

УДК 629.423.1

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

## МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ. ДВУХМАССОВАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

*Рассмотрены особенности построения модели для оптимизации и синтеза закона управления механической системой. Модель является составной частью сеточного ЛП<sub>τ</sub>-поискового метода оптимизации и синтеза закона управления механической системой, который основан на комплексном сочетании аналитической составляющей инвариантного подхода к синтезу структуры закона управления и исследования пространства варьируемых параметров большой размерности. Метод определяет стратегию синтеза системы управления исходя из физических особенностей и желаемых режимов работы механической системы, определяет математическое выражение структуры и значения вектора переменных параметров.*

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

**O. A. Kuznetsova**

## MODELS OF OPTIMIZATION CALCULATION OF MULTICRITERIAL OPTIMIZATION AND SYNTHESIS OF THE LAW OF CONTROL OF A MECHANICAL SYSTEM. TWO-MASS MECHANICAL SYSTEM

*The features of building a model for optimization and synthesis of the control law of a mechanical system are considered. The model is an integral part of the grid-search method of optimization and synthesis of the control law of a mechanical system, which is based on a complex combination of the analytical component of the invariant approach to the synthesis of the structure of the control law 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 the desired modes of operation of the mechanical one, determines the mathematical expression of the structure and values of the vector of variable parameters of the system control law.*

**Keywords:** search method, optimization, parameters, dynamics, control

### 1. Введение

Машины и механизмы с упругими механическими связями составляют значительный класс, к которым относятся подъемные машины, лифты, механизмы подъема груза кранов и перемещения каретки с грузом, вибрационные установки (грохоты), горные машины и др. устройства. Современное развитие техники определяет оснащение производственных механизмов регулируемые электроприводами с современными преобразователями на полностью управляемых силовых ключах, формирующих безинерционный источник момента. При проектировании и эксплуатации широкого класса машин и механизмов с упругими связями возникают задачи формирования желаемых (требуемых) показателей эффективности их работы, которые в первую очередь определяются свойствами механической части современного привода.

Модель расчета механической части системы обеспечивает вычисление всех координат системы, критериев оценки эффективности работы системы и является определяющим фактором формирования закона управления. Обеспечение заданных показателей эффективности может достигаться либо за счет применения оптимальных варьируемых параметров, полученных при многокритериальной оптимизации машин и механизмов, либо за счет использования управляющего воздействия, действующего на отдельные элементы механической системы, либо одновременного на группу элемен-

тов. В этом случае приходится решать задачи поиска оптимальных параметров системы управления, определять оптимальное управляющее воздействие для заданной системы и численные значения параметров управления.

## 2. Цель статьи

Цель статьи состоит в рассмотрении особенностей построения модели оптимизационного расчета (МОР) механической системы на основе использования сеточного  $ММ_τ$ -поискового метода многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления, обеспечивающей повышение эффективности функционирования механизмов, машин и комплексов, как составной части технологического оборудования, за счет определения оптимальной совокупности параметров, режимов работы и применения оптимального закона управления, которые улучшают энергетические и динамические показатели анализируемого объекта.

## 3. Обзор и анализ

Совершенствование механических систем с упруго-связанными электромеханическими элементами, в первую очередь связано с уменьшением динамических усилий. Для нерегулируемого привода используют метод пассивного демпфирования системы [1, 2]. Регулируемый привод обеспечивает дополнительные условия формирования условий работы таких систем [3]. Среди машиностроителей зарекомендовал хорошо известный метод исследования пространства параметров (ИПП), который обеспечивает поиск оптимальных параметров при многокритериальной оптимизации. Дальнейшим развитием ИПП является сеточный  $ММ_τ$ -поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления [4]. Эти методы предусматривает использование модели оптимизационного расчета исследуемой нелинейной динамической системы для определения оптимальной совокупности варьируемых параметров, структуры системы управления, для разработки рекомендаций по реализации системы управления. Метод обеспечивает исследование пространства большой размерности за счет использования генератора SobolSeq370 и генератора SobolSeq32000, обеспечивает расположение оптимальных траекторий системы в окрестности притягивающего многообразия, построенного на основе неформализованных процедур анализа системы. Желаемые свойства движения уравнений системы, т.е. программа и движение, заданы некоторой совокупностью инвариантных многообразий, удовлетворяющих, в частности, функциональным уравнениям, которые являются уравнениями Эйлера-Лагранжа для сопровождающего функционала.

