствами:

- относительно большим количеством опытов на реальном объекте управления в процессе настройки;

- существенным влиянием начальных условий на число опытов и результат процесса настройки;

- плохой обусловленностью целевой функции для применяемых критериев оптимальности;

- появлением локальных экстремумов целевой функции системы с регулятором состояния при воздействии помех на объект управления.

Генетические алгоритмы оптимизации позволяют обеспечить устойчивую сходимость процессов настройки САУ с регуляторами состояния независимо от начальных условий, в том числе при воздействии помех [15]. Однако параметрическая оптимизация в данном случае требует большого количества итераций (500–1500), что практически исключает применение подобных алгоритмов при настройке реальной мехатронной системы.

Ниже предлагается комплексный подход к задаче настройки мехатронных систем с регуляторами состояний, включающий параметрическую оптимизацию САУ и формирование эталонной модели, программную реализацию управляющего устройства и автоматическую настройку по эталонной модели с использованием априорной информации об объекте управления.

**Структурно-параметрический синтез мехатронной системы управления.** Анализ эффективности методов автоматической настройки будем проводить на примере двухмассовой мехатронной системы [1, 9, 10], структура которой приведена на рис. 1, где  $U$  – управляющее воздействие;  $M$ ,  $M_E$  – моменты двигателя и упругой передачи;  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  – угловые скорости;  $J_1$ ,  $J_2$  – моменты инерции;  $C_{12}$  и  $K_D$  – коэффициенты жесткости и трения;  $K_{PC}$ ,  $T_{PC}$  – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя. Номинальные значения параметров рассматриваемого объекта управления приведены в табл. 1.

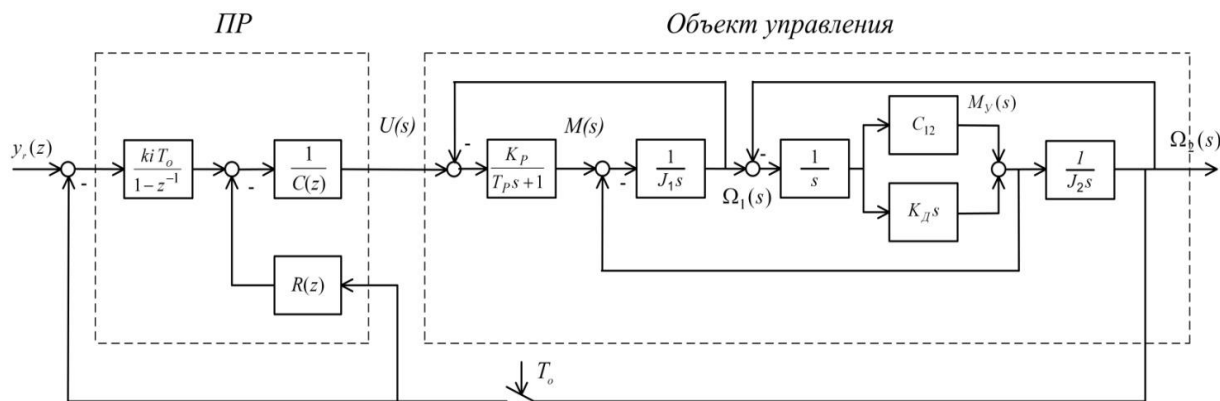


Рис. 1. Структура мехатронного объекта и системы управления с ПР

Таблица 1. Номинальные значения параметров мехатронной системы

$K_{PC}$ , Н·м	$T_{PC}$ , с	$C_{12}$ , Н·м/рад	$J_1$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_2$ , кг·м <sup>2</sup>	$K_D$ , Н·м/рад
20	0,004	40	0,005	0,005	0,01

Пренебрегая малой постоянной времени силового преобразователя  $T_p = 0,004$  с и коэффициентом трения  $K_D$ , для последующего синтеза робастной системы управления [2, 8] получим следующую передаточную функцию объекта:

$$H_o(s) = \frac{K_p \cdot C_{12}}{J_1 J_2 s^3 + K_p J_2 s^2 + (J_1 C_{12} + C_{12} J_2) s + K_p C_{12}} = \frac{b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (1)$$

где  $A(s)$  и  $B(s)$  – полиномы передаточной функции объекта с коэффициентами  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0$ .

