

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Н.Н. Чернышев¹, chernyshev@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>
Т.В. Ниженец², tanaparty@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика

Аннотация. Основным фактором повышения эффективности процесса функционирования систем автоматического управления техническими объектами и процессами в различных областях промышленности является оптимальная настройка параметров модального регуляторов так, чтобы, например, обеспечить протекание переходных процессов за минимальное время или достичь минимального значения интегральной оценки качества управления. Решение оптимизационной задачи выполняется для подынтегральной функции такого вида, чтобы интегральная оценка лучше выражала качество управления. При этом показатели качества управления зависят от настроечных параметров регулятора достаточно сложными соотношениями, что значительно усложняет процедуру аналитического синтеза. Алгоритмы численной оптимизации различаются между собой способом изменения подстраиваемых параметров, при этом наиболее эффективными считаются те, которые достигают результата при меньших затратах вычислительного времени. **Цель исследования** – получение оптимальных значений параметров модального регулятора с интегральной составляющей и ограничениями для непрерывных линейных стационарных систем на основе стохастического метазвристического метода роя частиц. **Материалы и методы.** Используется современная теория автоматического управления, роевой интеллект в решении задачи оптимизации параметров модального регулятора и управлении техническими системами. **Результаты.** Представлен процесс параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц для одномерного объекта управления. Приведены результаты моделирования с помощью метода прямого перебора параметров регулятора и метода роя частиц, их сравнение. **Заключение.** Результаты численных исследований позволяют говорить о том, что разработанный алгоритм решения параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц обладает высокой точностью и большим быстродействием.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, модальный регулятор, показатели качества управления, ограничения, метод роя частиц

Для цитирования: Чернышев Н.Н., Ниженец Т.В. Параметрическая оптимизация модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 76–86. DOI: 10.14529/ctcr220207

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220207

PARTICLE SWARM PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A CONSTRAINED STATE FEEDBACK CONTROLLER

N.N. Chernyshev¹, chernyshev@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>
T.V. Nizhenets², tanaparty@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

² Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic

Abstract. The key to increasing the efficient functioning of automatic control systems for technical facilities and processes in various areas of industry is the optimal setting of the state feedback controller parameters, for instance, so as to minimize the duration of transient processes or achieve the minimum value

of the integral control quality assessment. The optimization problem is solved for an integrand of a kind that ensures that the integral assessment better expresses the quality of control. At the same time, the control quality indicators are in a rather complex relation to the set parameters of the controller, which greatly complicates the analytical synthesis procedure. Numerical optimization algorithms differ in the way the adjustable parameters are changed, the most effective being those that achieve the result in a shorter computational time. **Aim.** The goal is to obtain the optimal parameter values for a state feedback controller with an integral component and limitations for continuous linear stationary systems based on the stochastic metaheuristic particle swarm method. **Materials and methods.** The modern theory of automatic control, swarm intelligence are used to solve the problem of optimizing the parameters of the state feedback controller and controlling technical systems. **Results.** The process of parametric optimization of a constrained state feedback controller using the particle swarm method for a one-dimensional controlled object is described. The results of simulation using the method of direct enumeration of the controller parameters and the particle swarm method are described and compared. **Conclusion.** The results of numerical studies allow us to conclude that the developed algorithm for particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller is highly accurate and fast.

Keywords: parametric optimization, state feedback controller, transient response specifications, constraints, particle swarm optimization algorithm

For citation: Chernyshev N.N., Nizhenets T.V. Particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):76–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220207

Введение

В общем смысле задача настройки регулятора, обеспечивающего оптимальное протекание переходного процесса в системе, сводится к задаче глобальной оптимизации. Особенности такой задачи часто являются нелинейность, мультимодальность, вычислительная сложность, большая размерность пространства, в котором осуществляется поиск, что является причиной отсутствия универсальных алгоритмов решения оптимизационных задач [1, 2]. Параметрическая оптимизация численными методами позволяет упростить процесс нахождения оптимальных параметров регуляторов [3–9], но не всегда достигается:

1) быстрдействие алгоритма настройки регуляторов для различного класса объектов управления, что особенно важно для бортовых систем управления, построенных на маломощных вычислительных средствах;

2) оптимальное протекание переходных процессов в замкнутой системе по причине того, что не учитывались различного рода нелинейные зависимости. В частности, при учете эффекта насыщения исполнительного механизма классические методы настройки не гарантируют получение переходных процессов с заданными показателями качества.

В 1980-х гг. появилась группа стохастических поисковых методов оптимизации, которые называют интеллектуальными, метаэвристическими, роевыми и т. д. Роевые методы в сравнении с классическими методами оптимизации имеют преимущества при решении задач с перечисленными особенностями, при этом они могут обеспечить нахождение глобального экстремума целевой функции с приемлемой точностью для решения большинства практических задач управления в технических системах [1, 10, 11]. Поэтому для решения оптимизационной задачи при синтезе модального регулятора предлагается применение стохастического метаэвристического метода оптимизации роя частиц (particle swarm optimization).

