

Параметрическая оптимизация и настройка цифровых регуляторов состояния

А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Аполонский

Ивановский государственный энергетический университет, anis@eims.ispu.ru

Аннотация — Рассматриваются проблемы параметрической оптимизации и автоматической настройки цифровых регуляторов состояния электромеханических систем. Предлагается метод автоматической настройки регуляторов состояния, основанный на снижении размерности задачи оптимизации, а также применении эталонной модели системы.

Ключевые слова — электромеханическая система, регулятор состояния, полиномиальный регулятор, эталонная модель, параметрическая оптимизация, настройка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений повышения качества управления сложными системами на сегодняшний день является применение регуляторов состояний (РС) различных типов, эффективность которых связана с увеличением числа степеней свободы. К таким устройствам относятся безынерционные РС, динамические полиномиальные регуляторы (ПР) и регуляторы с наблюдателями состояний.

Следует отметить, что высокие потенциальные возможности РС могут быть реализованы только при использовании средств параметрической оптимизации на стадии проектирования и автоматической настройки в процессе эксплуатации. Актуальность настройки системы с РС обусловлена главным образом погрешностями идентификации объекта управления.

Процедура проектирования системы управления обычно состоит из двух этапов – формирование структуры и расчет параметров регулятора. Структурный синтез трудно поддается формализации и выполняется, как правило, эвристическими методами. Параметрический синтез в рамках выбранной структуры РС осуществляется конкретными аналитическими или численными методами, реализуемыми на ЭВМ.

Значения параметров РС, полученные методом модального управления [1]-[2], как правило, не являются оптимальными, поскольку рассчитываются с использованием упрощенной модели объекта без учета параметрических возмущений, нелинейных факторов, ограничений координат.

Более полный учет комплекса требований, предъявляемых к системе управления, возможен при исполь-

зовании численных методов параметрической оптимизации, реализуемых на ЭВМ. Важную роль при этом играет выбор критерия оптимальности, который определяет не только показатели качества синтезированной системы, но и сходимость рекуррентных алгоритмов поиска экстремума.

Автоматическая настройка РС на объекте управления проводится в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к сходимости и быстрдействию применяемых процедур. Вместе с тем, численные методы параметрической оптимизации, лежащие в основе ряда известных алгоритмов настройки [3]-[5], требуют значительного количества итераций и не гарантируют успешного завершения процесса поиска.

Применение искусственной нейронной сети позволяет снизить длительность настройки системы с РС до минимального значения, равного длительности переходного процесса в системе. Однако настройка системы с использованием такой сети возможна только в пределах обучающей выборки, то есть в ограниченном диапазоне параметров объекта управления.

Предлагаемый подход к разработке систем управления с РС состоит из следующих основных этапов:

- выбор структуры системы и предварительный расчет параметров РС методом модального управления;
- параметрическая оптимизация системы с использованием прямых критериев качества управления и формирование эталонной модели;
- настройка РС на объекте управления в реальном масштабе времени по эталонной модели.

II. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Базовые варианты систем управления с безынерционными РС и с динамическими ПР представлены, соответственно, на Рис. 1,а и б [1]-[2]. Здесь приняты следующие обозначения: s – комплексная переменная Лапласа; u_z, u – входной (задающий) и выходной сигналы; \mathbf{x} – вектор координат состояния ОУ; \mathbf{A}, \mathbf{B} и \mathbf{C} – матрицы состояния, входа (управления) и выхода объекта с соответствующими размерностями $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$; \mathbf{K} – матрица коэффициентов РС.

Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$H_o(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (1)$$

где $n = \deg A(s)$ и $m = \deg B(s)$, причем $m \leq n$.