Поскольку регулятор будет реализован в цифровой форме, целесообразно использовать при синтезе ПР структуру системы управления, изображенную на рис. 1. В целях обеспечения астатизма в структуру САУ введен дополнительный интегрирующий блок с коэффициентом  $k_i$ . В этом случае полиномы числителя  $R(s)$  и знаменателя  $C(s)$  передаточной функции аналогового прототипа ПР и желаемый характеристический полином замкнутой системы  $D(s)$  будут иметь следующие степени:

$$\begin{aligned} \deg R(s) &= \deg A(s) - 1 = 2; \\ \deg C(s) &= \deg R(s) = 2; \\ \deg D(s) &= \deg A(s) + \deg C(s) + 1 = 6. \end{aligned}$$

Соответствующие этим степеням полиномы имеют вид:

$$R(s) = r_2 s^2 + r_1 s + r_0; \quad C(s) = s^2 + c_1 s + c_0;$$

$$D(s) = s^6 + d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0.$$

Коэффициенты желаемого характеристического полинома системы  $D(s)$  определяются путем оптимизации по комплексному критерию качества управления.

Параметрический синтез астатической системы управления с ПР в данном случае проводится путем решения алгебраического уравнения

$$s(A(s) C(s) + B(s) R(s)) + k_i B(s) = D(s). \quad (2)$$

Решение уравнения (2) позволяет определить параметры аналогового прототипа ПР, обеспечивающие заданное расположение полюсов замкнутой системы управления:

$$\begin{aligned} c_1 &= d_5 - a_2; \quad c_0 = d_4 - a_1 - c_1 a_2; \\ r_2 &= (d_3 - a_0 - a_1 c_1 - a_2 c_0) / b_0; \\ r_1 &= (d_2 - a_0 c_1 - a_1 c_0) / b_0; \\ r_0 &= (d_1 - a_0 c_0) / b_0; \\ k_i &= d_0 / b_0. \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с методом цифрового перепроектирования было выполнено преобразование передаточной функции ПР в цифровую форму с использованием неявного метода Эйлера  $s \rightarrow (1 - z^{-1}) / T_o$  [3, 6]. В результате такого преобразования были получены полиномы  $R(z)$  и  $C(z)$  регулятора со следующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} R(z) &= r_{2z} z^2 + r_{1z} z + r_{0z}; \\ r_{2z} &= (r_0 T_o^2 + r_1 T_o + r_2) / T_o^2; \\ r_{1z} &= -(2r_2 + r_1 T_o) / T_o^2; \quad r_{0z} = r_2 / T_o^2; \\ C(z) &= z^2 + c_{1z} z + c_{0z}; \\ c_{2z} &= (c_0 T_o^2 + c_1 T_o + 1) / T_o^2; \\ c_{1z} &= -(2 + c_1 T_o) / T_o^2; \quad c_{0z} = 1 / T_o^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для дальнейшей программной реализации полиномы ПР были преобразованы в разностные уравнения.

**Параметрическая оптимизация и формирование эталонной модели мехатронной системы.** В целях обеспечения компромисса между основными техническими требованиями к качеству управления и формирования эталонной модели для последующей настройки была проведена параметрическая оптимизация синтезированной системы с ПР [1, 11–14].

При этом в качестве критерия оптимальности использовался комплексный показатель качества управления, включающий в себя нормированные показатели быстродействия  $\bar{q}_1$ , динамической точности  $\bar{q}_2$  и параметрической грубости (робастности)  $\bar{q}_3$  системы:

$$\bar{q}_m = 1 - \left( \prod_{i=1}^3 \bar{q}_i \right)^{1/3}. \quad (5)$$

В качестве показателя быстродействия  $q_1$  принимается время нарастания переходной характеристики  $t_n$ , показателя точности  $q_2$  – средний модуль относительного отклонения выходной координаты:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{100}{(N-T) \cdot |y_{ref}|} \sum_{j=T}^N |y_j - y_{ref}|, \quad (6)$$

где  $T = t_n / T_o$  и  $N = t_n / T_o$  – относительное время;  $t_n$  – время переходного процесса;  $T_o$  – период квантования.

