

УДК 517. 987

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА УПРАВЛЯЮЩИЕ КООРДИНАТЫ

Л.А. Широков, О.Л. Широкова

Для автоматизации проектирования автоматических систем регулирования при ограничениях на управляющие координаты, накладываемых исполнительными механизмами или регулирующими органами, сформирован алгоритм оптимизации параметров настройки регуляторов. Сопоставлено применение различных методов оптимизации при ограничениях и обосновано применение методов нелинейного программирования со штрафными функциями, что позволило свести задачу условного экстремума к последовательности задач на безусловный экстремум. Для ускорения сходимости процессов оптимизации применен градиентный метод нелинейного программирования с матрицей Гессе. В целях обеспечения беспоиcкового определения вектора-градиента использован анализ чувствительности. Эффективное функционирование алгоритма оптимизации проиллюстрировано примерами. Сходимость обеспечивается для различных начальных значений векторов параметров настройки. Результирующие процессы регулирования имеют высокие качественные показатели. Проведено исследование, вскрывшее зависимость показателей оптимальных процессов регулирования от различных уровней ограничений.

Ключевые слова: автоматические системы регулирования, переходный процесс регулирования, оптимизация процесса, автоматизация проектирования, параметрический синтез.

AUTOMATIC PARAMETRIC OPTIMIZATION OF REGULATORY SYSTEMS WITH CONSTRAINTS ON CONTROLLING COORDINATES

L.A. Shirokov, O.L Shirokova

The article presents an optimization algorithm for regulators adjustment for Computer Aided Design of automatic control systems with constraints on the controlling coordinates imposed, for example, by actuators or regulators. The applications of different methods of optimization under constraints have been compared; the use of non-linear programming with penalty functions has been justified. This has allowed reducing the problem of conditional extremum to a sequence of tasks with an unconditional extremum. A gradient method of nonlinear programming with the Hessian matrix has been applied to accelerate the convergence of optimization processes. A sensitivity analysis has been used in order to determine the searchless vector-gradient. The effective functioning of the optimization algorithm has been illustrated by examples. Convergence is provided for different initial values of the vectors settings. The resulting regulatory processes have high qualitative characteristics. The study, which revealed the dependence of the optimal regulatory processes on different levels of restrictions, has been carried out.

Keywords: automatic control systems, transient regulation, process optimization, CAD, parametric synthesis.

Математическая модель задачи оптимизации

При проектировании автоматических систем регулирования (АСР) одной из задач является расчет оптимальных параметров настройки регуляторов в условиях ограничений на управляющие и фазовые координаты [1]. Это могут быть ограничения по мощности управляющих сигналов, по скорости и ускорению управляющих воздействий. Ограничения могут определяться различными устройствами контуров регулирования, например, исполнительными механизмами, регулирующими органами в различных производственных объектах и системах. Проблема в том, что учет ограничений при параметрической оптимизации систем регулирования может приводить к получению настроек регуляторов, при которых исполнительные механизмы или регулирующие органы, выходя на предельно возможные режимы или положения, не в состоянии обеспечить требуемые рассчитанные значения управляющих воздействий. В результате возникает резкое падение качества регулирования, так как переходные процессы регулирования принимают колебательный незатухающий характер. Это приводит к отклонениям от заданных параметров технологических процессов и браку выходной продукции.

Рассматриваемые ограничения характерны при регулировании параметров процессов в ряде технологических аппаратов, в автоматических системах регулирования в станках с ЧПУ, манипуляторах, роботах и робототехнических комплексах. Вместе с тем, с течением времени виды ограничений и их значения могут изменяться. Это имеет место при перестройке технологических процессов в гибких автоматизированных производствах и, в частности, в результате использования САПР в рамках интегрированных АСУ.

Изложенное показывает важность и актуальность разработки алгоритмических и программных средств для обеспечения процессов параметрического проектирования, также перенастройки параметров регуляторов эксплуатируемых систем регулирования в условиях стационарных и нестационарных ограничений.

Целью данной работы является рассмотрение задачи разработки алгоритмического и программного обеспечения для автоматизации параметрической оптимизации локальных систем регулирования в условиях ограничений на управляющие и фазовые координаты.

АСР с ограничениями на вектор управляющего воздействия представлена в виде блок-схемы на рис. 1 общим оператором G_s . Здесь на объект с оператором G_p поступает управляющее воздействие – m -мерный вектор $\mathbf{u}(t)$, t – текущее время. Воздействие формируется блоком G_r , реализующим нелинейную операцию ограничения на управление – r -мерный вектор $\mathbf{y}(t)$, вырабатываемое регулятором с оператором G_c . На регулятор поступает ошибка – n -мерный вектор $\mathbf{e}(t)$, которая определяется по отрицательной обратной связи выходной координатой объекта регулирования – n -мерным вектором $\mathbf{x}(t)$ и входным сигналом на автоматическую систему регулирования G_s – n -мерным вектором $\mathbf{z}(t)$.

