

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

М.В. Грязев, О.А. Кузнецова, В.А. Сушкин

*Тульский государственный университет, Россия, г. Тула
o.a.kuznetsova@mail.ru, v.a.sushkin@gmail.com*

Аннотация

В статье рассмотрена возможность многокритериальной оптимизации управления двухмассовой электромеханической системы с помощью адаптивного метода исследования пространства параметров, использующего точки $ЛПП_{\tau}$ -последовательности.

Ключевые слова: оптимальное управления, электромеханическая система, многокритериальная оптимизация, множество Парето, критерии.

MULTICRITERION OPTIMIZATION MANAGEMENT OF ELECTROMECHANIC SYSTEM WITH TWO MASSES

M.V. Gryazev, Kuznetsova O.A., V.A.Sushkin

*Tula State University, Tula, Russia
o.a.kuznetsova@mail.ru, v.a.sushkin@gmail.com*

Abstract

This article considers the possibility multicriterion of optimization of the managerial electro mechanic system with two masses by adaptive research method of parameters' space, using Sobol sequences.

Key words: optimal control, electro mechanic system, multicriterion optimization, ensemble Pareto, criteria.

Актуальность работы

В промышленности и технике широко распространены различные механические колебательные системы, модели которых имеют ряд отличительных особенностей с точки зрения проблем управления. Считаю, что электромеханическая система осуществляет управляемое преобразование электрической энергии в механическую с целью приведения в движение исполнительный орган рабочей машины. Многокритериальная оптимизация затрагивает вопросы поиска оптимальных параметров самой электромеханической системы и формирование оп-

тимального управления этой системы, которая реализует оптимальные режимы функционирования с учетом неопределенности внешних факторов, параметров системы и требуемых показателей качества.

Корректную постановку задачи поиска оптимальных параметров обеспечивает адаптивный метод исследования пространства параметров (АМИПП) [1,7,19], в котором зондирование пространства выполняется точками \mathcal{LPP}_τ -последовательности, обеспечивающими равномерное исследование пространства параметров, формирование эффективного множества расчетных вариантов с учетом нескольких критериев и принятие решения из множества Парето [19]. Оптимизация, основанная на \mathcal{LPP}_τ -последовательности позволяет решать как задачи поиска оптимальных параметров и оптимальных режимов работы, так и решать задачи синтеза систем управления. АМИПП является модернизацией PSI-метода и в отличие от других является единственным, в основе которого лежит корректное определение допустимого множества решений. Это содействовало тому, что метод стал одним из основных инструментов в решении инженерных задач оптимизации, расширяющих возможности прямых методов, не использующих в процессе поиска решения необходимые и достаточные условия оптимальности.

Постановка задачи

Постановка задачи оптимизации основывается на классических работах [14-17], однако имеет характерные особенности, связанные с учетом нескольких критериев и поиском решения на множестве Парето расчетных вариантов [10,19]. Постановка задачи многокритериальной оптимизации параметров электромеханической системы и параметров системы управления отражена в работах [3,6].

Электромеханическая система, как динамический объект, может быть представлен системой дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (1)$$

где $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ - вектор параметров объекта в пространстве состояний объекта, $x \in R^n$, $u = [u_1, \dots, u_k]^T$ - вектор управления, $u \in U \subseteq R^k$, U - ограниченное замкнутое множество, $f(x, u) = [f_1(x, u), \dots, f_n(x, u)]^T$ - вектор функции, соответственно размерности n , описывающий непрерывное однозначное отображение:

$$f(x, u): R^n \times R^k \rightarrow R^n.$$

Для системы дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику объекта управления, заданы начальные условия

$$x^0 = [x_1^0, \dots, x_n^0]^T. \quad (2)$$

Используя классический оптимизирующий функционал (функционал Больца) из задач вариационного исчисления вида [15], для оптимизации приняты критерии следующего вида:

$$\Phi_i = \Theta_i(x(t_y)) + \int_0^{t_y} F_i(x(t), u(t)) dt \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где t_y - длительность процесса управления, m - число критериев. Первое слагаемое выражения (3) характеризует точность управления конечным состоянием системы. Второе слагаемое определяет качество процесса управления на интервале $[0, t_y]$ и выполнение ограничений

$$J_o = \int_0^{t_y} r_l(x, u) dt \leq 0, \quad l = \overline{1, p}. \quad (4)$$

Считаем, что определен класс однозначных отображений, мощность которого ограничена

$$S = \{st_i(x, A): i = \overline{1, l}\}, \quad (5)$$

где A - вектор параметров, $st(x, A): R^l \times R^n \rightarrow R^n$.