Показателем робастности  $q_3$  служит средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{100}{N \cdot |y_{ref}|} \sum_{j=1}^N |y_j - y_j^*|, \quad (7)$$

где  $y_j$ ,  $y_j^*$  – значения выходной координаты при расчетных и измененных параметрах объекта.

Нормирование показателей качества осуществляется с использованием функции Харрингтона:

$$\bar{q}_i = \exp(-\exp(-z_i)); \quad z_i = b_{0i} + b_{1i} q_i;$$

$$b_{0i} = z_i^{\text{good}} - b_{1i} q_i^{\text{good}}; \quad b_{1i} = \frac{z_i^{\text{good}} - z_i^{\text{bad}}}{q_i^{\text{good}} - q_i^{\text{bad}}},$$

где  $z_i$  – кодированное значение критерия;  $z_i^{\text{хор}}$ ,  $q_i^{\text{хор}}$  и  $z_i^{\text{пл}}$ ,  $q_i^{\text{пл}}$  – значения критериев,

соответствующие хорошему и плохому качеству системы.

Для нормирования показателей качества управления по шкале Харрингтона были определены уровни «хорошо» и «плохо» для каждого показателя (табл. 2).

Таблица 2. Уровни показателей качества управления

Показатель	$i$	$q_i^{\text{good}}$	$q_i^{\text{bad}}$
$t_n$ , с	1	0,01	0,15
$\bar{\sigma}_y$ , %	2	1,5	10
$\bar{\sigma}_R$ , %	3	0,2	1,0

В результате оптимизации системы управления с ПР по сформированному комплексному критерию (5) с использованием генетического алгоритма *gatool*, реализованного в среде комплекса *MatLab*, были получены следующие параметры эталонной модели:

$$H_M(s) = \frac{k_i \cdot b_0}{s^6 + d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0},$$

где  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  и  $d_5$  – коэффициенты желаемого (оптимального) характеристического полинома САУ.

**Разработка методов настройки управляющих устройств с использованием эталонной модели.** В целях обеспечения устойчивой сходимости рекуррентных алгоритмов и сокращения длительности настройки управляющих устройств мехатронных систем предлагается использовать в качестве критерия оптимальности отклонение динамической характеристики реальной системы от эталонной модели (ЭМ) вида

$$H_M(s) = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_1 s + d_0}. \quad (8)$$

Передаточная функция ЭМ состоит из полинома объекта управления  $B(s)$  в числителе и оптимального в смысле комплексного критерия качества (5) характеристического полинома  $D(s)$  в знаменателе. При реализации алгоритма настройки на базе микропроцессорного контроллера передаточная функция ЭМ (8) преобразуется в цифровую форму одним из известных способов [3, 6].

В процессе настройки следует минимизировать меру отклонения динамической

характеристики реальной системы от соответствующей характеристики ЭМ за время переходного процесса. В качестве такой меры может служить величина средне-квадратического отклонения

$$F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y_j - y_j^M)^2}, \quad (9)$$

где  $N$  – относительное время переходного процесса;  $y_j$ ,  $y_j^M$  – значения переходной характеристики системы и эталонной модели;  $j$  – номер отсчета.

Исследование эффективности оптимизационных алгоритмов настройки [12–14] проводилось с использованием модели двухмассовой мехатронной системы (рис. 1), для которой был синтезирован динамический ПР и путем оптимизации получена ЭМ в виде динамического звена (8).

Модель системы управления была реализована в среде Simulink комплекса MatLab, расчет среднего отклонения переходных характеристик системы от ЭМ выполнен в виде S-функции *contr\_sim2* в соответствии с (9).

Поверхности отклика двухмассовой мехатронной системы с динамическим ПР при настройке по эталонной модели, полученные методом регулярного сканирования с шагом 2,5 % от исходных значений варьируемых параметров, приведены на рис. 2.

Поверхности имеют четко выраженный глобальный минимум, по мере удаления от него значение среднего по модулю отклонения  $F$  монотонно возрастает, что обеспечивает устойчивую сходимость поисковых алгоритмов настройки.

В табл. 3 приведены результаты оптимальной настройки мехатронной системы с динамическим ПР по эталонной модели градиентным методом ДФП и поисковым методом деформируемого симплекса (Нилдера-Мида). Типичные траектории движения к оптимуму изображены на рис. 2,а – для метода ДФП, на рис. 2,б – для метода Нилдера-Мида.