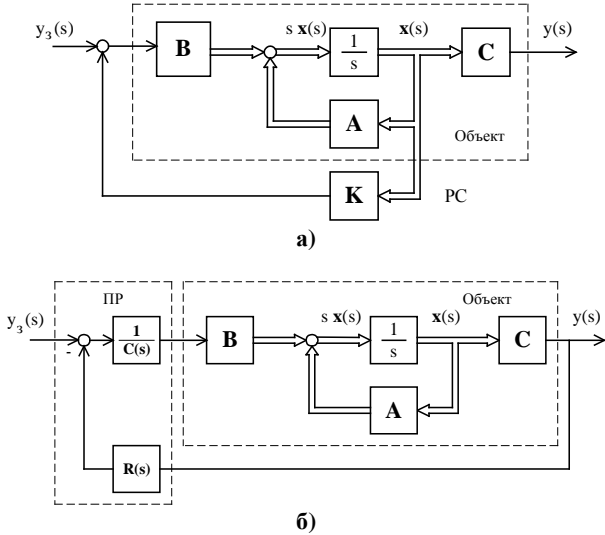


Рис. 1. Структурные схемы систем управления с безынерционным РС (а) и с динамическим ПР(б)

Необходимое качество переходных процессов в системе управления с РС в рамках метода модального управления обеспечивается заданием желаемого характеристического полинома:

$$D(s) = s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_1 s + d_0.$$

Вычисление параметров РС, как правило, выполняется по формуле

$$\mathbf{K} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{U}^{-1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{K} = [a_0 - d_0, a_1 - d_1, \dots, a_{n-1} - d_{n-1}]$ – матрица коэффициентов РС для объекта, представленного в канонической форме управляемости (КФУ), при $p = n$; $\mathbf{U} = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$, $\mathbf{U} = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$ – матрицы управляемости объекта, соответственно, в КФУ и в реальных координатах.

Формирование структуры ПР заключается в определении степеней полиномов $R(s)$ и $C(s)$ его аналогового прототипа (Рис. 1,б):

$$R(s) = r_{n-1+\gamma} s^{n-1+\gamma} + \dots + r_1 s + r_0;$$

$$C(s) = c_{m+l} s^{m+l} + \dots + c_1 s + c_0,$$

где γ – степень астатизма системы; l – степень, определяющая фильтрующие свойства регулятора.

Определение параметров ПР осуществляется путем составления и решения уравнения синтеза [1,2] в виде:

$$A(s) C(s) + B(s) R(s) = D(s). \quad (3)$$

Предлагаемые методы оптимизации и настройки будем исследовать на примере линейной модели

(Рис. 2) типичной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС), где U – управляющее воздействие; M , M_y – электромагнитный момент и момент упругости; Ω_1 , Ω_2 – угловые скорости 1-й и 2-й масс. Основные параметры ЭМС: $C = 0,16 \text{ Вб}$ – конструктивный параметр двигателя; $T_{\gamma} = 0,05 \text{ с}$, $R_{\gamma} = 3,15 \text{ Ом}$ – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $J_1 = 0,015 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, – моменты инерции 1-й и 2-й масс; $C_{12} = 0,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – коэффициент жесткости; $K_{\text{д}} = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – коэффициент трения; $K_{\text{СП}} = 7$, $T_{\text{СП}} = 0,01 \text{ с}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя [4].

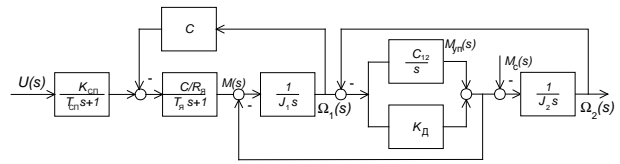


Рис. 2. Структура линейной модели двухмассовой электромеханической системы

Пренебрегая влиянием малой постоянной времени $K_{\text{СП}}$ для улучшения робастных свойств системы [3], можно записать матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} в координатах $x_1 = M$, $x_2 = \Omega_1$, $x_3 = M_y$, $x_4 = \Omega_2$:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -20 & -0,163 & 0 & 0 \\ 66,67 & 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0,65 & 0 & -0,65 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1,138 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Соответствующая данному векторно-матричному описанию передаточная функция от входа к выходу объекта управления имеет вид:

$$H(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (4)$$

где числовые значения параметров – $a_0 = 139$, $a_1 = 1126$, $a_2 = 67$, $a_3 = 20$, $b_0 = 6153$.