При нулевых начальных условиях рассматриваемая АСР описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t, \mathbf{z}) = G_p(p) \mathbf{u}(t - \tau, \mathbf{q}); \\ \mathbf{u}(t, \mathbf{q}) = G_l(\mathbf{y}(t, \mathbf{q})); \\ \mathbf{y}(t, \mathbf{q}) = G_c(p) \boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q}); \\ \boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q}) = \mathbf{z}(t) - \mathbf{x}(t, \mathbf{q}), \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) = (x_1(t) \dots x_n(t))'$ – n -мерный вектор наблюдаемых или выходных координат состояния системы; «штрих» – символ транспонирования; $\mathbf{y}(t) = (y_1(t) \dots y_r(t))'$ – r -мерный вектор управляющих воздействий; $\mathbf{u}(t) = (u_1(t) \dots u_r(t))'$ – r -мерный вектор ограниченных управляющих воздействий; $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)'$ – m -мерный вектор параметров настройки регулятора; $p = d/dt$ – алгебраизированный оператор дифференцирования; τ – время чистого запаздывания не минимально-фазового объекта регулирования; «'» – символ транспонирования.

В системе (1) векторные функции $\mathbf{x}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{y}$ и $\mathbf{u}$ зависят как от времени t , так и от вектора $\mathbf{q}$ параметров настройки регулятора, оператор которого G_r .

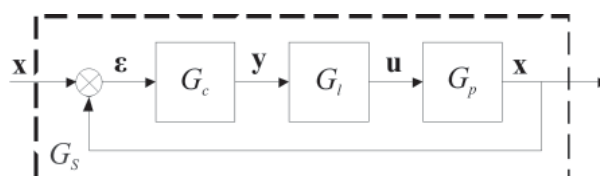


Рис. 1. Блок-схема автоматической системы регулирования с ограничениями

Оператор ограничения управления G_l реализует операцию

$$G_l(y(t)) = \begin{cases} y_l & \text{при } y(t) \leq y_l; \\ y(t) & \text{при } y_l < y(t) < y_h; \\ y_h & \text{при } y(t) \geq y_h; \end{cases} \quad (2)$$

$$y(t) \in [y_l; y_h],$$

где $y_l = (y_{l1}, \dots, y_{lr})'$; $y_h = (y_{h1}, \dots, y_{hr})'$ – соответственно r -мерные верхнее и нижнее ограничения.

Операторы объекта G_p и регулятора G_c описываются полиномами:

$$G_p(p) = \sum_{i=0}^M a_i p^i \left(\sum_{i=0}^N b_i p^i \right)^{-1} \exp(-p\tau), \quad M < N, \quad (3)$$

$$G_c(p) = \sum_{i=-l_1}^{l_2} q_{i+l_1+1} p^i; \quad m = l_1 + l_2 + 1, \quad (4)$$

где M и N – порядки полиномов в левой и правой частях уравнения соответственно; a_i и b_i – коэффициенты полиномов; m – размерность вектора q параметров настройки регулятора; l_1 – максимальный порядок слагаемых дифференциальный компонент регулятора; l_2 – максимальный порядок слагаемых интегральных компонент регулятора.

Качество работы системы будем оценивать функционалом

$$V = LF(x(t, q), y(t, q)), \quad (5)$$

где L – линейный оператор интегрального типа; F – нелинейная функция.

Задача параметрической оптимизации АСР заключается в определении вектора параметров настройки регулятора в АСР, минимизирующего функционал (5)

$$V_{\min} = \min_{q \in D_q} LF(x(t, q), y(t, q)), \quad (6)$$

где D_q – область определения вектора параметров q в АСР.

Построение алгоритма оптимизации АСР с ограничениями на вектор управляющего воздействия

При наличии ограничений в проектируемой АСР возникает задача оптимизации на условный экстремум. Классическое вариационное исчисление [2] в этом случае неприменимо, поскольку оно исключает наличие ограничений в виде неравенств, характерных в реальных системах. Принцип максимума Понтрягина [2] позволяет получить необходимые условия оптимальности, но не рассматривает вопрос о вычислительном алгоритме. Метод динами-

ческого программирования [2] обеспечивает получение необходимых и достаточных условий оптимальности, а также простую вычислительную процедуру для нахождения оптимальных управлений, но потребность в большом объеме памяти ЭВМ еще более усугубляется тем, что для одного технологического участка при проектировании приходится оптимизировать десятки АСР.

