УДК 519.6

О. А. Кузнецова, канд. техн. наук, доцент
Тульский государственный университет, Россия
Тел.: +7 (915) 7823260; *E-mail:* o.a.kuznetsova@mail.ru

СЕТОЧНЫЙ ЛПτ-ПОИСКОВЫЙ МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Предложен сеточный $ЛП_\tau$-поисковый метод оптимизации и синтеза закона управления сложным динамическим объектом, который основан на комплексном сочетании аналитической составляющей инвариантного подхода к синтезу структуры закона управления динамическим объектом управления и исследования пространства варьируемых параметров большой размерности. Метод определяет стратегию синтеза системы управления исходя из физических особенностей и желательных режимов работы сложного динамического объекта, определяет математическое выражение структуры и значения вектора переменных параметров закона управления динамическим объектом с учетом неопределенности параметров и внешних факторов. Диалоговая система АМИПП обеспечивает поиск оптимальных варьируемых параметров большой размерности, построение множества Парето и принятие решения по выбору оптимального расчетного варианта в диалоговом режиме.

Ключевые слова: *поисковый метод, оптимизация, параметры, динамика, управление.*

O. A. Kuznetsova

LPT GRID-SEARCH METHOD FORMULTICRITERIA OPTIMIZATION AND CONTROL SYNTHESIS OF COMPLEX DYNAMIC OBJECT

A grid LPT search method for optimization and synthesis of the control law for a complex dynamical object is proposed. It is based on the complex combination of the analytical component of the invariant approach to the synthesis of the structure of the control law for a dynamic control object and the study of the space of variable parameters of large dimension. The method determines the synthesis strategy of the control system based on the physical characteristics and desired operating modes of a complex dynamic object, determines the mathematical expression of the structure and the values of the vector of variable parameters of the control law for a dynamic object, taking into account the uncertainty of the parameters and external factors. The AMIPP dialog system provides the search for optimal variable parameters of large dimension, the construction of the Pareto set and the decision to choose the optimal design variant in the interactive mode.

Key words: *search method, optimization, parameters, dynamics, management* **.**

1. Введение

Основной задачей при проектировании и эксплуатации машин и механизмов является обеспечение желаемых показателей работы этих систем. Обеспечение желаемых (требуемых) показателей достигается за счет поиска оптимальных варьируемых параметров машин и механизмов, применения управляющего воздействия, действующего на элементы механической системы, либо одновременного их применения. Управляющее воздействие может формироваться любым электроприводом.

Для решения практических задач оптимизации параметров и синтеза законов управления таких объектов разработан сетевой $ЛП_\tau$-поисковой метод, обеспечивающий сочетание решения задач оптимизации и управления применительно к машиностроительным системам, служащий связующим звеном между динамикой и управлением режимом работы.

2. Цель статьи

Цель исследований состоит в применении сеточного $ЛП_\tau$-поискового метода многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления, обеспечивающего повышение эффективности функционирования механизмов, машин и комплексов, как составной части технологического оборудования, за счет определения оптимальной совокупности параметров, режимов работы и разработки закона управления, который улучшает энергетические и динамические показатели.

3. Обзор и анализ

Состояние динамического объекта определяется комплексом задач анализа и синтеза на всех этапах жизненного цикла. На современном уровне развития промышленных объектов управление системой должно выполняться не из устранения возникающих в процессе работы ошибок, а в предотвращении их, т.е. сделать объект управления невосприимчивым (инвариантным) к внешним воздействиям. Следовательно, при проектировании системы необходимо разрабатывать алгоритмы управления, обеспечивающие выполнение принимаемых требований. Управление сложным динамическим объектом представляет не простую задачу для формирования оптимального закона управления, решение которой приводит к поиску глобального оптимума.