Процедура формирования желаемого характеристического полинома для распределения Бесселя 4-го порядка [1,2]

$$D(s) = s^4 + 3,13\Omega_0 s^3 + 4,39\Omega_0^2 s^2 + 3,2\Omega_0^3 s + \Omega_0^4$$

позволяет определить оптимальное значение среднегеометрического корня $\Omega_0 = 8,56 \text{ рад/с}$.

Расчет параметров безынерционного РС4 при $n=4$ позволяет получить следующие исходные значения элементов матрицы: $\mathbf{K} = [-1,204 \ -3,623 \ -148,74 \ -95,465]$.

Расчет параметров ПР 3/0 ($\deg R(s)=3, \deg C(s)=0$) путем решения уравнения синтеза (3) дает следующие исходные полиномы ПФ регулятора:

$$R(s) = r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0, \quad C(s) = c_0,$$

где $r_3 = 0,026, r_2 = 0,356, r_1 = 0,776, r_0 = 7,145, c_0 = 1$.

Реализация цифрового ПР осуществляется путем замены производных конечными разностями $\nabla^n(z)$, шаг квантования времени T_o в соответствии с требованиями теоремы В.А. Котельникова принят равным 0,01 с.

II. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С РС

Как показывают исследования [3], при оптимизации линейных систем управления с РС наиболее эффективно применение обобщенного нормированного критерия, основанного на прямых показателях качества управления:

$$\bar{q}_m^2 = 1 - \left(\prod_{i=1}^2 q_i \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где q_1, q_2 – показатели быстродействия и точности.

Нормирование показателей качества осуществляется с использованием функции предпочтительности Харрингтона $\bar{q}_i = \exp(-\exp(-z_i))$, где $z_i = b_{oi} + b_{li} q_i$; $b_{oi} = z_i^{\text{хор}} - b_{li} q_i^{\text{хор}}$; $b_{li} = (z_i^{\text{хор}} - z_i^{\text{пл}}) / (q_i^{\text{хор}} - q_i^{\text{пл}})$; z_i, \bar{q}_i – кодированное и нормированное значения критерия; $z_i^{\text{хор}}, q_i^{\text{хор}}$ и $z_i^{\text{пл}}, q_i^{\text{пл}}$ – значения, соответствующие хорошему и плохому качеству системы.

В качестве показателя быстродействия q_1 здесь принимается время нарастания t_n выходной координаты, а в качестве показателя точности q_2 – средний модуль относительной ошибки за время $t_n < t < t_n$

$$\sigma_y = \frac{1}{N - T} \sum_{j=T}^N \left| \frac{y_j - y_3}{y_3} \right| \cdot 100\%,$$

где $T = t_n / T_o$ – относительное время нарастания, $N = t_n / T_o$ и t_n – относительное и абсолютное время переходного процесса, T_o – шаг квантования времени.

Разделение переходной характеристики на два участка и применение прямых показателей качества позволяют обеспечить наглядный компромисс между быстродействием и точностью системы с РС в условиях влияния неучтенных факторов в виде малых постоянных времени [3].

Однако более детальные исследования показывают, что анализ только переходной характеристики на выходе системы является неполным, так как не учитывает других существенных показателей качества –

робастности, энергетических затрат на управление и других.

В результате при использовании критерия (5) задача оптимизации оказывается плохо обусловленной, как показано на Рис. За для двухмассовой ЭМС при настройке параметров РС4. Значительные изменения параметров РС в области оптимума (на дне «оврага») мало влияют на характер переходного процесса по выходной координате системы. Однако глубина отрицательной обратной связи при этом существенно меняется, что вызывает вариации таких свойств системы, как робастность, помехоустойчивость, энергетические затраты на управление объектом.