Для решения задач оптимального управления с ограничениями эффективны методы нелинейного программирования [2]. Их условно можно разделить на две группы. Первую составляют методы, основанные на локальной аппроксимации минимизируемого функционала и (или) ограничений линейной или квадратичной формы, вследствие чего исходная задача разбивается на последовательность простых задач на условный экстремум. Однако полное решение задачи требует значительных затрат времени. Другая группа методов, позволяющая задачу условного экстремума свести к последовательности задач на безусловный экстремум, основана на применении штрафных функций.

Введем для учета ограничения (2) функцию штрафа w_k [3]. В общем виде функцию штрафа w_k можно записать как функцию от координат, на которые наложены ограничения:

$$w_k = w_k(y(t)), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

где k – порядковый номер соответствующей задачи на безусловный экстремум.

Функция штрафа w_k удовлетворяет условиям:

$$\begin{cases} w_k(y(t)) \geq 0 & \text{при } \forall y(t) \text{ и } \forall k; \\ \lim_{k \rightarrow \infty} w_k(y(t)) = 0 & \text{при } y(t) \in [y_l; y_h]; \\ \lim_{k \rightarrow \infty} w_k(y(t)) = \infty & \text{при } y \notin [y_l; y_h]. \end{cases} \quad (8)$$

После выбора функции w_k исходная задача условного экстремума заменяется последовательностью задач безусловного экстремума, в которой качество работы системы будем оценивать функционалом

$$V^w = L(F(x(t), y(t)) + w_k(y)). \quad (9)$$

Для функционала (8) градиентный алгоритм параметрической оптимизации можно записать следующим образом:

$$q(n+1) = q(n) - \Gamma(n)H(n)\text{grad}_q V^w, \quad (10)$$

где $H(n)$ – матрица Гессе, вводимая для ускорения сходимости алгоритма [2]; $\Gamma(n)$ – диагональная матрица весовых коэффициентов; $\text{grad}_q V^w$ – вектор-градиент функционала V^w .

Для вычисления вектора-градиента возможно применение одного из двух методов – поискового или беспойского. Поисковые методы основываются лишь на информации о значениях критерия оптимизации V^w в различных точках. На их основе, используя конечно-разностную аппроксимацию производных, можно вычислять градиент или гессиан. Следовательно, эти методы работоспособны в условиях отсутствия аналитического описания, которое формируется в процессе оптимизации, но на это и требуются дополнительные существенные затраты [4].

При наличии достаточной априорной информации эффективны беспойские методы, которые условно можно разделить на градиентные и неградиентные [2]. Под градиентными беспойскими понимаются методы, в которых для определения оптимального значения критерия оптимизации используется его градиент в явном виде. К ним относятся метод Ньютона, методы переменной метрики.

В неградиентных беспойских методах настройка параметров организуется в зависимости от рассогласований между координатами состояния, их производными и параметрами оптимизируемой системы и модели. При этом алгоритм настройки формируется из условия устойчивости процесса настройки либо непосредственно на основе условий устойчивости, получаемых из прямого метода Ляпунова [2], или критерия абсолютной устойчивости Попова [2]. Достоинство этих методов в их сравнительной простоте, а в последнем случае – заведомой устойчивости. К недостаткам следует отнести необходимость получения в ряде случаев «чистых» производных, что в реальных условиях при помехах является некорректной задачей, а также многозначность решения задачи синтеза алгоритма [5]. Синтез неградиентных алгоритмов оптимизации весьма затруднителен в сложных системах регулирования, причем неполнота априорной информации об объекте может привести к неустойчивости алгоритма.

Учитывая изложенное, будем использовать для решения задачи параметрической оптимизации беспойский градиентный алгоритм. Представим вектор-градиент $\mathbf{grad}_q V^w$ в виде

$$\mathbf{grad}_q V^w = L(\mathbf{grad}_q F(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{l}_t) + \mathbf{grad}_q w_k(\mathbf{y}(t)), \quad (11)$$

где $\mathbf{grad}_q F$ и $\mathbf{grad}_q w_k$ – соответственно m -мерные вектор-градиенты функции F и функции w_k по вектору настраиваемых параметров $\mathbf{q}$.

Запишем для $\mathbf{grad}_q F$ и $\mathbf{grad}_q w_k$ соответствующие выражения:

$$\mathbf{grad}_q F(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t)) = \Xi'_x(t) \mathbf{grad}_x F(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t)); \quad (12)$$

$$\mathbf{grad}_q w_k(\mathbf{y}(t)) = \Xi'^y_y(t) \mathbf{grad}_y w_k(\mathbf{y}(t)); \quad (13)$$

$$\Xi_x(t) = \|\xi_{ij}^x(t)\|_{(n \times n)};$$

$$\Xi_y(t) = \|\xi_{ij}^y(t)\|_{(r \times m)};$$

$$\mathbf{grad}_x F = (\partial F / \partial x_1, \dots, \partial F / \partial x_n)';$$

$$\mathbf{grad}_y w_k(\mathbf{y}) = (\partial w_k / \partial y_1, \dots, \partial w_k / \partial y_r)';$$

где $\Xi_x(t)$ и $\Xi_y(t)$ – $(n \times n)$ - и $(r \times m)$ -мерные матрицы функций чувствительности $\xi_{ij}^x(t) = \partial x_i(t) / \partial q_j$ и $\xi_{ij}^y(t) = \partial y_i(t) / \partial q_j$ соответственно; $\mathbf{grad}_x F$ и $\mathbf{grad}_y w_k(\mathbf{y})$ – n - и r -мерные вектор-столбцы соответственно.