При использовании метода роя частиц возникает задача его настройки для решения конкретной оптимизационной задачи для системы управления, выбора значений коэффициентов для получения точного решения, как показано в исследованиях таких авторов, как П.В. Матренин, Н.В. Ростов, А.Р. Engelbrecht, М. Dorigo, R.C. Eberhart, J. Kennedy, S. Ozana, Y.H. Shi, H. Lu, W. Chen и других [1–15].

1. Постановка задачи

Рассмотрим замкнутую систему с модальным регулятором и обратной связью по регулируемой переменной (рис. 1). Для придания астатических свойств замкнутой системе в структуру введена интегральная составляющая модального регулятора.

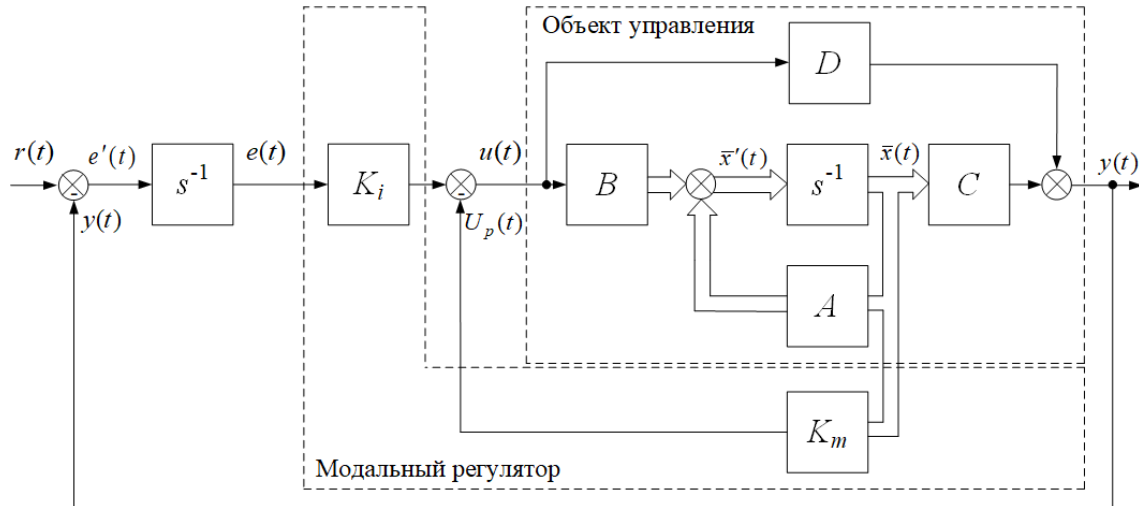


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы с модальным регулятором
Fig. 1. Structural diagram of a closed system with a state feedback controller

В соответствии с рис. 1 можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + Bu(t), \\ y(t) = C\bar{x}(t) + Du(t), \end{cases} \quad (1)$$

где A – матрица динамики размерности $(n \times n)$; B – матрица управления размерности $(n \times 1)$; C – матрица выхода размерности $(1 \times n)$; D – матрица обхода размерности (1×1) ; $\bar{x}(t)$ – n -мерный вектор состояния; $r(t)$ – задающие воздействие; $u(t)$ – управляющие воздействие; $y(t)$ – регулируемая переменная.

Введем обозначение для переменной рассогласования регулятора:

$$e'(t) = r(t) - y(t) = r(t) - C\bar{x}(t) - Du(t). \quad (2)$$

Предполагается, что объект, описываемый уравнением (1): обладает свойством полной управляемости; все переменные состояния измеряются; не возникнет случая сокращения нулей интегратора и объекта; входное воздействие в виде ступенчатой функции $r(t) = 1(t)$ прикладывается к системе в момент $t = 0$.

Динамика системы может быть описана уравнением, которое является объединением уравнений (1), (2):

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ e'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & O_{(n \times 1)} \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t), \quad (3)$$

где

$$u(t) = -K_m \bar{x}(t) + K_i e(t). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение новый вектор $\bar{X}(t)$ $m = (n + 1)$ -го порядка:

$$\bar{X}(t) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

С учетом введенного обозначения (5) уравнение (3) примет вид

$$\dot{\bar{X}}(t) = A_s \bar{X}(t) + B_s u(t), \quad (6)$$

где

$$A_s = \begin{bmatrix} A & O_{(n \times 1)} \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad B_s = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а уравнение (4) может быть представлено в виде

$$u(t) = -K \bar{X}(t), \quad (8)$$

где

$$K = [K_m \quad -K_i]. \quad (9)$$

Задача параметрической оптимизации модального регулятора такой замкнутой системы состоит в том, чтобы при заданных уравнении объекта управления (6), (7), ограничениях $\bar{X}(t) \in X$, $u(t) \in U$ найти управление $u(t)$ (8), при котором минимизируется целевая функция вида

$$J = f(\bar{X}(t), u(t), t) \quad (10)$$

и замкнутая система является асимптотически устойчивой.