В связи с этим предлагается расширить критерий вида (5) введением в него показателей робастности q_3 и энергетических затрат на управление q_4 , нормированных по шкале Харрингтона:

$$\bar{q}_m^4 = 1 - \left(\prod_{i=1}^4 q_i \right)^{1/4}. \quad (6)$$

Показателем робастности q_3 служит средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений за время переходного процесса

$$\sigma_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{y_j - y_j^*}{y_j} \right| \cdot 100\%,$$

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

В качестве показателя энергетических затрат на управление q_4 применительно к ЭМС целесообразно принять пиковое значение тока двигателя $I_{Я \max}$, которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части системы.

Применение расширенного критерия (6) позволяет обеспечить более полный компромисс между основными техническими показателями ЭМС – быстродействием, точностью, робастностью, энергетическими затратами на управление.

Проведем параметрическую оптимизацию безынерционного РС двухмассовой ЭМС (Рис.2), ориентируясь на требования быстродействия порядка 0,5 с, минимального перерегулирования по выходной координате, низкой чувствительности к вариациям параметров механической части при максимальном значении тока силовой цепи $I_{Я \max} = 30 A$.

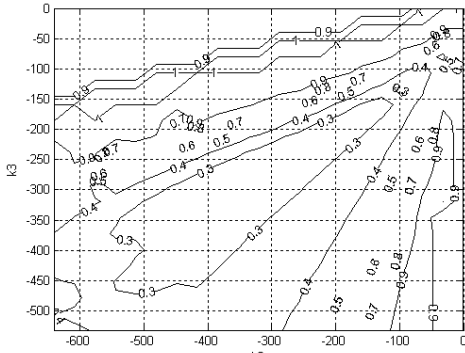
Уровни «хорошо»-«плохо» для каждого показателя качества определялись по соответствующим проекциям границ области Парето в системе координат (q_1, q_2, q_3, q_4) [3]. Полученные таким образом значения оценок $q_i^{\text{пл}}, q_i^{\text{хор}}$ приведены в табл.1.

Таблица 1

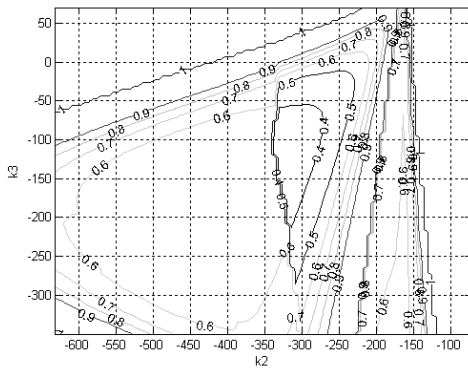
Уровни показателей качества системы

Показатель	i	$q_i^{пл}$	$q_i^{хор}$
t_n, c	1	0,7	0,25
$\sigma_y, \%$	2	12,0	0,5
$\sigma_R, \%$	3	8,5	0,5
$I_{Я max}, A$	4	45	10

Для проведения исследования была разработана программа (сценарий вычислительного эксперимента) на языке комплекса MatLab 7.1 и составлена модель двухмассовой ЭМС с РС в среде Simulink. Программа обеспечивает расчет значений критериев оптимальности (5) и (6) при различных сочетаниях параметров регулятора.



а)



б)

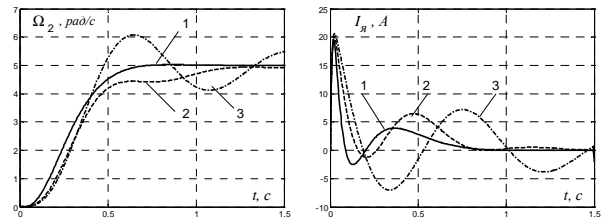
Рис. 3. Поверхности отклика критериев \bar{q}_m^2 (а) и \bar{q}_m^4 (б) для двухмассовой ЭМС с безынерционным РС4

На Рис. 3,а и б для сравнения приведены поверхности отклика соответствующих критериев (5) и (6) для двухмассовой ЭМС с безынерционным РС4. Они наглядно показывают, что преимущество комплексного критерия (6) является наличие четко выраженного минимума. Это снимает проблему обусловленности задачи оптимизации и позволяет применять рекуррентные алгоритмы поиска экстремума.