Из выражений (12) и (13) следует, что вычисление $\mathbf{grad}_x F$ и $\mathbf{grad}_y w_k(\mathbf{y})$ сводится к определению матриц функций чувствительности $\Xi_x(t)$ и $\Xi_y(t)$. С этой целью будем использовать методологию, изложенную в [6].

Определяя изложенным выше способом вектор-градиент показателя качества (9), можно организовать движение в пространстве настраиваемых параметров $\mathbf{q}$ так, чтобы минимизировать заданный функционал качества (5) при соблюдении ограничений (2). Следовательно, применение функции штрафа дает возможность разработать алгоритм оптимизации с использованием функций чувствительности систем регулирования в условиях ограничений на управляющее воздействие. Блок-схема модели соответствующей системы оптимизации приведена на рис. 2.

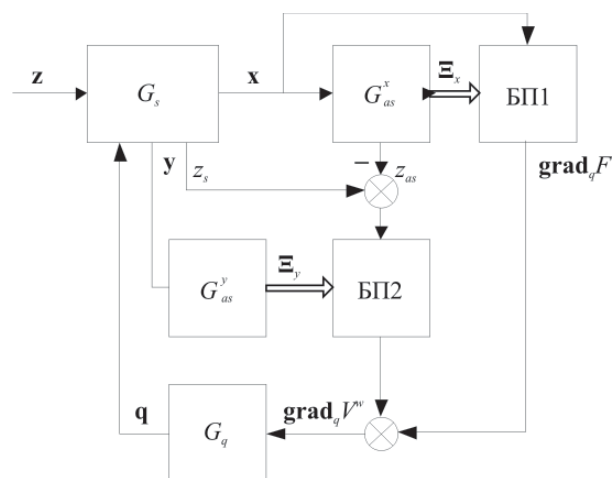


Рис. 2. Блок-схема системы автоматической параметрической оптимизации АСП

Здесь обозначены одинарными стрелками векторные связи, двойными – матричные связи, G_s – блок АСР, G_{as}^x и G_{as}^y – блоки вычисления матриц функций чувствительности соответственно для $x(t)$ и $y(t)$, G_q – блок вычисления вектора параметров настройки регулятора, БП1 и БП2 – блоки перемножения.

Пример реализации алгоритма автоматической параметрической оптимизации АСР с ограничениями

Проведем по алгоритму (10) оптимизацию системы с использованием двух видов штрафных функций [7]. Первую функцию запишем в виде

$$w_k^1(y(t)) = \begin{cases} R_k(y(t) - y_h) & \text{при } y(t) > y_h; \\ 0 & \text{при } y(t) \in [0; y_h]; \\ R_k |y(t)| & \text{при } y(t) < 0, \quad k=1,2,\dots \end{cases} \quad (14)$$

$$R_k > 0 \text{ и } \lim_{k \rightarrow \infty} R_k = \infty.$$

Для второй функции штрафа соответственно запишем

$$w_k^2(y(t)) = \begin{cases} (1 + y(t) - y_h)^k & \text{при } y(t) > y_h; \\ 0 & \text{при } y(t) \in [0; y_h]; \\ (1 + \text{mod}(y(t)))^k & \text{при } y(t) < 0, \quad k=1,2,\dots \end{cases} \quad (15)$$

Функции штрафа (14) и (15) удовлетворяют условиям (8).

АСР используется для неминимально-фазового объекта типа (3) с чистым запаздыванием, который описывается оператором

$$G_p(s) = K_p((1 + sT_1)(1 + sT_2))^{-1} \exp(-s\tau), \quad (16)$$

где K_p – коэффициент передачи объекта регулирования; s – оператор преобразования Лапласа [1]; τ – время чистого запаздывания; T_1 и T_2 – постоянные времени апериодических звеньев объекта регулирования.

Будем исследовать автоматическую параметрическую оптимизацию АСР с ограничениями для объекта (16) при $T_1 = T_2 = 15$ с и $\tau = 6$ с. АСР включает регулятор, описываемый оператором (4) при $l_1 = 1$ и $l_2 = 0$, т.е. с пропорционально-интегральным законом регулирования [1]. При использовании преобразования Лапласа его передаточная функция может быть записана в виде:

$$G_c(s) = q_1 s^{-1} + q_2. \quad (17)$$

Оператор (17) при $l_1 = l_2 = 1$ будет реализовывать весьма распространенный пропорционально-интегральный закон регулирования.