И.М. Соболь [1] разработал $ЛП_\tau$-последовательности, позволяющие равномерно исследовать пространство параметров. Применение последовательностей при многокритериальной оптимизации приведено в работах [2, 3]. В [4] сформулировано направление применение сеточного метода для моделирования, приведены $ЛП_\tau$-последовательности размерностью до 1111 с хорошими характеристиками равномерности. В работах [5, 6] приведено построение последовательности большой размерности, среди которых следует выделить работы компании BRODA, которая занимается разработкой и распространением многомерных LDSгенераторов. Компания предлагает генератор, разработанный проф. И.М. Соболем (SobolSeq370 и SobolSeq32000 генератор).

Для решения рассматриваемых задач предложен и обоснован новый метод структурного синтеза закона управления динамическим объектом – сеточный $ЛП_\tau$-поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления. Основная идея метода состоит в сочетании аналитической составляющей инвариантного подхода к структурному синтезу закона управления динамическим объектом управления и на исследовании пространства варьируемых параметров большой размерности точками $ЛП_\tau$-последовательности.

4. Исходная постановка задачи

Рассмотрим динамические системы сложного динамического объекта, описываемые обыкновенными неоднородными дифференциальными уравнениями в форме Коши

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= f_i(x,t,a,\zeta) + g_i(x)u_i, \qquad i=\overline{1,r},\ r \le n \\ \dot{x}_j(t) &= f_j(x,t,a,\zeta), \qquad j=\overline{1+r,n} \end{aligned}, \qquad (1)$$

где f_i, f_j, g_i, $i=\overline{1,p}$, $j=\overline{p+1,n}$ – правые части уравнений системы; x – вектор состояния системы, $x \in R^n$; u – вектор управления, $u \in U \subseteq R^m$; U – некоторое заданное ограниченное множество допустимых значений управления; $t \in T = \lfloor t_0, t_y \rfloor$ – промежуток времени функционирования системы, моменты начала процесса t_0 и окончания процесса t_y заданы, $f(t,x,u): T \times R^n \times U \to R^n$, R^n –n – мерное евклидово пространство; ζ – внешнее возмущение.

Для модели сложного динамического объекта (1) задано начальное состояние объекта управления

$$x(t_0)=x^0=\left[x_1^0,\ldots,x_n^0\right]^T \in R^n, \tag{2}$$

где начальное состояние x^0 заранее не задано и может быть произвольным.

Следствие 1. Если динамический объект имеет описание в дифференциальной форме записи

$$\dot{x}_s = f_s(x_1,\ldots,x_n, a_1,\ldots,a_k), \quad s=1,\ldots,k, \tag{3}$$

то решение $x=(x,a)$ системы уравнений является непрерывной функцией параметров $a_1,\ldots,a_k$ в замкнутой области $\left|a_j - a_j^{(0)}\right| \le c, \quad j=1,\ldots,k$, $a \in A \subseteq R^k$ [7].

Заданы варьируемые параметры в диапазоне минимального a^* и максимального a^{**} значения

$$a_j^* \le a_j \le a_j^{**} \; j=\overline{1,n}, \tag{4}$$

где $a=[a_1,\ldots,a_k]^T$ – вектор варьируемых параметров, $a \in A \subseteq R^k$, A – ограниченное множество.

Задано терминальное состояние

$$x(t_y)=t_y. \tag{5}$$

Введены критерии $\Phi_i(i_{rt})$ и критериальные ограничения

$$\Phi_i(i_{rt})=\Theta_i\big(x(t_y)\big)+\int_0^{t_y} F_i\big(x(t),u(t)\big)dt \to min, \quad i=\overline{1,m}, \tag{6}$$

где t_y – длительность процесса управлений. Первое слагаемое выражения (6) характеризует точность управления конечным состоянием системы. Второе слагаемое определяет качество процесса управления на отрезке $\lfloor 0, t_y \rfloor$ и критериальные ограничения.