Поверхности отклика критериев (5) и (6) для двухмассовой ЭМС с динамическим ПРЗ/0 имеют вид, аналогичный приведенным на Рис. 3.

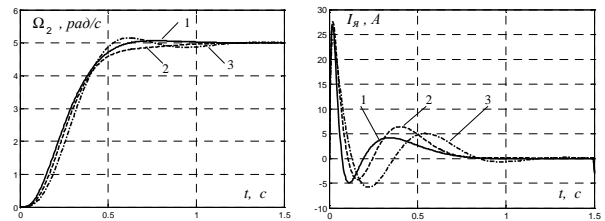
аналогичный приведенным на Рис. 3. Применение комплексного критерия и в этом случае обеспечивает благоприятную форму поверхности отклика четко выраженным минимумом.

На Рис. 4,а и б приведены переходные характеристики ЭМС при базовой настройке РС $K = [-1,204 -3,623 -148,741 -95,465]$, при этом графики 1 соответствуют расчетным параметрам объекта управления, графики 2 – увеличению момента инерции ($J_2 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$), а графики 3 – снижению коэффициента жесткости ($C_{12} = 0,25 \text{ Н/м рад}$) механической части.



а)

б)



в)

г)

Рис. 4. Переходные характеристики ЭМС при базовых (а, б) и оптимальных (в, г) параметрах РС4

Характеристики системы с оптимальными значениями параметров РС $K = [-1,402 -2,572 -231,995 -74,765]$, обеспечивающие величину критерия $\bar{q}_m^4 = 0,28$, приведены на Рис. 4, в и г, где графики 1 соответствуют расчетным параметрам объекта, а графики 2, 3 – указанным выше вариациям параметров J_2, C_{12} механической части.

Приведенные результаты моделирования иллюстрируют достижение искомого компромисса между основными показателями качества системы управления, обусловленного заданными уровнями их оценок, принятыми проектировщиком при нормировании.

Исследование эффективности рекуррентных алгоритмов оптимизации проводилось на примере модели двухмассовой ЭМС с безынерционным РС4. Для исследования были выбраны квазиньютоновский алгоритм ДФП, метод деформируемого симплекса, а также генетический алгоритм из состава программного комплекса MatLab 7.1 [3].

Применение метода ДФП для настройки системы с РС позволяет достичь оптимума при относительно небольшом количестве итераций (30-90). Однако траектория движения, число итераций и результаты оп-

тимизации существенно зависят от начальных условий.

В случае использования симплекс-методов отмеченные особенности параметрической оптимизации системы с РС в целом сохраняются. Симплекс-методы позволяют расширить область сходимости алгоритма настройки, однако это достигается за счет увеличения количества итераций (90-200 шагов).

При использовании генетических алгоритмов минимальное значение критерия $\bar{q}_m^4 = 0,29$ достигается за 20-25 поколений, каждое из которых состоит из 20 особей, что в совокупности требует проведения 400-500 экспериментов.

Характерной особенностью критериев оптимальности, нормируемых по шкале Харрингтона, является наличие в области оптимума участка с мало изменяющимися значениями функционала \bar{q}_m^4 (так называемого «плато оптимальности»).

В данном случае для решения задач оптимизации систем управления с РС целесообразно использовать генетические алгоритмы, не связанные с вычислением градиентов. Значительное (400-500) количество итерации при этом вполне допустимо, так как на стадии проектирования настройка проводится на ЭВМ, с использованием математической модели объекта.

III. АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА РС НА ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ

Применение рассмотренных выше методов параметрической оптимизации для решения задач автоматической настройки в реальном масштабе времени осложняется рядом обстоятельств:

- относительно большим числом опытов с реальным объектом управления в процессе настройки;
- существенным влиянием начальных условий на число итераций и результаты настройки;
- появлением локальных экстремумов целевой функции из-за влияния нелинейностей реального объекта управления.