Для сравнения результатов будем рассматривать три варианта постановки задачи оптимизации:

1) без ограничений на управляющее воздействие;

2) при наличии ограничений на управляющее воздействие, но которые, однако, не будут учитываться принятым алгоритмом оптимизации;

3) при наличии ограничений на управляющее воздействие, которые в полной мере учитываются алгоритмом оптимизации.

Для первых двух вариантов постановки задачи оптимизации будем применять интегральный квадратичный критерий (5) с использованием идеальной эталонной модели [8] при соответствующей весовой функции в виде

$$V = \frac{1}{2t_f} \int_0^{t_f} x^2(t, \mathbf{q}) \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 dt, \quad (18)$$

где t_f – оценочное время переходного процесса регулирования.

Тогда алгоритм градиентной оптимизации Гаусса-Ньютона можно записать в виде

$$\mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) - \mathbf{\Gamma}(n) \frac{\Theta_1}{\Theta_2};$$

$$\Theta_1 = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} x(t) \xi'(t) \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 dt; \quad (19)$$

$$\Theta_2 = \left(\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \text{diag} \xi'(t) \xi(t) \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 dt \right)^{-1}.$$

Для третьего варианта при оптимизации АСР с ограничениями был применен алгоритм (10) со штрафными функциями (14) и (15). Для рассматриваемой системы алгоритм (10) имеет следующий вид:

$$\mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) + \mathbf{\Gamma}(n) \mathbf{H}(n) \Theta_3; \quad (20)$$

$$\Theta_3 = \frac{1}{t} \left(\int_0^{t_f} \xi'_x(t) Sx(t) \frac{t}{t_f} dt + \int_0^{t_f} \xi'_y(t) \frac{\partial w_{ki}}{\partial y} dt \right), \quad i=1,2,$$

где $Sx = \text{sign } x$.

В алгоритме (20) требуется вычисление функций чувствительности:

$$\xi_x(t) = (\partial x / \partial q_1, \partial x / \partial q_2)'; \quad (21)$$

$$\xi_y(t) = (\partial y / \partial q_1, \partial y / \partial q_2)'. \quad (22)$$

Методика получения матрицы функций чувствительности $\Xi_x(t)$ аналогична рассмотренной в [6]. Анализируя структуру АСР, можно заключить, что анализаторы чувствительности для координат $x(t)$ и $y(t)$ тождественны, и для одновременного получения всех функций чувствительности следует использовать два

идентичных анализатора чувствительности соответственно с входами – функциями $x(t)$ и $y(t)$. Вместе с тем топологический анализ АСР позволяет установить возможность получения требуемых функций чувствительности на одной модели. Это показано на рис. 3 для случая пропорционально-интегрального закона регулирования.

Результаты оптимизации для всех трех вариантов постановки задачи оптимизации показаны на рис. 4. В первом варианте при оптимизации по алгоритму (19) сходимость процесса оптимизации иллюстрируют кривые 1а и 1б, выходящие соответственно из точек А и В. График оптимального процесса регулирования $x_1^*(t)$, изображенный на рис. 4, получен при оптимальном векторе параметров настройки регулятора q^* , характеризуется удовлетворительными показателями качества и имеет степень затухания 0,9.

Во втором варианте, несмотря на наличие ограничений на управляющее воздействие, оптимизация проводилась также по алгоритму (19). Сходимость процесса оптимизации АСР в этом случае иллюстрируют кривые 2а и 2б.

Результирующий процесс регулирования $x_2^*(t)$, полученный при векторе параметров настройки q^{2*} , характеризуется, как и следовало

ожидать, неудовлетворительными показателями качества. Его степень затухания равна нулю, т.е. процесс регулирования имеет колебательный незатухающий характер, что является недопустимым для рассматриваемой задачи параметрического регулирования АСР с пропорционально-интегральным законом регулирования.

Для третьего варианта постановки задачи параметрической оптимизации АСР был применен алгоритм (20) со штрафными функциями (14) и (15). Оптимизация проводилась последовательно при различных значениях R_k в функции штрафа (14). На рисунке 4 показаны траектории движения изображающей точки в процессе настройки при $R_k = 0,1; 0,5; 1,0; 7,0$ от начальной точки А до соответствующих точек оптимумов векторов, обозначенных $q^{3*}, q^{4*}, q^{5*}, q^{6*}$, а полученные соответствующие оптимальные переходные процессы регулирования $x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*$ приведены в правом верхнем углу рисунка. Результаты показывают, что при значениях $R_k \geq 1$ точка оптимума практически не смещается (точки q^{5*} и q^{6*} фактически совпадают), поэтому удобно принять $R_k = 1$.