Заданы параметрические (4), критериальные (6) и другие ограничения

$$J_o = \int_0^{t_y} r_l(x,u)dt \le 0, \quad l=\overline{1,p}. \tag{7}$$

Определен класс однозначных преобразований

$$S=\{st_i(x,a) \; : i=1,2,\ldots\}, \; st(x,a): R^n \times R^r \to R^m. \tag{8}$$

Необходимо построить множество парето-оптимальных управлений [7]

$$P=\left\{\tilde{st}_{i_j}(x,a)\in S: j=1,2,\dots\right\}. \qquad (9)$$

Множество Парето сформировано при следующих условиях [7]

$$\forall st(x,a)\in S, \quad \forall a\in R^n \ \exists \tilde{st}(x,a)\in P \ \exists \tilde{a}\in R^n,$$
$$\Phi(\tilde{st}(x,\tilde{a}))\le \Phi(st(x,a)), \qquad (10)$$

где $\Phi(st(x,a))=[\Phi_1(st(x,a))\dots\Phi_m(st(x,a))]^T$ – вектор выполненных критериев, считая, что $u=st(x,a)$ и выполняются условия $\Phi(st'(x,a))\le\Phi(st''(x,a))$, если $\Phi_i(st'(x,a))\le\Phi_i(st''(x,a))$, $i=\overline{1,m}$ и $\exists\Phi_k(st'(x,a))<\Phi_k(st''(x,a))$, $1\le k\le m$.

5. Аналитическая составляющая инвариантного подхода

А.А. Колесниковым [8] предложен конструктивный подход к решению обозначенной проблемы. При этом подходе реализуется переход от задачи управления непосредственно самими переменными в пространстве состояний к управлению агрегированными макропеременными, которые задаются в виде некоторых априори функций фазовых координат и некоторых параметров обратных связей.

При разработке сеточного $ЛП_\tau$-поискового метода введено определение динамической цели управления, которая формирует оптимальные переходные процессы и движение динамического объекта [7, 9]. Динамическая цель управления Z_d определяется необходимым количеством критериев и инвариантных множеств [8], определяет желаемые свойства объекта и конструируется в следующем виде:

$$Z_d=(\Phi_j(i_{rt}),\psi_l(x)),\ j=\overline{1,m},\ l=\overline{1,s}, \qquad (11)$$

где $\Phi_j(i_{rt})$ – критерии, определяющие основные характеристики переходных процессов объекта, $\psi_l(x)$ – заданные целевые инвариантные множества, s – число инвариантов.

В расширенной модели оптимизационного расчета динамического объекта выполняется замена функционала ошибки на вычисление сопровождающего функционала

$$J_\Sigma=\int_0^\infty\left[\sum_{l=1}^{s}\xi_l^2(\psi_l)+\sum_{l=1}^{s}\omega_l^2\dot{\psi}_l^2(t)+u^2\right]dt, \qquad (12)$$

в состав которого входят весовые коэффициенты ω, инвариантные многообразия ψ и управления u. Для вычисления u в (12) необходимо знание математического описания закона управления, которое можно свести к определению: поисковой функцией, скоростного градиента, аналитической составляющей на инвариантных многообразиях, вариационного способа на структуре графа системы управления [7].Основные свойства инвариантных многообразий приведены на основе работы [10], которые представляют определенный переход к формированию предсказуемого (направленного) движения объекта на инвариантных многообразиях, которые представляют собой аттракторы, к которым стремятся другие переменные объекта. Цель управления движением можно выражать через аттрактор $\psi_l(x_1,\dots,x_n)=0$. Это — целевой способ самоорганизации синтезируемых систем, впервые развитый в работах [8].

Изменение функции $\psi(x,t)$ вдоль решений системы уравнений $\dot{x}_l = f_l(x,t), l=\overline{1,n}$ определяется полной производной

$$\begin{aligned}&\frac{d\psi}{dt}=\frac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial t}+\sum_i^p\frac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_i}g_i(x,t)u+\\&\sum_i^p\frac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_i}f_i++\sum_j\frac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_j}f_j\end{aligned}. \qquad (13)$$