## 4. Модель оптимизационного расчета исходной системы

Процессы в упруго-связанной двухмассовой механической системе (ДМС) и электрической в виде электропривода постоянного тока наиболее успешно отражены в линеаризованной модели двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС), приближённо описывающей поведение реальных систем электропривода по доминирующим низкочастотным модам упругих колебаний [2, 3]. 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.

Для решения задач многокритериальной оптимизации разработан программный комплекс АМИПП (адаптивный метод исследования пространства параметров) [5], который обеспечивает удобную диалоговую среду пользователю. В [5] подробно рас-

смотрены особенности построения системы и работа программного комплекса, приведены технические требования к оформлению модели оптимизационного расчета и ссылки на программные модули системы. Еще необходимо отметить, что система обеспечивает учет большого числа варьированных параметров и локальных критериев и ограничений при поиске оптимальных параметров и синтезе закона управления исходной системы.

Модель оптимизационного расчета является расширенной моделью, включающей исходную систему дифференциальных уравнений (1), вычисления локальных интегральных критериев (2) через решения дифференциальных уравнений (1), критериальные ограничения (3)

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x, t, a, \zeta) + g_i(x)u_i, \quad i = \overline{1, r}, r \leq n, \\ \dot{x}_j(t) = f_j(x, t, a, \zeta), \quad j = \overline{1+r, n}, \quad (1)$$

$$\Phi(i_{rq})_i = F_i(x(t), u(t)), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$J_{0l} = r_l(x, u) \quad l = \overline{1, p}. \quad (3)$$

Рассматривается ДЭМС на примере типовой структуры электропривода с упругим звеном, которая имеет следующие обозначения и допущения:  $M_e$  – электромагнитный момент двигателя, Нм;  $I$  – ток якорной цепи двигателя, А;  $cw, cm, c\Phi_n$  – произведения конструктивной постоянной и магнитного потока двигателя, Вс;  $R_e$  – эквивалентное сопротивление якорной цепи системы, Ом;  $T_e$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;  $E_n$  – э.д.с. управляемого преобразователя, В;  $T_\mu$  – постоянная времени преобразователя, с;  $k_n$  – коэффициент усиления преобразователя, В/В;  $U_y$  – управляющее напряжение, В;  $\zeta = M_{sop}$  – внешнее воздействие;  $\omega_1$  – угловая скорость ротора двигателя и жесткосоединенных с ним маховых масс с общим моментом инерции  $J_1$ ;  $\omega_2, M_y$  – приведенные к валу двигателя угловая скорость исполнительного органа механизма с моментом инерции  $J_2$  и момент в упругом звене;  $c_{12}$  – приведенный коэффициент крутильной жесткости упругого звена;  $M_{sop}$  – момент сопротивления нагрузки (независимая функция времени).

Для системы введены относительные фазовые координаты:  $x_1 = \omega_1, x_2 = \omega_2, x_3 = M_{12}, x_4 = I, x_5 = E_n$ . При построении переходных процессов ДЭМС использовались следующие значения параметров системы:  $J_1 = 0,102 \text{ кгм}^2; J_2 = 0,4 \text{ кгм}^2; c_{12} = 2000 \text{ Нм/рад}; M_c = \zeta = 30 \text{ Нм}$  (задан графиком);  $cw = 1,125; cm = 1,19$ . Обозначения:  $x(1) = x_1, x(3) = x_3, M_{sop} = \zeta, M_e = cm x_4$  при пуске системы при  $u = M_e = \beta (x_1^* - x_1)$ .

$$\dot{x}_1 = (b_{11} x_4 - x_3,) b_1, \\ \dot{x}_2 = (x_3 - \zeta,) b_2, \\ \dot{x}_3 = (x_1 - x_2,) b_3, \\ \dot{x}_4 = (b_{41} x_5 - b_{42} x_1 - x_4,) b_4,$$

$$\dot{x}_5 = b_{51} u - b_{52} x_5,$$

где  $b_{11} = cm$ ,  $b_1 = \frac{1}{J_1}$ ,  $b_2 = \frac{1}{J_2}$ ,  $b_3 = C_{12}$ ,  $b_{41} = \frac{1}{R_e}$ ,  $b_{42} = \frac{cw}{R_e}$ ,  $b_4 = \frac{1}{T_e}$ ,  $b_{51} = \frac{k_n}{T_\mu}$ ,

$$b_{52} = \frac{1}{T_\mu}.$$

Исходная модель двухмассовой механической системы (первые три уравнения системы) определяет колебательный переходной процесс системы с максимальным значением упругого момента до 120 Нм.