При оптимизации системы из начальной точки А с функцией штрафа (15) изменение k от 1 до 7 практически не вызвало смещения оптимальной точки, которая

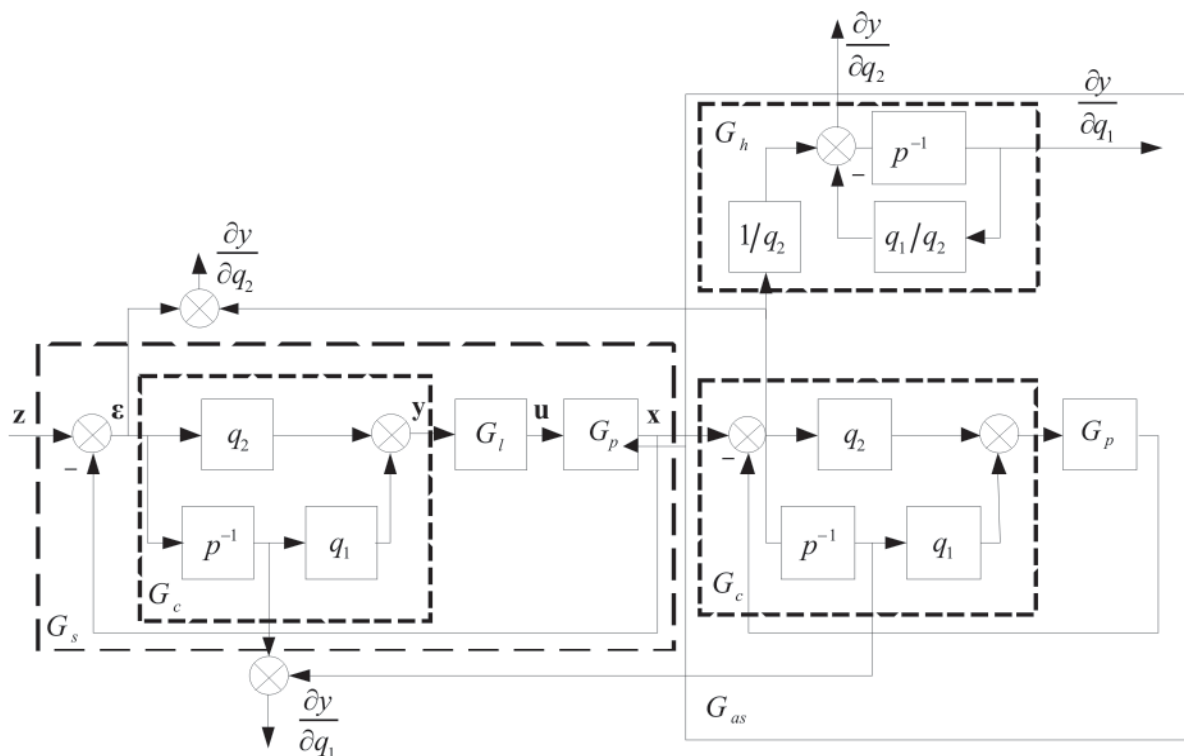


Рис. 3. Блок-схема модели одновременного получения матриц функций чувствительности для беспоискового алгоритма оптимизации