Движение инвариантных переменных определяется основным уравнением

$$\omega_l\frac{d\psi}{dt}+\psi=0. \qquad (14)$$

Используя уравнения (13) и (14) определяем структуру st в виде (15), соответствующее основным определениям [8, 9]

$$u\Leftrightarrow st=-\left(\sum_i^p\frac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_i}g_i(x,t)\right)^{-1}\begin{pmatrix}\dfrac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial t}+\sum_i^p\dfrac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_i}f_i+\\\sum_{j=p+1}^n\dfrac{\partial\psi_l(x,t)}{\partial x_j}f_j+\varphi(\psi,\omega,t)\end{pmatrix}. \qquad (15)$$

Для удобства преобразований уравнений (13), (14) использовано обозначение производной Ли, введенное в работе [8]

$$L_{f(x,\xi,t)}\psi(x,t)=\sum_j^{\dim x_i}\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial x_{ij}}f_{ij}. \qquad (16)$$

Выполняя соответствующие преобразования, получаем

$$\begin{aligned}&\dot{\psi}=L_{f_i(x,\zeta,t)}\psi(x,t)+L_{f_j(x,\zeta,t)}\psi(x,t)+\\&L_{g_i(x,t)}\psi(x,t)+\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}.\end{aligned} \qquad (17)$$

Допустимой структурой $st(x,\zeta,\omega,t)$ управления (класс функций управлений) будем считать функции $st(x,\zeta,\omega,t)\in S$, такие,

$$\begin{aligned}&u\Leftrightarrow st(x,\zeta,\omega,t)=\\&\left(-L_{g_i(x,t)}\psi(x,t)\right)^{-1}\begin{pmatrix}L_{f_i(x,\zeta,t)}\psi(x,t)+L_{f_j(x,\zeta,t)}\psi(x,t)+\\L_{f_j(x,\zeta,t)}\psi(x,t)+\varphi(\psi,\omega,t)+\dfrac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}\end{pmatrix},\end{aligned} \qquad (18)$$

где $f:R^n\times R^d\times R_+\to R,\ \varphi:R\times R^\omega\times R_+\to R$ – некоторые локально ограниченные функции $x,\ \psi,\ \omega,\ \zeta$ и глобально ограниченные по времени t.

Обобщение. Полученное уравнение (18) является обобщенным выражением, определяющим структуру закона управления, исходя из физических особенностей и желаемых режимов работы сложного динамического объекта. Закон управления (18) определяет вид и перечень обратных связей, имеет достаточную информацию о возможности управления динамическим объектом при допустимости перечисленных координат измерения. Необходимо отметить, что закон управления определяет стратегию построения системы управления. Таким образом, закон (18) переводит исходную модель (1) в хорошо известную в литературе форму моделей по ошибке. Учитывая свойства (13), (14) для динамического объекта разработана система управления, при условии, что часть координат объекта (1) не измеряемые и действует внешнее возмущение.

Учитывая свойства (13) и (14) запишем уравнение (17) в следующем виде

$$\dot{\psi} = f(x,\zeta,t) - f\left(x,\hat{\zeta},t\right) - \varphi(\psi,\omega,t) + \varepsilon(t). \tag{19}$$

Отметим, что в уравнении (19) вектор $\hat{\zeta}$ имеет смысл оценок неизвестного вектора ζ. Неполнота математических моделей физических объектов и погрешности измерений неизбежно приводят к наличию не моделируемой динамики в системе управления. Эти эффекты учитываются слагаемым $\varepsilon(t)$ в уравнении (19). В общем случае класс функций $\varepsilon(t)$ может быть достаточно произвольным.

6. Применение метода

Наиболее успешной идеализацией процессов, протекающих в упругосвязаных электромеханических системах, стала линеаризованная модель двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС), приближенно описывающая поведение реальных систем электропривода по доминирующим низкочастотным модам упругих колебаний [11, 12]. До настоящего времени эта модель доминирует в теории и практике автоматизированного электропривода и активно используется специалистами в области теории автоматического управления для подтверждения эффективности вновь разрабатываемых методов синтеза САУ.