Для этой системы изменение характера переходных процессов возможно за счет изменения параметров системы и силового воздействия  $M_e$ , которое обычно формируется приводом.

### 5. Модель оптимизационного расчета системы управления ДЭМС

При формировании закона управления использовались работы А. А. Колесникова по определению структуры модели, закона управления, вопросы о расширении и сжатии фазового пространства [6]. К системе уравнений (1)-(3) необходимо добавить основные уравнения движения макропеременных (4), уравнение сопровождающего функционала (5), выражения принятых макропеременных (6) и математическое выражение вычисления управляющего воздействия  $u(x)$ , полученное на основе аналитической составляющей метода:

$$\dot{\psi}_l(t) = -1/T_l \xi_l(\psi_l), \quad l = \overline{1, s}, \tag{4}$$

$$\dot{\Phi}(t)_\Sigma = \sum_{l=1}^s \xi_l^2(\psi_l) + \sum_{l=1}^s T_l^2 \dot{\psi}_l^2(t), \tag{5}$$

$$\psi_l = \psi_l(x_l - x_l^0), \quad l = \overline{1, s}. \tag{6}$$

Для ДМС необходимо найти закон управление в виде функции координат вектора пространства состояний системы (1) при условии, что параметры системы (1) и внешние возмущение определены ориентировочно в заданном диапазоне изменения для задач стабилизации скорости первой и второй массы и задачи управления упругими колебаниями ДМС. Закон управления определяется структурой  $st(x, \zeta, \omega, t)$  и вектором варьируемых параметров  $va$ . В этом случае за счет целенаправленного изменения управления  $u$  осуществляется переход объекта из  $x^0$  в заданное  $x^k$  конечное, при этом должны выполняться все ограничения и обеспечиваться выполнение экстремумов критериев.

Динамическая цель управления для расширенной системы (1)-(6) связана с выполнением следующих заданных условий:

- макропеременные  $\psi_1$  и  $\psi_3$  соответственно определяют движение первой массы  $\psi_1$  и величину упругих усилий  $\psi_3$

$$\Psi_1 = x_1 - \gamma = 0, \quad \Psi_3 = x_3 - x_3^* = 0; \tag{7}$$

- критерии и ограничения выполняют оценки переходных процессов

$$\Phi_1 = \int_0^{\infty} (\varphi^2(\psi) + \omega^2(t)\psi^2(t))dt \rightarrow \min, \tag{8}$$

$$\Phi_2 = \sigma_{x_3}, \quad \Phi_3 = |\psi_1|, \quad \Phi_4 = |\psi_3|,$$

где  $x_3^*$  — заданная величина усилий,  $\sigma_{x_3}$  — перерегулирование  $x_3$ .

Макропеременная  $\psi_3$  является внутренней при формировании управляющего воздействия для координаты  $x_1$ , которое определяется на основе решения основного уравнения движения (4), (7)

$$\frac{\partial \psi_3}{\partial x_3} f_3 + \omega_3^{-1} \psi_3 = 0, \tag{9}$$

$$c_{12}(x_1 - x_2) + \omega_3^{-1}(x_3 - x_3^*) = 0.$$

Выполнение условия  $\psi_1 = 0$ , определяет,  $\gamma = x_1$  и (9)

$$\Psi_1 = x_1 - x_2 + \frac{1}{c_{12}\omega_3}(x_3 - x_3^*) = 0. \tag{10}$$

$$st(x, \zeta, \omega, t) = \left( -\frac{1}{J_1} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} f_1 = -\frac{x_3}{J_1}, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} f_2 = -(x_3 - \zeta) / J_2, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} f_3 = \frac{1}{\omega_3 c_{12}} c_{12}(x_1 - x_2), \\ \varphi(\psi, \omega, t) = \omega_1^{-1} \left( x_1 - x_2 + \frac{1}{c_{12}\omega_3}(x_3 - x_3^*) \right) \end{pmatrix}. \tag{11}$$