2. Выбор целевой функции

Оценка качества управления основывается на численных показателях. Так, прямые, корневые и частотные показатели качества характеризует лишь один признак переходного процесса. В инженерной практике часто используются интегральные показатели качества по ошибке управления [7]:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt, \quad I = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad I = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \text{ и др.} \quad (11)$$

Они позволяют не только выполнить оценку качества, но и определить оптимальные значения параметров регулятора, которые соответствуют минимуму выбранного интегрального показателя. Однако на практике при синтезе регулятора необходимо учитывать различного рода ограничения [7, 8, 12] как на управляемую переменную, так и на формируемый сигнал управления.

1. Перерегулирование. Для учета перерегулирования предлагается использовать вычисление переменной $y_{OV}(t)$ по формуле вида

$$y_{OV}(t) = \begin{cases} r(t) & y(t) \geq r(t), \\ y(t) & y(t) < r(t). \end{cases} \quad (12)$$

Штрафная функция может быть вычислена по формуле

$$P_1(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|y(t) - y_{OV}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{OV}(t)| dt, \quad (13)$$

где $t_{п.п}$ – время переходного процесса.

2. Насыщение сигнала управления. Для учета ограничения на предельные значения (u_{\max} и u_{\min}) сигнала управления $u(t)$ на выходе регулятора предлагается использовать вычисление переменной $u_{SL}(t)$ по формуле вида

$$u_{SL}(t) = \begin{cases} u_{\max} & u(t) \geq u_{\max}, \\ u(t) & u_{\min} < u(t) < u_{\max}, \\ u_{\min} & u(t) \leq u_{\min}. \end{cases} \quad (14)$$

Штрафная функция может быть вычислена по формуле

$$P_2(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|u(t) - u_{SL}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{SL}(t)| dt. \quad (15)$$

3. Скорость изменения сигнала управления. Для учета ограничения на максимальную скорость нарастания (R) и убывания (F) управляющей переменной $u(t)$ предлагается использовать вычисление первой производной $du(k)$ и переменной $u_{RL}(k)$ по формуле вида

$$du(k) = \frac{u(k) - u_{RL}(k)}{\Delta t}, \quad k = 1, 2, \dots, \\ u_{RL}(k) = \begin{cases} \Delta t \cdot R + u_{RL}(k-1) & du(k) > R, \\ u(t) & F \leq du(k) \leq R, \\ \Delta t \cdot F + u_{RL}(k-1) & du(k) < F. \end{cases} \quad (16)$$

Штрафная функция тогда может быть вычислена по формуле

$$P_3(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|u(t) - u_{RL}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{RL}(t)| dt. \quad (17)$$

Принимая во внимание рассмотренные ограничения, при решении задачи глобальной оптимизации целесообразно использовать целевую функцию с учетом интегрального критерия качества и штрафных функций, значение которой определяется параметрами регулятора K :

$$\min J(K) = k_1 \cdot I(K) + k_2 \cdot P_1(K) + k_3 \cdot P_2(K) + k_4 \cdot P_3(K), \quad (18)$$

где k_1, k_2, k_3 и k_4 – весовые коэффициенты, которые определяют вклад каждого слагаемого в получаемое значение целевой функции и позволяют в процессе синтеза регулятора учесть в большей или меньшей степени необходимые ограничения; $I(K)$ – интегральный показатель качества по ошибке управления вида (11); $P_1(K)$ – штрафная функция по величине перерегулирования регулируемой переменной вида (13); $P_2(K)$ – штрафная функция по величине насыщения сигнала управления вида (15); $P_3(K)$ – штрафная функция по величине скорости изменения сигнала управления вида (17).

3. Описание метода роя частиц для решения оптимизационной задачи

Основу поведения роя частиц составляет самоорганизация, обеспечивающая достижение общих целей роя на основе низкоуровневого взаимодействия. Частицы движутся в многомерном пространстве поиска, где положение каждой частицы определяется в соответствии с ее собственным опытом и опытом ее соседей, таким образом происходит обнаружение оптимальных областей многомерного пространства, в котором выполняется поиск [10, 13–15].

Пусть $x_{i,n}(k)$ обозначает положение частицы i ($i = 1, 2, \dots, M$, где M – количество частиц роя) в n -мерном пространстве поиска (n – число настраиваемых параметров регулятора) в k -й момент времени. Положение частицы изменяется путем переноса $x_{i,n}(k)$ на вектор скорости $v_{i,n}(k+1)$, т. е.

$$x_{i,n}(k+1) = x_{i,n}(k) + v_{i,n}(k+1), \quad (19)$$

где $v_{i,n}(k+1)$ – скорость перемещения частицы из позиции $x_{i,n}(k)$ в позицию $x_{i,n}(k+1)$.