Как показывает анализ полученных данных, применение эталонной модели при настройке систем управления с цифровыми ПР обеспечивает устойчивую сходимость рекуррентных алгоритмов оптимизации независимо от начальных условий, а также снимает проблему локальных экстремумов.

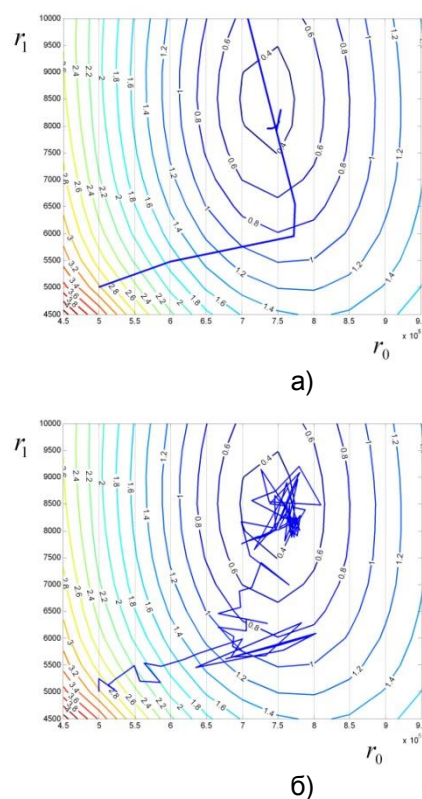


Рис. 2. Поверхности отклика системы с ПР и траектории движения к оптимуму при настройке по ЭМ: а – градиентным методом; б – симплексным методом

Таблица 3. Результаты настройки мехатронной системы с ПР по эталонной модели

Параметры ПР	Исходные параметры	Метод Нилдера-Мида	Метод ДФП
$r_0$	22879,00	7,1939e+05	7,3530e+05
$r_1$	28343	7,8818e+03	7,9606e+03
$r_2$	58,800	50,5680	52,2536
$c_0$	272125	6,0602e+04	4,2426e+04
$c_1$	800	800	800
$N$	–	113	86
$F$	0,6918	0,21	0,27

Вместе с тем настройка с использованием эталонной модели по-прежнему требует значительного количества опытов на объекте управления, что объясняется относительно большим количеством настраиваемых параметров регуляторов состояния.

**Разработка методов настройки мехатронных систем с учетом априорной информации об объекте управления.** В целях уменьшения длительности настройки систем с регуляторами состояния предлагается использовать априорную информацию, в качестве которой выступает

структура и известные разработчику параметры мехатронного объекта управления.

Это позволит варьировать в процессе настройки только оценки небольшого количества неизвестных параметров объекта управления (обычно 2–3), существенно снижая тем самым размерность задачи оптимизации.

Предлагаемый подход требует выполнения на каждой итерации алгоритма настройки процедуры параметрического синтеза управляющего устройства, т. е. цифрового регулятора состояния. В качестве критерия оптимальности настройки при этом целесообразно использовать введенную ранее эталонную модель, определяющую динамические свойства мехатронной системы управления.

Автоматизированный расчет параметров управляющего устройства в этом случае целесообразно проводить на основе метода модального синтеза, который относительно просто реализовать программно [1, 8]. В случае настройки системы с ПР вектор параметров регулятора определяется путем решения системы линейных уравнений, полученных на основе алгебраического уравнения синтеза (2).

В системах электропривода станков и поточных линий с упругими связями, описываемых двухмассовой математической моделью, параметры силового преобразователя и двигателя обычно известны достаточно точно, поскольку они весьма медленно меняются в процессе эксплуатации [9, 10]. Поэтому в процессе настройки целесообразно варьировать только оценки парамет-

ров механической части объекта управления – коэффициента упругости и момента инерции рабочего органа машины ( $C_{12}$  и  $J_2$ ).

Структурная схема вычислительного устройства, реализующего предлагаемый метод настройки систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами состояния, приведена на рис. 3. В процессе настройки тестовый сигнал подается на вход системы управления с ПР и эталонной модели.

Блок расчета критерия обеспечивает вычисление значения  $F$  по формуле (9) на интервале времени переходного процесса. Блок настройки определяет новые значения варьируемых параметров системы  $C_{12}$  и  $J_2$ , минимизирующих величину  $F$ , в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации.