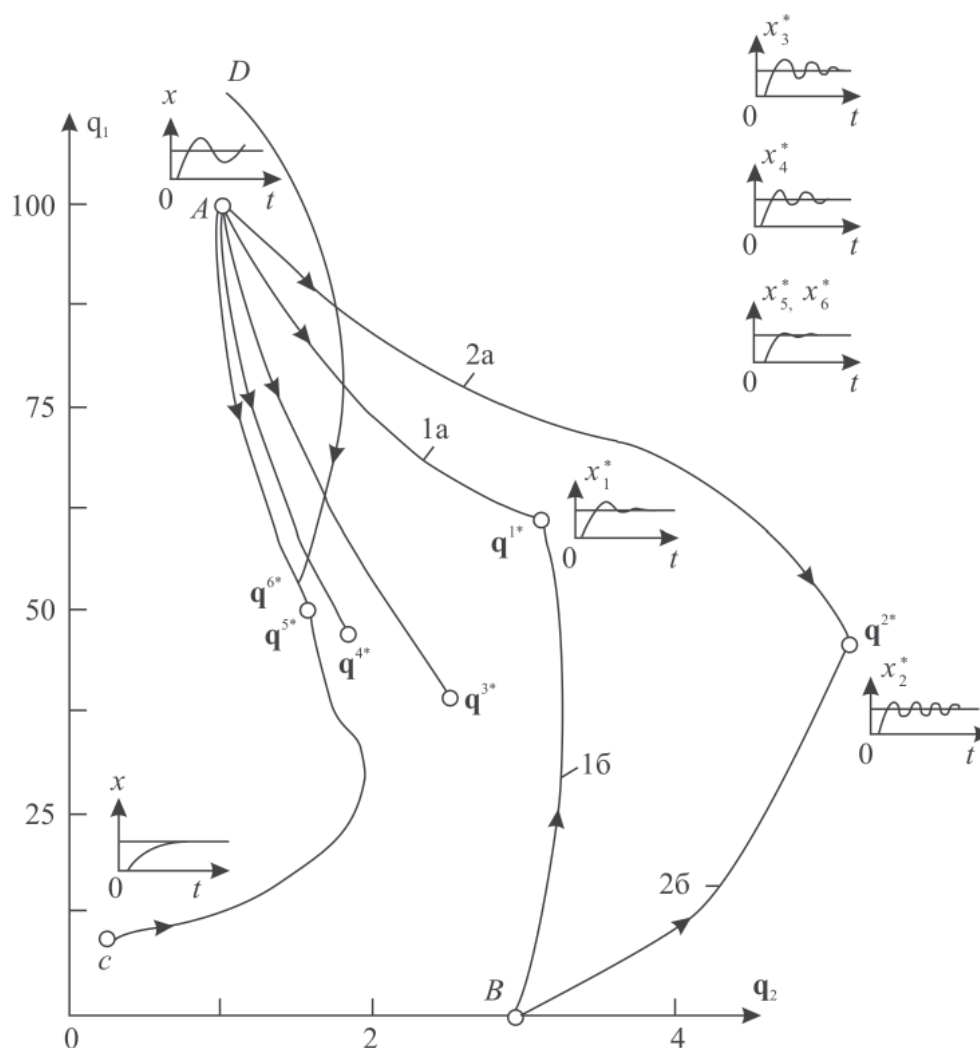


Рис. 4. Плоскость параметров процессов оптимальной настройки пропорционально-интегрального регулятора: x_1^* – оптимальный процесс регулирования при оптимальном q^{1*} , полученном для АСР без ограничений при оптимизации от различных начальных неоптимальных значений вектора q^1 соответственно из точки A по траектории настройки 1а и из точки B по траектории 1б; x_2^* – процесс регулирования при значении q^{2*} , полученном для АСР с ограничениями, но при оптимизации без учета соответствия соответственно из точки A по траектории настройки 2а и из точки B по траектории 2б; $x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*$ – оптимальные процессы регулирования при оптимизации АСР с учетом ограничений при последовательности значений R_k 0,1; 0,5; 1,0; 7,0 от точки D до соответствующих точек оптимальных векторов $q^{3*}, q^{4*}, q^{5*}, q^{6*}$

совпадает с точкой оптимума, полученной при настройке с функцией штрафа (14) при $k = 1$. В рассматриваемом случае обе функции штрафа эквивалентны в смысле сходимости к оптимальной точке, однако в первом случае аппаратная реализация значительно проще, что и предопределило выбор функции штрафа (14).

По алгоритму (20) с функцией штрафа (14) была проведена настройка АСР для пяти отношений $\tau/T \in [0,1;1,0]$, равномерно расположенных по логарифмической шкале. Анализ полученных переходных процессов регулирования

показал, что они имеют степень затухания в диапазоне 0,85–0,9. Следовательно, для рассматриваемого класса АСР объектов, параметры которых находятся в диапазоне $\tau/T \in [0,1;1,0]$ можно принять коэффициент штрафа $R_k = 1$. Сходимость процессов оптимизации в плоскости параметров настройки регулятора (q_1, q_2), при $R_k = 1$ характеризуют траектории движения изображающей точки из начальных состояний A, B, C, D, E и F (см. рис. 4). Здесь же изображены соответствующие переходные процессы в начальных и оптимальных