Существует несколько разновидностей «социальной» структуры роя. Предлагается использовать структуру в форме «звездообразной» сети. Поскольку она позволяет организовать процесс поиска оптимума быстрее, чем другие сетевые структуры [10]. Коррекция скорости каждой частицы при использовании «звездообразной» социальной структуры роя определяется выражением

$$v_{i,n}(k+1) = w \cdot v_{i,n}(k) + r_1 \cdot c_1 \cdot (p_{i,n}(k) - x_{i,n}(k)) + r_2 \cdot c_2 \cdot (g_n(k) - x_{i,n}(k)), \quad (20)$$

где w – коэффициент инерции; c_1, c_2 – коэффициенты ускорения частицы, которые отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения либо сохранить свое положение; r_1, r_2 – коэффициенты, которые могут принимать случайные значения из интервала $[0; 1]$.

Предлагается коэффициент инерции изменять по формуле

$$w(k+1) = \alpha w(k), \quad (21)$$

где $\alpha < 1$.

Личная лучшая позиция $p_{i,n}$ i -й частицы – это лучшая позиция, которую частица посетила с первого временного шага. С учетом задач минимизации лучшая личная позиция на следующем временном шаге $k+1$ рассчитывается как

$$p_{i,n}(k+1) = \begin{cases} p_{i,n}(k) & J(x_{i,n}(k+1)) \geq J(p_{i,n}(k)), \\ p_{i,n}(k+1) & J(x_{i,n}(k+1)) < J(p_{i,n}(k)), \end{cases} \quad (22)$$

где J – целевая функция вида (18).

Глобальная наилучшая позиция g_n является наилучшей позицией, обнаруженной любой из частиц до момента k и определяется как

$$g_n(k) \in \{p_{1,n}(k), \dots, p_{M,n}(k)\}, \\ g_n(k) = \min \{J(p_{1,n}(k)), \dots, J(p_{M,n}(k))\}, \quad (23)$$

где M – общее количество частиц в рое.

4. Алгоритм параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц

Численное решение задачи параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц проходит в несколько этапов и схематически выглядит следующим образом (рис. 2).