На основе этих оценок блок расчета осуществляет параметрический синтез регулятора на основе выражений (3) путем решения уравнения (2) для динамического ПР. Затем выполняется коррекция параметров ПР и повторение цикла настройки до тех пор, пока значение критерия  $F$  не окажется меньше заданного уровня.

В целях исследования эффективности предлагаемый алгоритм настройки управляющих устройств по эталонной модели был реализован в виде программы, написанной на языке комплекса MatLab. Программа включает в себя вычислительные процедуры, реализующие алгоритмы оптимизации – регулярное сканирование, градиентный метод ДФП и симплексный метод Нилдера-Мида [12–14].



Рис. 3. Структурная схема, иллюстрирующая принцип автоматической настройки системы с ПР по эталонной модели



Поверхности отклика синтезированной мехатронной системы с ПР и типичные траектории движения к оптимуму при настройке методом вариации оценок параметров объекта  $C_{12}$ , и  $J_2$  с последующим расчетом параметров регулятора приведены на рис. 4.

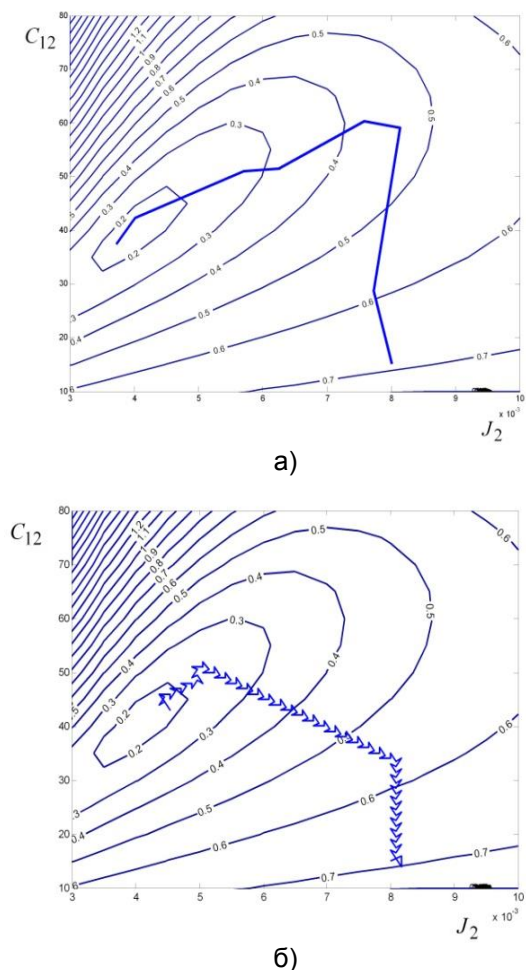


Рис. 4. Поверхности отклика системы с ПР и траектории движения к оптимуму при настройке с идентификацией объекта: а – градиентным методом; б – симплексным методом

Благодаря применению эталонной модели поверхности имеют четко выраженный глобальный минимум, по мере удаления от него значение среднего по модулю отклонения  $F$  монотонно возрастает.

В табл. 4 приведены результаты оптимальной настройки мехатронной системы предложенным методом, включающим вариацию оценок параметров объекта  $C_{12}$ , и  $J_2$ , а также параметрический синтез ПР на каждой итерации, с использованием алгоритмов ДФП и Нилдера-Мида.

Полученные в результате настройки переходные характеристики двухмассовой мехатронной системы с цифровым ПР при-

ведены на рис. 5, где кривые 1 соответствуют исходным параметрам регулятора, кривые 2 – эталонной модели, кривые 3 – настройке оптимизационными методами.

Таблица 4. Результаты настройки мехатронной системы с ПР идентификационным методом

Параметры ПР	Исходные параметры	Метод Нилдера-Мида	Метод ДФП
$J_2$	0,0015	0,0044	0,0041
$C_{12}$	40	44	40,82
$r_0$	-5,7333e+04	2,5301e+05	2,2861e+05
$r_1$	500,6667	3,7468e+03	3,5539e+03
$r_2$	1,900	8,8440	8,4172
$c_0$	2,3733e+05	2,5332e+05	2,5372e+05
$c_1$	800	800	800
$N$	–	45	30
$F$	0,6918	0,1554	0,1554