С целью преодоления указанных недостатков предлагается использовать в качестве критерия настройки эталонную модель системы управления с передаточной функцией вида:

$$H_{\text{Э}}(s) = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_1 s + d_0}. \quad (7)$$

Характеристический полином эталонной модели $D(s)$ формируется на стадии проектирования системы методами параметрической оптимизации.

В процессе настройки при таком подходе следует минимизировать меру отклонения переходной характеристики системы с РС от эталонной модели:

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_j - y_j^{\text{Э}}|, \quad (8)$$

где $y_j, y_j^{\text{Э}}$ – значения выходной координаты системы и эталонной модели.

Для снижения числа итераций в процессе настройки целесообразно варьировать неизвестные параметры объекта, пересчитывая на каждом шаге параметры РС методом модального управления. При этом использование априорной информации, то есть структуры и известных параметров объекта, позволяет снизить размерность задачи оптимизации до 2-3 переменных.

В соответствии с методом модального управления, в процессе настройки вектор параметров \mathbf{K} безынерционного РС рассчитывается путем решения матричного уравнения (2). При этом в качестве желаемого характеристического полинома системы используется полином эталонной модели $D(s)$.

В случае настройки системы с ПР вектор параметров регулятора определяется путем решения системы линейных уравнений, полученных на основе уравнения синтеза (3):

$$\mathbf{g} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{r} = \mathbf{v}, \quad (9)$$

где \mathbf{G}, \mathbf{g} – матрица и вектор коэффициентов передаточной функции объекта управления; \mathbf{r}, \mathbf{v} – векторы коэффициентов ПР и желаемого характеристического полинома $D(s)$, соответственно.

Для объекта с передаточной функцией (4) и синтезированного ранее динамического ПР3/0 матрицы уравнения (9) имеют вид:

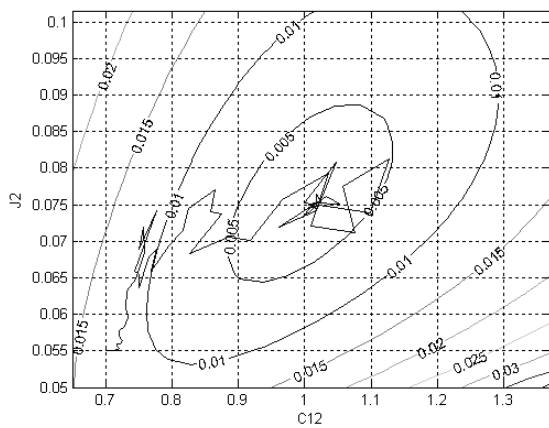
$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} 3,13\Omega_0 \\ 4,39\Omega_0 \\ 3,2\Omega_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r} = [r_3 \quad r_2 \quad r_1 \quad r_0]^T.$$

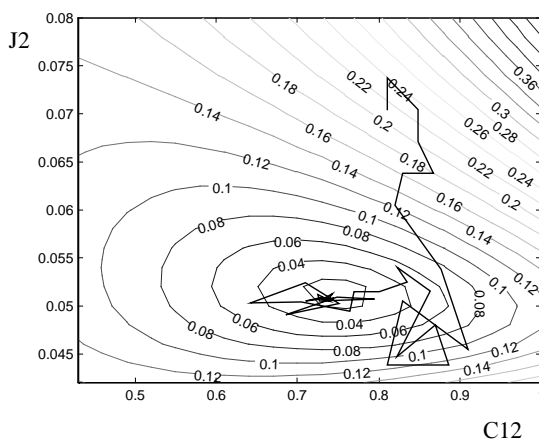
Для двухмассовой ЭМС (Рис. 2) параметры силового преобразователя ($K_{\text{СП}}, T_{\text{СП}}$) и двигателя ($R_{\text{Я}}, T_{\text{Я}}, C, J_1$) в большинстве случаев известны достаточно точно, поэтому в процессе настройки целесообразно варьировать только параметры механической части (C_{12}, J_2).