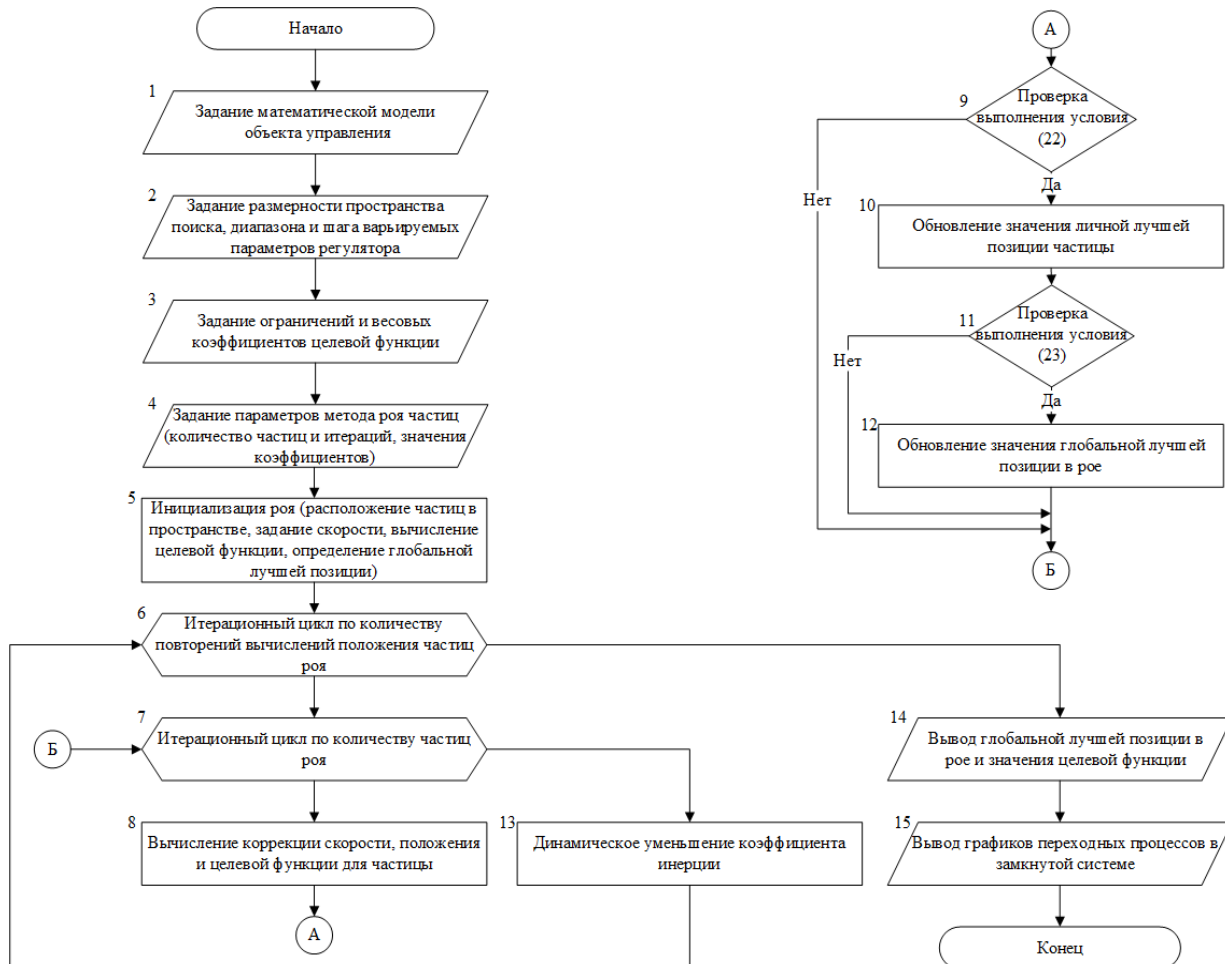


Рис. 2. Блок-схема алгоритма параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц

Fig. 2. Block diagram of the parametric optimization algorithm of state feedback controller with constraints based on the particle swarm optimization algorithm

Шаг 1. В начале задается математическая модель объекта управления в форме пространства состояний вида (6).

Шаг 2. Задание диапазона поиска и шага изменения параметров регулятора $[x_{i,n}^{\min} \quad x_{i,n}^{\max}]$ в n -мерном пространстве ($n=1, 2, \dots$).

Шаг 3. Ввод ограничений на регулируемую переменную (12), сигнал управления (14), (16) и значений весовых коэффициентов k_1, k_2, k_3 и k_4 функционала (18).

Шаг 4. Задание параметров метода роя частиц: количество частиц в рое M и итераций It , значения коэффициентов инерции w , ускорения частицы c_1 и c_2 .

Шаг 5. Инициализация роя заключается в случайном распределении частиц $x_{i,n}^0(0)$ в пространстве поиска, задания начальной скорости $v_{i,n}^0(0)$, вычисления целевой функции для каждой частицы и определении глобальной лучшей позиции роя по формуле (23).

Шаг 6 и 7. Далее проходит итерационный процесс вычислений заданное число раз для каждой частицы роя.

Шаг 8. Вычисление коррекции скорости частицы $v_{i,n}(k+1)$ по формуле (20), положения частицы $x_{i,n}(k+1)$ по формуле (19) и значения целевой функции $J(x_{i,n}(k))$ частицы i в позиции $x_{i,n}(k)$.

Шаг 9 и 10. Определение личной лучшей позиции $p_{i,n}(k)$ i -й частицы по формуле (22).

Шаг 11 и 12. Определение глобальной наилучшей лучшей позиции в рое $g_p(k)$ по формуле (23).

Шаг 13. Динамическое уменьшение коэффициента инерции по формуле (21).

Итерации продолжают, пока алгоритм не достигнет останавливающегося критерия – достижение определенного числа итераций.

Шаг 14. После завершения алгоритма выводится найденное значение целевой функции $J(g_n(T))$ в глобальной наилучшей лучшей позиции роя.

Шаг 15. Отображение графиков переходных процессов по регулируемой переменной, сигналу рассогласования и управления при оптимальных параметрах модального регулятора.

5. Моделирование процесса параметрической оптимизации модального регулятора

Рассмотрим объект управления, описываемый дифференциальным уравнением вида (параметры $k = 2, T = 10$ с):

$$x'(t) = -\frac{1}{T}x(t) + \frac{k}{T}u(t),$$

где T – постоянная времени; k – коэффициент передачи; $u(t)$ – управляемая переменная; $x(t)$ – регулируемая переменная.

Начальные значения параметров модального регулятора $K = [K_m^0 \ K_i^0] = [13,5 \ 20]$ найдены при распределении полюсов по Баттерворту со значением среднегеометрического корня $\omega_0 = 2$.

Предположим, что при параметрической оптимизации модального регулятора нужно учитывать следующие физические ограничения:

1) на амплитуду сигнала управления $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$ ($u_{\max} = 4$ ед., $u_{\min} = 0$ ед.);

2) на скорость нарастания (убывания) сигнала управления $F \leq u'(t) \leq R$ ($R = 9$ ед./с, $F = -9$ ед./с).

Примем, что весовые коэффициенты целевой функции равны:

$$\min J(K) = 0,5 \cdot I(K) + 0,1 \cdot P_1(K) + 1 \cdot P_2(K) + 30 \cdot P_3(K). \quad (24)$$

На рис. 3 показаны графики переходных процессов в системе с начальными параметрами модального регулятора.