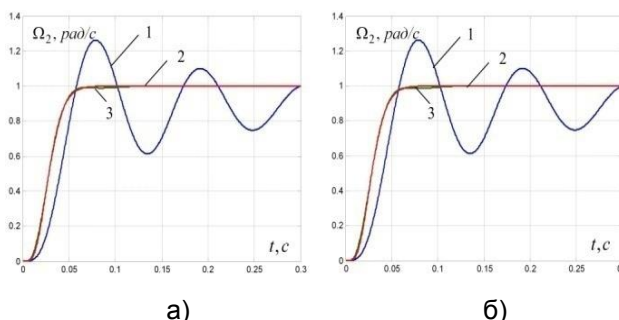


Рис. 5. Переходные характеристики мехатронной системы при настройке: а – градиентным методом; б – симплексным методом

**Экспериментальные исследования методов настройки управляющих устройств мехатронных систем.**

Экспериментальные исследования предложенных методов автоматической настройки цифровых управляющих устройств мехатронных систем проводились на базе 4-канального лабораторного стенда, содержащего двигателя постоянного тока, широтно-импульсные преобразователи, фотоимпульсные датчики положения и скорости.

Для реализации цифровых управляющих устройств и алгоритмов настройки использовалась двухуровневая микропроцессорная система управления, состоящая из компьютера верхнего уровня и контроллера движения, программно совместимого с системой Turbo PMAC2 [15].

Разработанные цифровые регуляторы, а также алгоритмы их автоматической настройки были выполнены на базе контроллера движения с использованием язы-



ка высокого уровня и операционной системы реального времени. На компьютер верхнего уровня возложены функции отладки программных средств контроллера, а также отображения и архивирования результатов экспериментов.

Для проведения исследований на базе лабораторного стенда, оснащенного микропроцессорной системой управления, была реализована физическая модель мехатронного объекта с упругой связью между вращающимися массами, а также цифровое управляющее устройство ПР со структурой, приведенной на рис. 1.

Полученные экспериментальным путем переходные характеристики мехатронной системы управления с расчетными параметрами ПР и эталонной модели приведены на рис. 6. Синтезированная система управления в силу робастных свойств ПР устойчива, однако качество управления не соответствует заданному, что говорит о необходимости дальнейшей настройки.

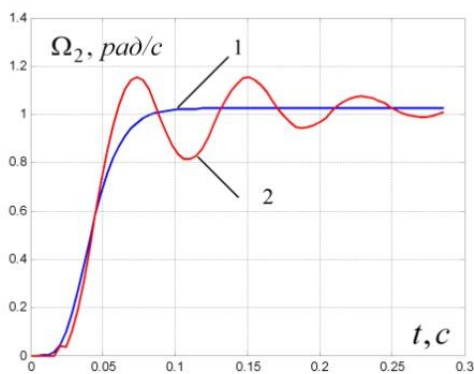


Рис. 6. Экспериментальные характеристики мехатронной системы при исходных параметрах цифрового ПР: 1 – эталонная модель; 2 – расчетные параметры ПР

Настройка мехатронной системы с цифровым ПР проводилась предложенным методом, основанным на применении эталонной модели, априорной информации об объекте управления и оперативном расчете параметров регулятора. Для решения задачи оптимизации на базе контроллера движения были реализованы поисковые методы правильного и деформируемого симплекса, а также градиентный метод ДФП.

Результаты автоматической настройки системы управления мехатронным объектом с ПР градиентным методом ДФП и симплексным методом Нилдера-Мида приведены на рис. 7, а, б соответственно.

Как показали экспериментальные исследования, разработанные алгоритмы настройки обеспечивают улучшение качества переходных процессов в системе управления, приближающегося в результате к эталонной модели.

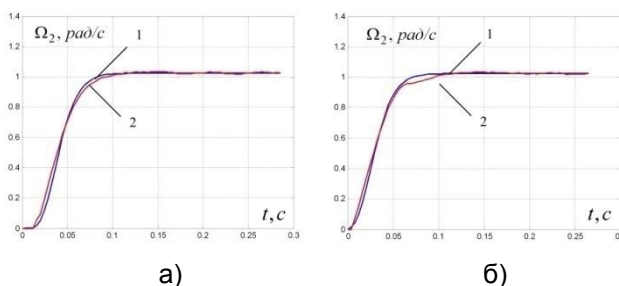


Рис. 7. Экспериментальные характеристики мехатронной системы при настройке: а – градиентным методом; б – симплексным методом

При этом симплексные алгоритмы обеспечивают настройку системы за 30–45 итераций, градиентные – за 25–30 итераций в зависимости от начальных условий.