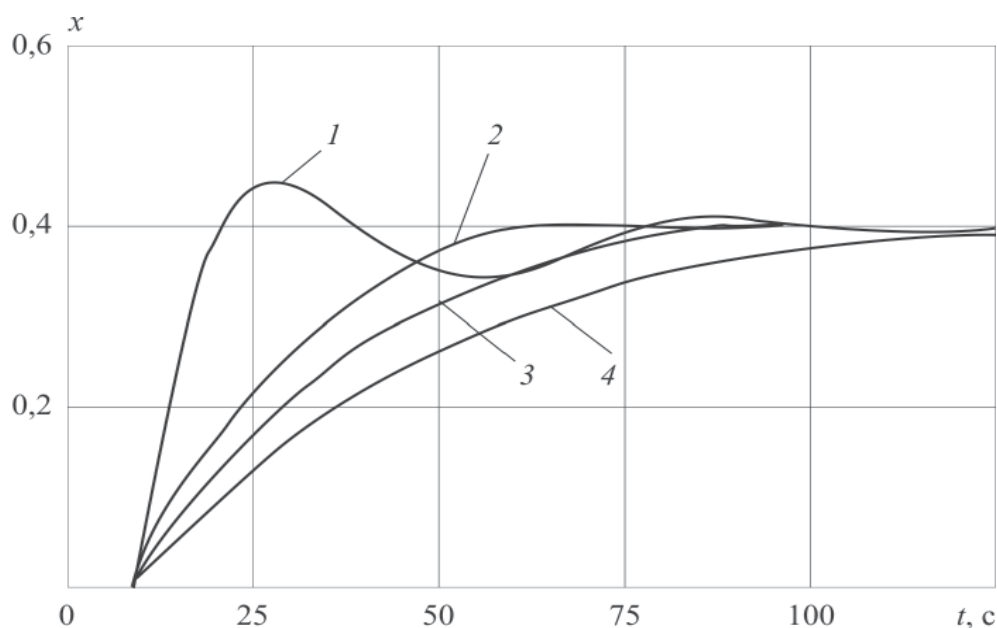


Рис. 5. Исследование влияния уровня ограничений на оптимальные переходные процессы регулирования в АСР:

1 – оптимальный процесс при $y_h = 2,0$; 2 – оптимальный процесс при $y_h = 1,0$;
3 – оптимальный процесс при $y_h = 0,67$; 4 – оптимальный процесс при $y_h = 0,57$

точках. Из рисунка видно, что сходимость обеспечивается для широкого диапазона начальных значений параметров q_1 и q_2 .

Представляет весьма большой интерес исследование влияния уровня ограничения на результирующие оптимальные переходные процессы регулирования. Разработанное алгоритмическое обеспечение автоматической параметрической оптимизации АСР позволяет провести такое исследование. На рисунке 5 для различных верхних уровней ограничения ($y_h = 2,0; 1,0; 0,67; 0,57$) при использовании показателя качества (9) приведены полученные оптимальные переходные процессы регулирования 1–4. В случае $y_h = 2$ функция штрафа не оказывает влияния на результат оптимизации (переходный процесс регулирования 1). Это является следствием того, что при оптимальной настройке управляющее воздействие естественным образом постоянно находится в зоне ограничений. При $y_h = 1$ диапазон допустимых значений управления сужается, и при прежних настройках управляющее воздействие выходит за границы ограничений. В этих условиях в алгоритме оптимизации уже участвуют функции штрафа. Сужение области допустимых

управлений приводит к изменению вектора параметров настройки регулятора из условия выполнения введенных ограничений. В результате быстродействие процесса регулирования уменьшается (переходный процесс регулирования 2).

Дальнейшее снижение верхнего уровня ограничения еще более снижает область допустимых управляющих воздействий и вызывает соответствующее изменение вектора параметров настройки регулятора. В результате этого происходит дальнейшее снижение быстродействия переходных процессов в системе регулирования (переходные процессы регулирования 3 и 4). Так, например, при $y_h = 0,57$ получаемый оптимальный переходный процесс регулирования 4 носит уже апериодический характер.

Заключение

Построенный алгоритм автоматической параметрической оптимизации, использующий штрафные функции, позволяет оптимизировать АСР с ограничениями на управляющее воздействие. При этом решение задачи условного экстремума заменяется на решение последовательности задач безусловного экстремума.

Применение анализа чувствительности и матриц функций чувствительности позволило обеспечить бесперебойность процессов параметрической оптимизации АСР, что существенно ускорило получение искомым результатов оптимизации. Для систем слежения и стабилизации необходимые функции чувствительности можно получить одновременно на одном анализаторе чувствительности.

Список литературы

1. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 742 с.
3. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. – 384 с.
4. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. – 316 с.
5. Солодовников В.В., Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
6. Широков Л.А. Синтез компактов чувствительности для автоматизации параметрического проектирования линейных систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 22–29.
7. Широков Л.А. Автоматическая система оптимизации. А.С. 485412 (СССР), Б.И., 1975, № 33. 1
8. Широков Л.А. Синтез эталонных моделей в алгоритмах оптимизации с использованием функций чувствительности // Точность радиоэлектронной аппаратуры. 1971. С. 17–27.

Материал поступил в редакцию 01.02.15

ШИРОКОВ Лев Алексеевич

E-mail: eduarlev@gmail.com
Тел.: 8 (962) 964-36-48

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматики и управления в технических системах» МГИУ. Академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, изобретатель СССР. Сфера научных интересов: теория систем и системный анализ, оптимальное управление, САПР, информационные технологии, интегрированные АСУ. Автор трех монографий и более 150 научных трудов.

ШИРОКОВА Ольга Львовна

E-mail: ol.shirokova@gmail.com
Тел.: +7 (903) 135-47-61

Кандидат экономических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики НИУ МГСУ. Сфера научных интересов: информационные технологии и системы, методы оптимизации, математические методы в экономике, автоматические системы контроля и управления. Автор 30 научных трудов.