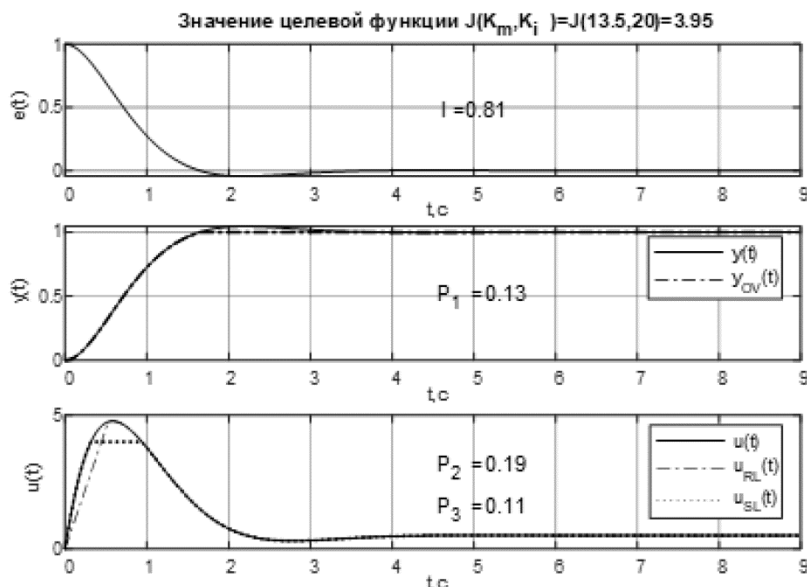


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе с начальными параметрами модального регулятора
Fig. 3. Transient processes in a closed system with initial parameters of the state feedback controller

Анализ графиков на рис. 3 позволяет сделать вывод, что сигнал управления не соответствует введенным ограничениям. Для подтверждения адекватности разработанного алгоритма параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц сначала найдем минимальное значение целевой функции (24) с помощью метода прямого перебора значений параметров регулятора из диапазона:

$$x_{1,2} = K_m \in [0,01 \cdot K_m^0 \quad 1,5 \cdot K_m^0],$$

$$x_{2,2} = K_i \in [0,01 \cdot K_i^0 \quad 1,5 \cdot K_i^0].$$

Шаг изменения параметров регулятора выбран равным 0,1. В результате получена зависимость значений целевой функции от параметров регулятора в форме поверхности, приведенной на рис. 4.

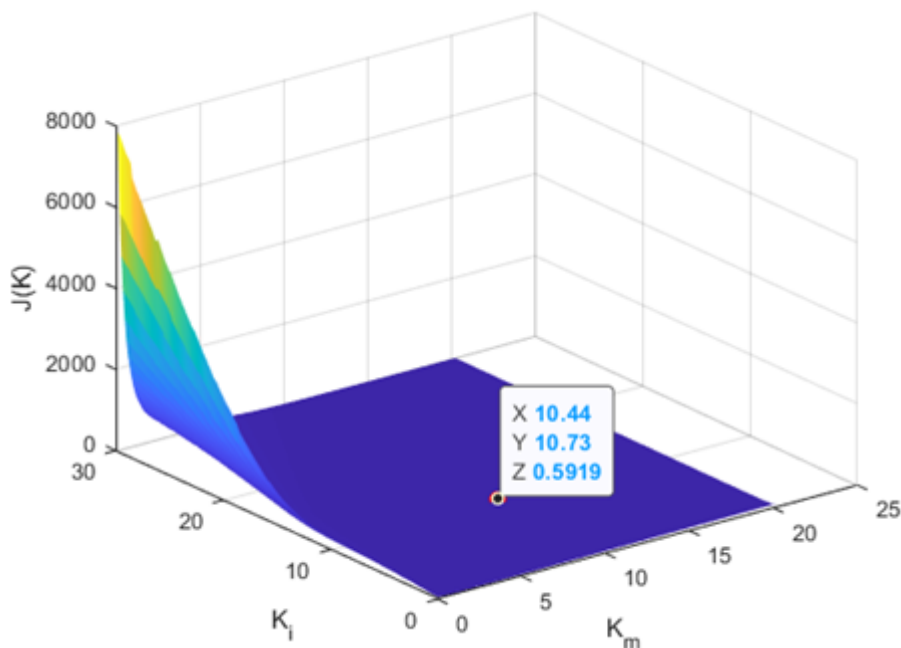


Рис. 4. Поверхность, полученная с помощью последовательного перебора параметров регулятора

Fig. 4. The surface obtained by sequential enumeration of the controller parameters

Минимальное значение целевая функция принимает при параметрах регулятора, равных:

$$\min J(K) = \min J\left(\begin{bmatrix} K_m^{\text{np}} & K_i^{\text{np}} \end{bmatrix}\right) = \min J([10,44 \quad 10,73]) = 0,5919.$$

Для параметрической оптимизации модального регулятора на основе метода роя частиц зададим количество частиц в рое $M = 10$ и итераций $It = 45$, коэффициенты инерции $w = 1$, $\alpha = 0,99$, ускорения частицы $c_1 = c_2 = 0,5$. В результате получено, что минимальное значение целевая функция принимает при параметрах регулятора, равных

$$\min J(K) = \min J\left(\begin{bmatrix} K_m^{\text{pc}} & K_i^{\text{pc}} \end{bmatrix}\right) = \min J([10,31 \quad 10,57]) = 0,5918.$$