$$u = f(st, va) = a_1 x_3 - a_2 \zeta - a_3 (x_1 - x_2) + a_4 x_3^*, \tag{12}$$

где  $a_1 = 1 + \frac{J_1}{J_2} - \frac{J_1}{c_{12} \omega_1 \omega_3}$ ,  $a_2 = \frac{J_1}{J_2}$ ,  $a_3 = J_1 \left( \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_3} \right)$ ,  $a_4 = \frac{J_1}{c_{12} \omega_1 \omega_3}$ ,

$va = (J_1, J_2, c_{12}, \omega_1, \omega_3)$  — вектор параметров закона (12).

Закон (12) в общем виде определяет стратегию построения системы управления ДМС при выполнении условия допустимости измерения всех координат состояния  $x$  и внешнего возмущения  $\zeta$ . В общем виде отражает хорошо известную форму модели по ошибке. Последнее слагаемое  $a_4 x_3^*$  определяет силовое воздействие ( $U_{mo} = M_e$ ) заданного движения ДМС, которое формируется электрическим двигателем (рис. 1).

При рассмотрении системы управления ДЭМС выделим следующие положения:

Если рассматривается стабилизация скорости ДМС, для которой введены следующие макропеременные

$$\psi_1 = x_1 - x_1^* = 0, \tag{13}$$

то макропеременная (13) определяет закон управления механической системой:

$$u_{mo} = f(st, va) = a_1 x_1 + a_2 (x_1 - x_2) + a_3 x_3. \tag{14}$$

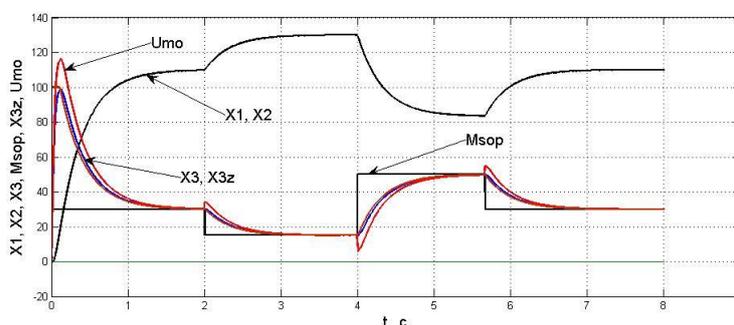


Рисунок 1. Процессы упругой механической системы.

Построение закона управления упругими усилиями [7] выполняется из рассмотренных условий (7), (10), закона (12) и условия

$$\Psi_4 = x_4 - \frac{1}{cm} U_{mo} = 0. \tag{15}$$

Использование алгоритма (11) определяет закон управления ДЭМС

$$U_4 = f(st, va) = d_1 x_3 - d_2 x_4 + d_3 U_{mo}, \tag{16}$$

где  $d_1 = cw$ ,  $d_2 = \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{\omega_4} \right) R_e T_e$ ,  $d_3 = \frac{T_e R_e}{\omega_4 cm}$ .

Управление тиристорным преобразователем определяется из выполнения условия

$$\Psi_5 = x_5 - U^* = 0. \tag{17}$$

Закон управления с учетом тиристорного преобразователя имеет вид

$$U_5 = f(st, va) = d_4 x_5 - d_5 U^*, \tag{18}$$

где  $d_4 = \frac{1}{k_{tn}} - \frac{T_\mu}{\omega_5 k_{tn}}$ ,  $d_5 = \frac{T_\mu}{\omega_5 k_{tn}}$ ,  $U^*$  — закон управления (16) ДЭМС,  $V_a = [b_1, \omega_4, \omega_5, k_{tn}, T_e]$  — вектор параметров, *if*  $\zeta \geq \zeta_{крит}$ , *else*  $U = 0$  — выполняется останов движения системы.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов управления электроприводом с тиристорным преобразователем и с защитой от стопорения исполнительного органа.