Исследование алгоритма настройки проводилось с помощью модели двухмассовой ЭМС в среде Simulink, содержащей эталонную модель $H_{\text{Э}}(s)$ в непрерывном виде. Расчет отклонения переходных характеристик системы и эталонной модели реализован в виде S-функции в соответствии с (8).

Поверхности отклика для двухмассовой ЭМС с безынерционным РС4 и с динамическим ПР3/0, полученные методом регулярного сканирования при вариации параметров объекта управления C_{12}, J_2 приведены на Рис. 5,а и б соответственно. Поверхность имеет четко выраженный глобальный минимум, по мере удаления от него значение среднеквадратического отклонения (8) монотонно возрастает.



а)



б)

Рис. 5. Поверхности отклика для двухмассовой ЭМС с безынерционным РС4 (а) и с динамическим ПР3/0 (б)

Результаты оптимальной настройки двухмассовой ЭМС с динамическим ПР3/0 приведены в таблице 2 соответственно методами регулярного сканирования, ДФП и симплекс-методом.

Таблица 2

Результаты настройки двухмассовой ЭМС

ПР3/0	Исходные значения	Сканирование	ДФП	Симплекс-метод
J_2	0,0268	0,05	0,0492	0,0492
C_{12}	0,65	0,7226	0,7219	0,7221
r_0	4.3114	7.3905	7.2759	7.2738
r_1	0.5335	1.0402	1.0196	1.0188
r_2	0.2076	0.3557	0.3501	0.3500
r_3	0.0057	0.0096	0.0095	0.0095
N	-	400	40	62
Θ	0,4536	0,01	0,0059	0,0059
q	0,9981	0,26	0,26	0,26

Переходные характеристики ЭМС с динамическим ПР3/0 приведены на Рис. 6. Кривые 1 соответствуют

исходным параметрам, кривые 2 – настройке методом ДФП, кривые 3 – настройке симплекс-методом, кривые 4 – эталонной модели.

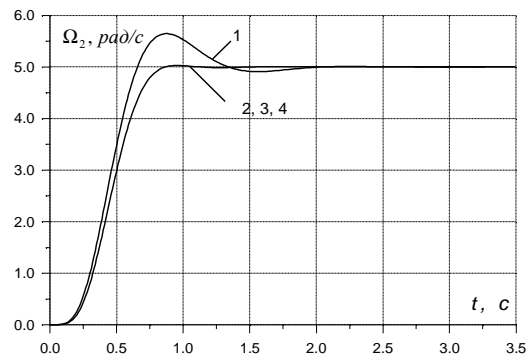


Рис. 6. Переходные характеристики двухмассовой ЭМС с ПР3/0

Применение эталонной модели системы с РС обеспечивает устойчивую сходимость рекуррентных алгоритмов оптимизации независимо от начальных условий, а также снимает проблему локальных экстремумов.

Снижение количества опытов при автоматической настройке системы с эталонной моделью достигается за счет применения рекуррентных методов оптимизации. Так, при настройке двухмассовой ЭМС с ПР 3/0 методом правильного симплекса число итерации составляет 40-60, а при использовании метода ДФП – 20-40.

Таким образом, предлагаемый подход, состоящий в снижении размерности задачи оптимизации, расчете параметров регулятора на каждом шаге алгоритма, а также применении эталонной модели, позволяет сформировать процедуру настройки системы с ПР, отвечающую требованиям реального времени.

Предлагаемый подход может применяться для настройки различных управляющих устройств, синтезированных методами модального управления, – полиномиальных, регуляторов состояний, а также систем с наблюдателями состояний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
- [2] Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 480 с.
- [3] Анисимов А.А., Тарарькин С.В. Исследование и разработка методов параметрической оптимизации полиномиальных регуляторов электромеханических систем // Электричество. – 2008. – № 3. – С. 33-39.
- [4] Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
- [5] Hjalmarsson H. Iterative feedback tuning – an overview // Int. J. Adaptive Control Signal Proc. 2002. V. 16(5). P. 373-395.