На рис. 5 показаны графики переходных процессов в системе с найденными параметрами модального регулятора

$$K = \begin{bmatrix} K_m^{\text{pc}} & K_i^{\text{pc}} \end{bmatrix}.$$

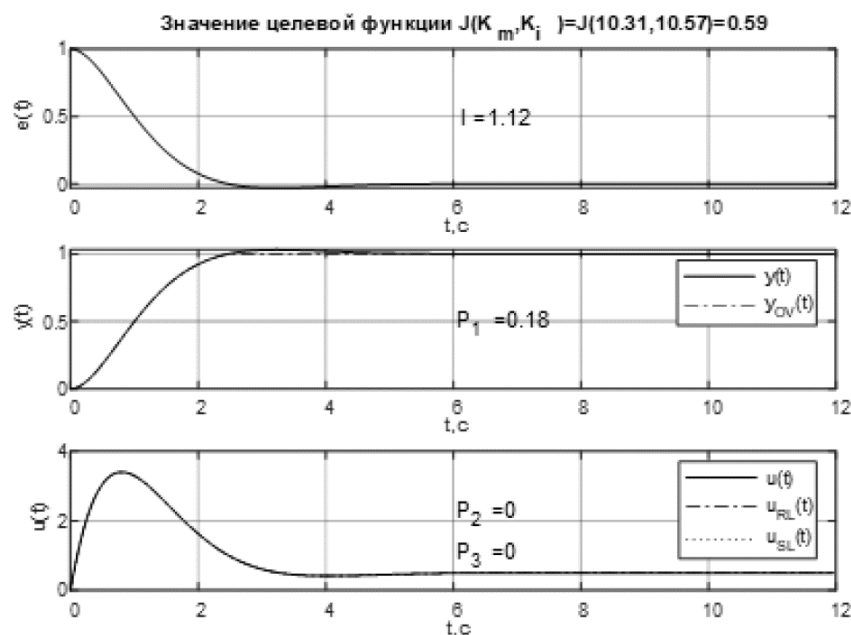


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой системе с параметрами модального регулятора, найденными с помощью метода роя частиц
Fig. 5. Transient processes in a closed system with the parameters of the state feedback controller found using the particle swarm optimization algorithm

6. Экспериментальные результаты

На эффективность решения задачи параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц влияет ряд управляющих параметров, а именно:

1) количество частиц в рое. Большой рой позволяет охватить большую часть пространства поиска и уменьшить количество итераций. Для роя с небольшим количеством частиц (меньше 20) требуется больше итераций для нахождения минимума целевой функции, при этом уменьшается быстродействие алгоритма;

2) количество итераций. Малое число итераций может привести к преждевременному прекращению поиска. Слишком большое количество итераций приводит к повышению вычислительной сложности алгоритма;

3) коэффициент инерции w контролирует скорость движения частиц путем определения степени влияния скорости в прошлый момент времени на новое значение скорости частиц [15]. Поэтому большие значения w позволяют рою исследовать большие «территории». Небольшой w способствует поиску в меньшем пространстве, при этом уменьшается способность роя к проведению поиска экстремума целевой функции в большей окрестности. В разработанном алгоритме предлагается использовать динамическое уменьшение коэффициента инерции (21), что позволит сократить время поиска минимума целевой функции;

4) коэффициенты c_1 , c_2 контролируют влияние когнитивной и социальной составляющих на общую скорость частицы [15]. Предлагается коэффициенты c_1 и c_2 задать равными друг другу и не изменять в процессе выполнения поиска, это приведет к тому, что частицы будут тяготеть к среднему значению $p_{i,n}(k)$ и $g_n(k)$. При этом c_1 и c_2 рекомендуется брать меньше 1, в результате траектории движения частиц будут плавными, что позволит рою осуществить поиск оптимума в большем пространстве, прежде чем вернуться к лучшему значению. При этом неправильная инициализация c_1 и c_2 может привести к расходящемуся или циклическому поведению роя.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что найденные параметры модального регулятора совпадают с полученными по методу перебора. При этом время выполнения программы (MATLAB®, процессор Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2,30ГГц – 2,40 ГГц, ОЗУ 8,00 ГБ) по поиску параметров модального регулятора с помощью метода перебора составляет около 5,5 мин, а предложенным способом на основе метода роя частиц – около 4 с.

Заключение

Предложенный алгоритм параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц позволяет исследователю варьировать весовые коэффициенты целевой функции, тем самым добиваясь требуемых показателей качества переходных процессов с учетом ограничений на управление, а изменение параметров метода роя частиц позволит достичь требуемой точности и затрачиваемого времени для нахождения оптимальных параметров модального регулятора.