Симплексные алгоритмы по сравнению с градиентными обеспечивают более качественную и надежную настройку, однако требуют большего количества опытов на реальном объекте управления.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведения вычислительных и натурных экспериментов подтвердилась работоспособность и эффективность предложенных методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов мехатронных систем управления.

Применение эталонной модели системы, полученной путем оптимизации мехатронной системы по комплексному критерию качества, а также использование априорной информации, включающей вариацию оценок неизвестных параметров объекта и расчет значений параметров регулятора на каждой итерации, позволяют эффективно решать задачу автоматической настройки при минимальном количестве опытов.

Минимальное количество опытов и устойчивая сходимость процессов настройки обеспечиваются при использовании рекуррентных алгоритмов численной оптимизации, причем наиболее эффективными и помехоустойчивыми оказываются поисковые методы деформируемого симплекса, а также градиентные методы с переменным шагом.

## Список литературы

1. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. – Иваново, 2015. – 296 с.

2. **Анализ** параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, Д.Г. Котов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 18–32.

3. **Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

4. **Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.

5. **Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.** Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.

6. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

7. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

8. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.

9. **Шенфельд Р., Хабигер Э.** Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю.А. Борцова. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

10. **William Bolton.** Mechatronics. Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. – Harlow, Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2015. – Sixth edition. – 663 p.

11. **Hjalmarsson H.** Iterative feedback tuning – an overview // Int. J. Adaptive Control Signal Proc. – 2002. – Vol. 16(5). – P. 373–395.

12. **Singiresu S. Rao.** Engineering Optimization Theory and Practice. – New Jersey: John Wiley and sons, 2009. – Fourth edition. – 830 p.

13. **Roger Fletcher.** Practical methods of optimization. – New Jersey: John Wiley and sons, 2000. – Second edition. – 451 p.

14. **Edwin K.P. Chong, Stanislaw H. Zak.** An Introduction to Optimization. – New Jersey: John Wiley and sons, 2013. – Fourth edition. – 642 p.

15. **Turbo PMAC/PMAC2.** Software Reference Manual / Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. – 757 p.

## References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskiiy sintez, optimizatsiya i*

*nastroyka sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami* [Structural and Parametrical Synthesis, Optimization and Tuning of Control Systems for Industrial Plants]. Ivanovo, 2015. 296 p.

2. Anisimov, A.A., Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Analiz parametricheskoy chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizatsiya sistem modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya* [Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698–719.

3. Andrievskiy, B.R., Fradkov, A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automatic control theory with examples in MATLAB language]. Saint-Petersburg: Nauka, 1999. 467 p.

4. Gaiduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: FIZMATLIT, 2012. 360 p.

5. Gudvin, G.K., Grebe, S.F., Sal'gado, M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Control System Design]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2004. 911 p.

6. Kuo, B.C. *Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya* [Theory and design of digital control systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 488 p.

7. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust Stability and Control]. Moscow: Nauka, 2002. 303 p.

8. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust Modal Control for Technological Objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

9. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannyye elektroprirody* [Automatic electric drives]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 464 p.

10. Bolton, William. *Mechatronics. Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. Harlow, Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2015, sixth edition, 663 p.

11. Hjalmarsson, H. Iterative feedback tuning – an overview. *Int. J. Adaptive Control Signal Proc.*, 2002, vol. 16(5), pp. 373–395.

12. Singiresu, S. Rao. *Engineering Optimization Theory and Practice*. New Jersey: John Wiley and sons, 2009, fourth edition, 830 p.

13. Fletcher, Roger. *Practical methods of optimization*. New Jersey: John Wiley and sons, 2000, second edition, 451 p.

14. Edwin, K.P. Chong, Stanislaw, H. Zak. *An Introduction to Optimization*. New Jersey: John Wiley and sons, 2013, fourth edition, 642 p.

15. Turbo PMAC/PMAC2. *Software Reference Manual*. Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. 757 p.