Современное развитие техники определяет оснащение производственных механизмов регулируемыми электроприводами с современными преобразователями на полностью управляемых силовых ключах. Обоснование безынерционного источника момента с достаточной для практики точности приведено в [12]. Поисковые расчеты выполнены с использования алгоритма 1 [7].

Цель данного примера заключается в апробации на простейшей задаче управления ДЭМС сеточного $ЛП_\tau$-поискового метода оптимизации и синтеза закона управления.

Для ДЭМС можно выделить следующие задачи исследования: стабилизация скорости первой и второй массы, управление упругими колебаниями. В статье рассматривается только уменьшение динамических усилий за счет использования управления упругими усилиями ДЭМС. При принятых обозначениях и допущениях [13] система уравнений (1) для модели двухмассовой электромеханической системы приведена к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (u - x_3)b_1, \\ \dot{x}_2 &= (x_3 - \zeta)b_2, \\ \dot{x}_3 &= (x_1 - x_2)b_3, \end{aligned} \tag{20}$$

где $b_1 = 1/J_1$, $b_2 = 1/J_2$, $b_3 = c_{12}$ – упругий элемент, J_1, J_2 – моменты инерции масс, u – управляющее воздействие, ζ – внешнее возмущение.

Управление упругим усилием системы (20) связано с выполнением следующих заданных условий:

- движение первой массы ψ_1 и величина упругих усилий ψ_3

$$\Psi_1 = x_1 - \gamma = 0, \; \Psi_3 = x_3 - x_3^* = 0, \tag{21}$$

- определены критерии и ограничения переходных процессов

$$\varPhi_1 = (12), \quad \varPhi_2 = \sigma_{x_3}, \quad \varPhi_3 = |\psi_1|, \quad \varPhi_4 = |\psi_3|, \tag{22}$$

где x_3^* – заданная величина усилий, σ_{x_3} – перерегулирование x_3.

Для ДЭМС необходимо найти управление в виде функции координат вектора пространства состояний объекта (20) при условии, что параметры системы (20) и внешние возмущение определены ориентировочно в заданном диапазоне изменения (4).

Макропеременная ψ_3 является внутренней при формировании управляющего воздействия для координаты x_1, которое определяется на основе решения основного уравнения движения

$$\frac{\partial \psi_3}{\partial x_3} f_3 + \omega_3^{-1} \psi_3 = 0. \tag{23}$$

При выполнении соответствующих преобразований, получаем

$$x_1 = x_2 - \frac{1}{c_{12}\omega_3}\left(x_3 - x_3^*\right). \tag{24}$$

Выполнение условия $\psi_1 = 0$, определяет $\gamma = x_1$, следовательно

$$\Psi_1 = x_1 - x_2 + \frac{1}{c_{12}\omega_3}\left(x_3 - x_3^*\right) = 0. \tag{25}$$

После преобразований (13), (14) и использования (18) определяем структуру закон управления первой массой системы (20)

$$st(x,\zeta,\omega,t) = \left(-\frac{1}{J_1}\right)^{-1} \begin{pmatrix} \dfrac{\partial \psi_1}{\partial x_1} f_1 = -\dfrac{x_3}{J_1}, \\ \dfrac{\partial \psi_1}{\partial x_2} f_2 = -(x_3 - \zeta)/J_2, \\ \dfrac{\partial \psi_1}{\partial x_3} f_3 = \dfrac{1}{\omega_3 c_{12}} c_{12}(x_1 - x_2), \\ \varphi(\psi,\omega,t) = \omega_1^{-1}\begin{pmatrix} x_1 - x_2 + \\ \dfrac{1}{c_{12}\omega_3}\left(x_3 - x_3^*\right)\end{pmatrix} \end{pmatrix}, \tag{26}$$