Список литературы

1. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 446 с.
2. Матренин П.В., Секаев В.Г. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта // Программная инженерия. 2013. № 12. С. 39–45.
3. Allaoua B. Intelligent PID DC Motor Speed Control Alteration Parameters Using Particle Swarm Optimization // Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering. 2012. No. 12. P. 3–14. DOI: 10.2174/978160805126711201010003
4. PID controller tuning parameters using meta-heuristics algorithms: comparative analysis / M. Issa, A.A. Elbaset, A.E. Hassanien, I. Ziedan // Machine Learning Paradigms: Theory and Application. 2018. Vol. 801. P. 413–30. DOI: 10.1007/978-3-030-02357-7_20
5. Самигулина Г.А., Самигулин Т.И. Обзор современных подходов искусственного интеллекта для систем управления сложными объектами // Проблемы информатики. 2018. № 3. С. 4–20.
6. Ростов Н.В. Параметрическая оптимизация цифровых модальных регуляторов // Информатика, телекоммуникации и управление. 2010. № 3 (101). С. 39–44.
7. Ozana S., Docekal T. PID controller design based on global optimization technique with additional constraints // Journal of Electrical Engineering. 2016. No. 67 (3). P. 160–168. DOI: 10.1515/jee-2016-0023
8. Solihin M.I., Akmeliawati R., Legowo A. Robust feedback control design using PSO-based optimisation: a case study in gantry crane control // Int. J. Mechatronics and Automation. 2011. No. 1 (2). P. 121–131.
9. Mahdizadeh A., Schmid R. Robust eigenvalue assignment via particle swarm optimization methods // 2015 5th Australian Control Conference (AUCC). 2015. P. 153–157.
10. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. Second edition. Chichester: Wiley, 2020. 640 p.
11. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. Swarm Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 512 p.
12. Lu H., Chen W. Dynamic-objective particle swarm optimization for constrained optimization problems // Journal of Combinatorial Optimization. 2006. No. 12 (4). P. 409–19. DOI: 10.1007/s10878-006-9004-x
13. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. 1995. No. 4. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968
14. Eberhart R.C., Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546). 2001. No. 1. P. 81–86. DOI: 10.1109/CEC.2001.934374
15. Eberhart R.C., Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization // Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation CEC00 (Cat. No. 00TH8512). 2000. No. 1. P. 84–88. DOI: 10.1109/CEC.2000.870279

References

1. Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman Publ.; 2017. 446 p. (In Russ.)
2. Matrenin P.V., Sekaev V.G. [System description of swarm intelligence algorithms]. *Programmnyaya Inzheneriya*. 2013;(12):39–45. (In Russ.)
3. Allaoua B. Intelligent PID DC Motor Speed Control Alteration Parameters Using Particle Swarm

Optimization. *Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering*. 2012;(12):3–14. DOI: 10.2174/978160805126711201010003

4. Issa M., Elbaset A.A., Hassanien A.E., Ziedan I. PID Controller Tuning Parameters Using Meta-Heuristics Algorithms: Comparative Analysis. *Machine Learning Paradigms: Theory and Application*. 2018;801:413–30. DOI: 10.1007/978-3-030-02357-7_20

5. Camigulina G.A., Samigulin T.I. [Review of Modern Approaches of Artificial Intelligence for Control Systems of Complex Objects]. *Problems of Informatics*. 2018;(3):4–20. (In Russ.)

6. Rostov N.V. [Parametric Optimization of Digital Modal Controllers]. *Informatics, Telecommunications and Control*. 2010;3(101):39–44. (In Russ.)

7. Ozana S., Docekal T. PID Controller Design Based on Global Optimization Technique with Additional Constraints. *Journal of Electrical Engineering*. 2016;67(3):160–168. DOI: 10.1515/jee-2016-0023

8. Solihin M.I., Akmeliawati R., Legowo A. Robust Feedback Control Design Using PSO-Based Optimisation: a Case Study in Gantry Crane Control. *Int. J. Mechatronics and Automation*. 2011;1(2):121–131.

9. Mahdizadeh A., Schmid R. Robust Eigenvalue Assignment via Particle Swarm Optimization Methods. In: *2015 5th Australian Control Conference (AUCC)*; 2015. P. 153–157.

10. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. Second edition. Chichester: Wiley; 2020. 640 p.

11. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. *Swarm Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers; 2001. 512 p.

12. Lu H., Chen W. Dynamic-Objective Particle Swarm Optimization for Constrained Optimization Problems. *Journal of Combinatorial Optimization*. 2006;12(4):409–19. DOI: 10.1007/s10878-006-9004-x

13. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*; 1995, no. 4. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968

14. Eberhart R.C., Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*; 2001, no. 1. P. 81–86. DOI: 10.1109/CEC.2001.934374

15. Eberhart R.C., Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation CEC00 (Cat. No. 00TH8512)*; 2000, no. 1. P. 84–88. DOI: 10.1109/CEC.2000.870279

Информация об авторах

Чернышев Николай Николаевич, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматических систем, Институт искусственного интеллекта, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; chernyshev@mirea.ru.

Ниженец Татьяна Владимировна, ассистент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика; tanaparty@gmail.com.

Information about the authors

Nikolai N. Chernyshev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of Department of Automatic Systems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; chernyshev@mirea.ru.

Tatyana V. Nizhenets, Assistant of Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; tanaparty@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022

The article was submitted 11.04.2022