В основе системы управления ДЭМС с асинхронным электродвигателем заложен принцип трансвекторного управления (FOC), который заключается в раздельном управлении магнитным потоком и моментом АД с помощью независимых составляющих тока статора, соответствующих проекциям вектора тока на оси системы координат.

нат, ориентированной по направлению вектора магнитного потока. Это определение соответствует управлению токами якоря и обмотки возбуждения ДПТ. Рассматривается расчетная модель двигателя, которая используется при формировании закона управления различных систем управления.

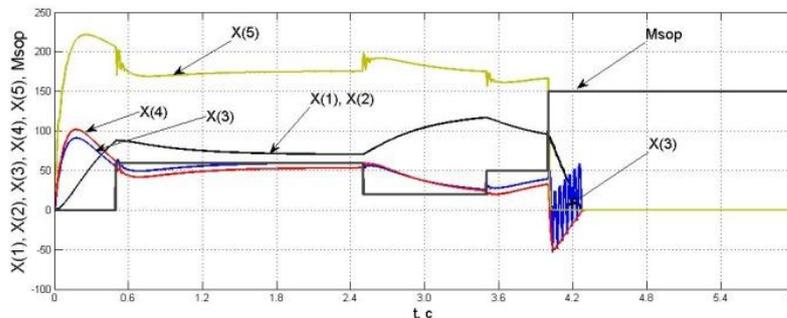


Рисунок 2. Режим нагрузки и остановки.

При построении модели оптимально расчета регулятора скорости АД рассматривается система токового управления:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = \dot{\psi}_r &= \frac{R_r L_m}{L_r} i_{id} - \frac{R_r}{L_r} x_1, \\ \dot{x}_2 = \dot{\omega} &= (M_e - M_s) / J_1, \\ M_e &= \frac{3 L_m P_n}{2 R_r} \psi_r i_{1q}, \end{aligned} \tag{19}$$

где  $\psi_r, R_r, L_r, L_m, P_n, i_{1d}, i_{1q}, k_m$  – параметр параметры асинхронного двигателя.

Для построения закона управления принимаем макропеременную  $\psi_2$ :

$$\psi_2 = x_2 - x_2^* = 0. \tag{20}$$

Из условия (20) следует  $x_1 = \frac{1}{b_8 i_{1q}} M_s - \frac{1}{i_{1q}} (x_2 - x_2^*)$ .

Считаем, что поток сцепления  $\psi_{2e}$  находится в зависимости от частоты вращения

$$\psi_1 = x_1 - \gamma = 0, \quad \gamma = x_1. \tag{21}$$

Используя уравнение (19) и макропеременную (21) определяем закон управления

$$u(i_{1d}) = \rho_1 x_1 + \rho_2 \frac{1}{i_{1q}} M_s - \rho_3 \frac{1}{i_{1q}} (x_1 - x_1^*), \tag{22}$$

где

$$\rho_1 = \frac{1}{b_6} \left( b_1 - \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \right), \quad \rho_2 = \frac{1}{b_6 b_8} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right), \quad \rho_3 = \frac{1}{b_1 b_6 b_8 T_1 T_2}, \quad b_6 = \frac{L_m R_r}{L_r}, \quad b_8 = \frac{3 L_m p_n}{2 L_r},$$

$T_1, T_2$  – весовые параметры оптимизации закона управления.

Полученный закон управления (22) отражает зависимость от координаты скорости  $x_1$ , значения момента сопротивления  $M_s$  и задающего условия режима работы. Аналитическая составляющая устанавливает структуру закона в зависимости от физических свойств объекта управления (координат и параметров системы)

На рис. 3 приведена реализация токового закона управления, который широко используется в промышленных системах частотного управления АД.

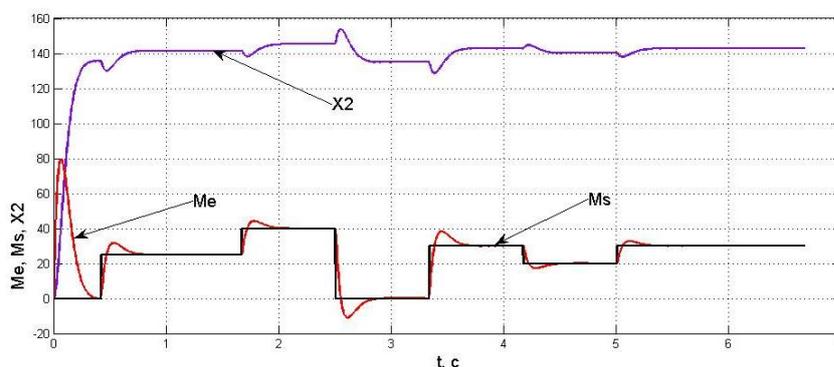


Рисунок 3. Система токового управления.