$$u = f(st, va) = a_1 x_3 - a_2\zeta - a_3(x_1 - x_2) + a_4 x_3^*, \tag{27}$$

где $a_1 = 1 + \dfrac{J_1}{J_2} - \dfrac{J_1}{c_{12}\omega_1\omega_3}$, $a_2 = \dfrac{J_1}{J_2}$, $a_3 = J_1\left(\dfrac{1}{\omega_1} + \dfrac{1}{\omega_3}\right)$, $a_4 = \dfrac{J_1}{c_{12}\omega_1\omega_3}$, $va = (a_1, a_2, a_3 a_4)$ – вектор параметров закона (27). Закон (27) в общем виде определяет стратегию построения системы управления ДЭМС при выполнения условия допустимости измерения всех координат состояния x и внешнего возмущения ζ. В общем виде отражает хорошо известную форму модели по ошибке. Последнее слагаемое $a_4 x_3^*$ определяет силовое воздействие (управление) заданного движения ДЭМС. В уравнении x_1^* – заданное значение угловой скорости, β – жесткость характеристики,

$$\dot{u} = \left(\beta\left(x_1^* - x_1\right) - u\right)/T_e. \tag{28}$$

Уравнение (28) является обобщенным уравнением динамики электромеханической системы с двигателем, обладающим линейной или линеаризованной механической характеристикой, динамическая жесткость $\beta_d = -\beta/(1+T_e)$, определяется уравнением с коэффициентом β и постоянной времени T_e. Уравнению (28) соответствует структурная схема обобщенной электромеханической системы, приведенной в [13]. В работах [11, 12] приведен учет всех постоянных времени привода.

Построение переходных процессов для исходной системы (20) (базовый вариант (-1)) со следующими параметрами системы: $J_1 = 0{,}102$ кгм^2; $J_2 = 0{,}4$ кгм^2; $c_{12} = 2000$ Нм/рад; $M_c = \zeta = 30$ Нм (задан графиком). На рис. 1 приведены графики переходных процессов $x(1) = x_1$, $x(3) = x_3$, $M_c = \zeta$ при пуске системы с управлением $u = \beta\left(x_1^* - x_1\right)$. Изменение упругого момента имеет значительный колебательный характер с максимальным значением до 160 Нм.

Исходный объект управления (20) допускает измерение только угловой скорости x_1, все остальные координаты недоступны измерению.

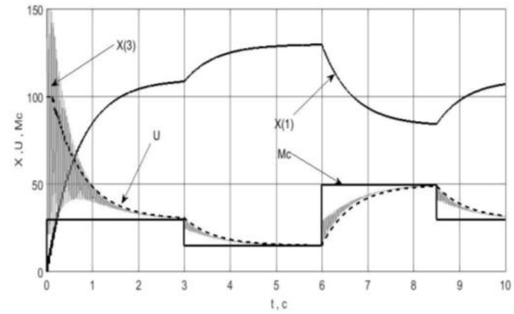

Рис. 1. Графики переходных процессов системы (20)

Реализация закона управления (27) связана с применением теории наблюдателя, с использованием координат восстановления $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$, $\hat{x}_3$, $\hat{x}_4$, $\hat{x}_4 = \zeta$, приводящих систему уравнений объекта управления (20) к записи (29)

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= (u - x_3)b_1, \\
\dot{x}_2 &= (x_3 - \zeta)b_2, \\
\dot{x}_3 &= (x_1 - x_2)b_3, \\
\dot{\hat{x}}_1 &= (\hat{u} - x_3)b_1 + h_1(x_1 - \hat{x}_1), \\
\dot{\hat{x}}_2 &= (\hat{x}_3 - \hat{x}_4)b_2 + h_2(x_1 - \hat{x}_1), \\
\dot{\hat{x}}_3 &= (\hat{x}_1 - \hat{x}_2)b_3 + h_3(x_1 - \hat{x}_1), \\
\dot{\hat{x}}_4 &= h_4(x_1 - \hat{x}_1), \\
\hat{u} &= a_1\hat{x}_3 - a_2\hat{x}_4 - a_3(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + a_4\beta\left(x_1^* - \hat{x}_1\right).
\end{aligned} \tag{29}$$

Приведенный поиск оптимальных параметров объекта управления и параметров закона, позволяет выполнить для системы (29) поиск в заданном диапазоне изменения значений оптимальных параметров вектора $va = \left[J_1, J_2, c_{12}, \omega_1, \omega_3, h_1, h_2, h_3, h_4\right]^T$.