### 6. Оптимизационный поиск параметров ДМС с наблюдателем состояния

Исходный объект управления (6) допускает измерение только угловой скорости  $x_1$ , все остальные координаты недоступны измерению. Реализация закона управления (12) связана с процедурой восстановления координат  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4, \hat{x}_4 = \zeta$  системы уравнений ДМС, что приводит к следующей записи (1).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (u - x_3) b_1, \\ \dot{x}_2 &= (x_3 - \zeta) b_2, \\ \dot{x}_3 &= (x_1 - x_2) b_3, \\ \hat{x}_1 &= (\hat{u} - x_3) b_1 + h_1 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_2 &= (\hat{x}_3 - \hat{x}_4) b_2 + h_2 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_3 &= (\hat{x}_1 - \hat{x}_2) b_3 + h_3 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_4 &= h_4 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{u} &= a_1 \hat{x}_3 - a_2 \hat{x}_4 - a_3 (\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + a_4 \beta (x_1^* - \hat{x}_1). \end{aligned} \tag{23}$$

Задан вектор параметров  $va = [J_1, J_2, c_{12}, \omega_1, \omega_3, h_1, h_2, h_3, h_4]^T$ . Поиск оптимальных значений вектора варьируемых параметров  $va$  связан с выполнением принятых условий, для которых момент инерции  $J_1$  может изменяться в небольших пределах

$0,09 \leq J_1 \leq 0,11$ , а другие параметры определены ориентировочно  $0,3 \leq J_2 \leq 0,5$ ,  $2000 \leq c_{12} \leq 3000$ . Коэффициенты закона также подлежат определению.

Для них задан следующий диапазон изменения  $0,008 \leq \omega_1 \leq 0,05$ ;  $0,008 \leq \omega_3 \leq 0,05$ ;  $10,0 \leq h_1 \leq 500,0$ ;  $1,0 \leq h_2 \leq 1000,0$ ;  $1,0 \leq h_3 \leq 5000,0$ ;  $1,0 \leq h_4 \leq 10000,0$ ; момент сопротивления задан графиком. Задано необходимое начальное, конечное состояние, шаг интегрирования, точность. При выполнении расчётов каждого критерия модели оптимизационного расчёта введены критериальные ограничения на максимальные значения. Согласно рекомендации [5] при оптимизации принято число расчетных вариантов  $I = 1024$ . В результате решения задачи оптимизации параметров системы (23) с учетом макропеременных (7), критериев (8), с общим числом расчетных вариантов 1024, сформировано множество расчетных вариантов  $I_0(i_{rt}) = \{102, 128, 331, 625, 753, 867, 1012, -1\}$ , оптимальное по Парето. На множестве  $I_0(i_{rt})$  принят вариант  $i_{rt}^o = 753$ , исходя из условия равноправности всех критериев со следующими значениями вектора варьируемых параметров:  $J_1 = 0,105 \text{ кгм}^2$ ;  $J_2 = 0,365 \text{ кгм}^2$ ;  $c_{12} = 2358 \text{ Нм/рад}$ ;  $\omega_1 = 0,0328$ ;  $\omega_3 = 0,0137$ ;  $h_1 = 430,6$ ;  $h_2 = 35,15$ ;  $h_3 = 16,65$ ;  $h_4 = 9111$ . Для принятого варианта расчёта  $i_{rt}^o = 753$  на рис. 4 приведены графики переходных процессов  $u$ ,  $x(1) = x_1$ ,  $x(3) = x_3$ ,  $M_c = \zeta$  полученного закона, а на рис. 5 графики восстановленных координат  $u = \hat{u}$ ,  $x(1.1) = \hat{x}_1$ ,  $x(3.1) = \hat{x}_3$ ,  $x_4 = \hat{x}_4 = \hat{\zeta}$ .