Целесообразно для двухмассовой электромеханической системы выполнить управление, которое обеспечивает снижение динамических усилий и выполнение заданного режима работы при неопределенных параметрах и внешних возмущениях.

Поиск оптимальных значений параметров va связан с выполнением принятых условий, для которых момент инерции J_1 может изменяться в небольших пределах $0{,}09 \le J_1 \le 0{,}11$, а другие параметры определены ориентировочно $0{,}3 \le J_2 \le 0{,}5$, $2000 \le c_{12} \le 3000$. Коэффициенты закона также подлежат определению. Для них задан следующий диапазон изменения $0{,}008 \le \omega_1 \le 0{,}05$, $0{,}008 \le \omega_3 \le 0{,}05$, $10{,}0 \le h_1 \le 500{,}0$; $1{,}0 \le h_2 \le 1000$; $1{,}0 \le h_3 \le 5000$; $1{,}0 \le h_4 \le 10000$; момент сопротивления задан графиком. Задано необходимое начальное, конечное состояние, шаг интегрирования, точность. При выполнении вычисления каждого критерия модели оптимизационного расчета введены критериальные ограничения на максимальные значения. Согласно рекомендации [14] при оптимизации принято число расчетных вариантов $I = 1024$. В результате решения задачи оптимизации параметров системы (29) с учетом макропеременных (21), критериев (22), с общим числом расчетных вариантов 1024, сформировано множество расчетных вариантов $I_0(i_{rt}) = \{102{,}128{,}331{,}625{,}753{,}867{,}1012{,}-1\}$, оптимальных по Парето. Из множества $I_0(i_{rt})$ принят вариант $i_{rt}{}^o$ = 753 для условия равноправности всех критериев со следующими значениями вектора варьируемых параметров: $J_1 = 0{,}105$ кгм^2; $J_2 = 0{,}365$ кгм^2; $c_{12} = 2358$ Нм/рад; $\omega_1 = 0{,}0328$; $\omega_3 = 0{,}0137$; $h_1 = 430{,}6$; $h_2 = 35{,}15$; $h_3 =$ 16,65; $h_4 = 9111$. Для принятого варианта расчета $i_{rt}{}^o = 753$ на рис. 2 приведены графики переходных процессов u, $x(1) = x_1$, $x(3) = x_3$, $M_c = \zeta$ закона (27), а на рис. 3 графики восстановленных координат $u = \hat{u}$, $x(1.1) = \hat{x}_1$, $x(3.1) = \hat{x}_3$, $x_4 = \hat{x}_4 = \hat{\zeta}$.

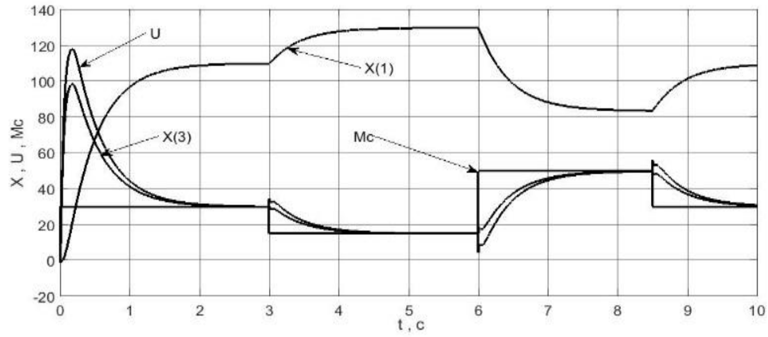

Рис. 2. Графики переходных процессов системы (29)

Применение сеточного $ЛП_\tau$-поискового метода оптимизации и синтеза закона управления для формирования закона управления ДЭМС (механическая часть электропривода) рассмотрено в [11], приведено управление обычным маятником (крановая тележка с гибкой подвеской груза) и перемещение электроприводом крановой тележки с гибкой подвеской груза. Полученные результаты позволяют снизить величину динамических усилий, повысить точность перемещения груза и т.д. [15].

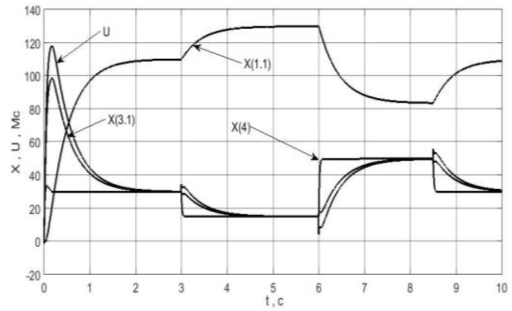

Рис. 3. Восстановление координат системы (29)

5. Заключение

Сеточный $ЛП_{\tau}$ - поисковый метод оптимизации и синтеза оптимального закона управления динамическим объектом, разработан на основе зондирования пространства параметров точками $ЛП_{\tau}$ - последовательности, построения и аппроксимации эффективного множества расчетных вариантов, выделения состояний динамического объекта без априорного задания аналитической модели возмущений на основе применения техники инвариантных многообразий. Метод определяет стратегию синтеза системы управления, математическое выражение структуры и значения вектора переменных параметров закона управления динамическим объектом с учетом неопределенности параметров и внешних факторов. Разработанный метод позволяет решать прикладные задачи оптимизации и синтеза законов управления динамических объектов различных промышленных систем.

Список литературы:

1. Соболь, И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. – М.: Физматлит, 1969. – 288 с.

2. Соболь, И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с. ISBN 5-7107-7989-X.

3. Statnikov, R.B. The Parameter Space Investigation Method Toolkit [with DVD] / R.B. Statnikov, A. Statnikov. – Boston/London: Artech House Publishers, 2011. – 214 p.

4. Радченко С. Г., Козырь О. В. Применение ЛПТ равномерно распределенных последовательностей для решения прикладных задач моделирования // ММС. - 2014. №1. - С.151-158.

5. Broda [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.broda.co.uk

6. Лаборатория экспериментально-статистических методов исследований (ЛЭСМИ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.n-t.org/sp/lesmi

7. Кузнецова, О.А. Адаптивный метод исследования пространства параметров. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - 288 с. ISBN 978-5-7679-2323-6.

8. Колесников, А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов / Под ред. А.А. Колесникова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 504 с. ISBN 5-484-00198-6.

9. Кузнецова, О.А. $ЛП_{\tau}$ поисковый метод синтеза базового закона управления динамическим объектом //Электротехника: сетевой электронный журнал. - 2015. - Том 2. - №4. - С. 39-44.

10. Леви-Чивита Т., Армальди У. Курс теоретической механики. М.: Изд-во иностр. литературы, 1951. - Т.2, Ч.2. - 555 с.

11. Кузнецова, О.А. Применение сеточного $ЛП_{\tau}$ – поискового метода для синтеза закона управления двухмассовой электромеханической системой // Энергетические и электротехнические системы. Выпуск 4. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. - С. 74-86.

12. Кузнецова, О.А. Сеточный $ЛП_{\tau}$ – поисковый метод конструирования на инвариантных многообразиях закона управления применительно к электротехническим системам и комплексам // Энергетические и электротехнические системы. Выпуск 4. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. - С. 141-151.

13. Ключев, В.И. Теория электропривода. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с. ISBN 5-283-00642-5.

14. Кузнецова, О.А. АМИПП - программный комплекс оптимизационного расчета и синтеза оптимального управления электромеханической системой //Энергетические и электротехнические системы. Выпуск 3. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2016. - С. 206-216.

15. Кузнецова, О.А. Оптимальные законы управления механизмами крановой тележки с гибкой подвеской груза / Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2017. Т.5. - №2. - С. 39-44.

Поступила в редколлегию 04.05.18