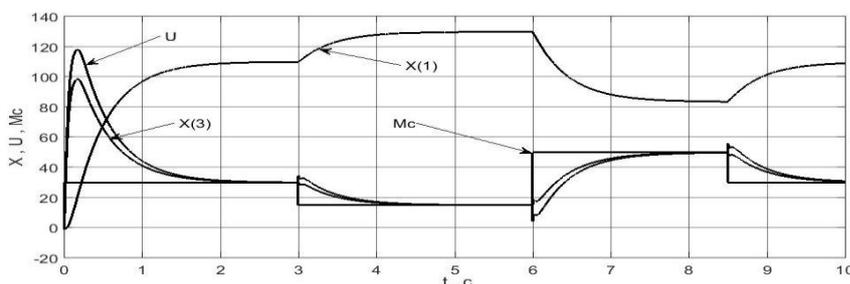


Рисунок 4. Графики переходных процессов системы (23).

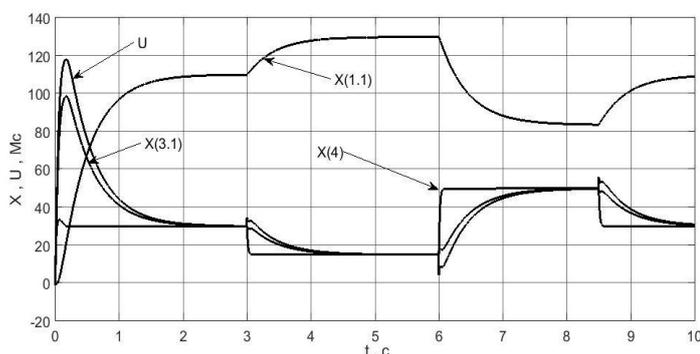


Рисунок 5. Восстановление координат системы (23).

### 7. Заключение.

Приведенные в статье исследования позволяют сформулировать следующие:

1. Сеточный  $ММ_\tau$ -поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления предусматривает использование модели оптимизационного расчета

нелинейной динамической системы для определения оптимальной совокупности варьируемых параметров, структуры системы управления, для разработки рекомендаций по реализации системы управления. Метод обеспечивает исследование пространства большой размерности за счет использования генератора SobolSeq370 и генератора SobolSeq32000, обеспечивает расположение оптимальных траекторий системы в окрестности притягивающего многообразия, построенного на основе неформализованных процедур анализа системы. Желаемые свойства движения уравнений системы, т.е. программа и движение, заданы некоторой совокупностью инвариантных многообразий, удовлетворяющих, в частности, функциональным уравнениям, которые являются уравнениями Эйлера-Лагранжа для сопровождающего функционала.

2. Поисковый метод определяет алгоритм синтеза системы управления. Алгоритм выполняет определение математического выражения структуры и отыскания значений вектора переменных параметров управления нелинейной динамической системы с учетом неопределенности параметров и внешних факторов.

3. Разработанный метод позволяет инженерному составу решать прикладные задачи оптимизации и синтеза законов управления различных промышленных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Пятибратов, Г. Я. Ресурсосберегающее управление усилиями в упругих передачах и исполнительных устройствах электромеханических систем и комплексов / Г. Я. Пятибратов // Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. – СПб.: СПбГПУ, 2007. – С. 58-60.

2. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. ISBN 5-283-00642-5.

3. Панкратов, В. В. Синтез двухмассой электромеханической системы регулируемой скорости методом сигнально-адаптивной обратной модели / В. В. Панкратов, Е. С. Кучер, А. А. Татарникова // VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2014. – Т.1. – С. 234-239.

4. Кузнецова, О. А. Сеточный ЛПТ-поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления сложны динамическим объектом / О. А. Кузнецова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (63). – С. 49-59.

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

6. Колесников, А. А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. / А. А. Колесников. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с. ISBN 5-484-00198-6.

7. Кузнецова, О. А. Поисковый метод синтеза закона управления упругим моментом электропривода постоянного тока / О. А. Кузнецова // Электромеханические системы и комплексы. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – С. 224-234.

Поступила в редколлегию 25.03.2021г.