Решение задачи (1)-(4) представляет оптимальное множество Парето

$$P = \{s\tilde{t}_j(x, A) \in S: i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}. \quad (6)$$

Множества Парето сформировано при следующих условиях [15,19]

$$\begin{aligned} \forall st(x, A) \in S, \quad \forall A \in R^n \quad \exists s\tilde{t}(x, A) \in P \quad \exists \tilde{A} \in R^n \\ \Phi(s\tilde{t}(x, \tilde{A})) \leq \Phi(st(x, A)), \end{aligned}$$

где $\Phi(st(x, A)) = [\Phi_1(st(x, A)) \dots \Phi_m(st(x, A))]^T$ - вектор выполненных критериев (3), считая, что $u = st(x, A)$ и выполняются условия $\Phi(st'(x, A)) \leq \Phi(st''(x, A))$, если $\Phi_i(st'(x, A)) \leq \Phi_i(st''(x, A))$, $i = \overline{1, m}$, и $\exists \Phi_k(st'(x, A)) < \Phi_k(st''(x, A))$, $1 \leq k \leq m$.

Стратегия поиска

В электромеханических системах известны три эквивалентных способа описания движения — на основе второго закона Ньютона, уравнений Лагранжа и формализма Гамильтона. Все эти способы приводят к одинаковым результатам путем пересчета начальных условий из одной системы координат в другие. Эти способы обеспечивают учет энергии в уравнениях движения и позволяют использовать полную энергию при определении критериев и другие инварианты свободного движения. Энергия представляет собой не только основной инвариант реальной динамической системы, но и меру взаимодействия различных подсистем. Внутренняя энергия динамической системы является мерой ее возможности совершения работы. Задача изменения энергии за счет внешних управляющих воздействий имеет как теоретическое, так и практическое значение. Это положение хорошо согласуется при оптимизации, когда критерии связаны с энергией, с потерями и т.д. [11, 12]. Исключительное значение энергии как функции состояния системы состоит в том, что функционал полной энергии - гамильтониан — является основой для построения математического описания динамики системы. Математическая модель оптимизационного расчета системы задана в гамильтоновой форме:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H(q, p, u)}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H(q, p, u)}{\partial q_i}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где n - число степеней свободы, $q = col(q_1, \dots, q_n)$, $p = col(p_1, \dots, p_n)$ - векторы обобщенных координат и обобщенных импульсов, образующие вектор состояния системы $x = col(q, p)$; $H = H(q, p, u)$ - гамильтониан системы; $u(t) \in R^m$ - вход (вектор внешних обобщенных сил). Предполагаем в этом случае, что гамильтониан $H(q, p, u) = H(x, u)$ - непрерывно дифференцируемая функция своих аргументов и линеен относительно управления u :

$$H(q, p, u) = H_o(q, p) + H_1(q, p)^T u,$$

где $H_o(q, p)$ - гамильтониан свободной системы; $H_1(q, p)$ - m -мерный вектор независимых гамильтонианов взаимодействия. Предложенный подход использован при разработке моделей оптимизационного расчета динамической системы в работах [4,5,6].

С помощью разработанного метода многокритериальной оптимизации [7] и программного комплекса [1] решались задачи по отысканию оптимальной совокупности варьируемых параметров с учетом нескольких критериев, отражающих желаемые характеристики системы [8,12,13].

В дальнейших разработках по многокритериальной оптимизации предложен поисковый метод оптимизации системы управления. Такой подход позволяет формировать управление, которое обеспечивает не только оптимальные траектории движения, но и управление упругим моментом электромеханической системы в слабом звене.

Таким образом, перечисленные работы показывают возможность рассматривать вопросы оптимального управления, находить структуру и значения параметров системы управления, применительно к динамическому объекту.

При формировании оптимального управления электромеханической системы (1) могут быть использованы классические способы построения системы управления [14,17] или способы, которые находят отражения в современных исследованиях.

Приведенные исследования по оптимизации систем управления показывают, что системы управления, построенные в зависимости от времени, имеют худшие показатели относительно систем, построенных в пространстве состояний. Возможность формирования управления в пространстве состояния приведена в работе [2,6,7]. Из различных способов формирования оптимального управления следует выделить синергетический подход А.А. Колесникова [17], сетевой оператор [15] и нейросетевые технологии.

Перейдем к рассмотрению задачи управления нелинейной двухмассовой системой, наиболее характерной для целого класса задач управления колебательными механическими системами.

Двухмассовая модель в определенной мере отражает разнообразные реальные механические системы — от ориентации космических аппаратов до поведения различных манипуляционных роботов, маятниковых и транспортных систем. Эта модель из-за своих отличительных динамических особенностей стала своего рода «пробным камнем», тестом на эффективность для методов теории управления — от

классических линейных методов, опирающихся в основном на ПИД-регуляторы, до современных методов, базирующихся на технологии FNN — Fuzzy Neural Networks с использованием некоторой комбинации нечеткого регулятора совместно с ПИД-регулятором

Применение ЛП_τ-поиска при синтезе закона управления

В статье приведены результаты, связанные с применением поисковой оптимизации для решения задачи структурно-параметрического синтеза (1)-(6). Структура управления формируется согласно выражения (5).

При принятых допущениях [8] систему уравнений динамического объекта привести к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (U - x_3)/J_1, \quad \dot{x}_2 = (x_3 - M_c)/J_2, \\ \dot{x}_3 &= (x_1 - x_2)C, \quad \dot{x}_3^* = (\beta(\omega_0 - x_1) - x_3^*)/T_e, \end{aligned} \quad (7)$$

где β - статическая жесткость характеристики двигателя, T_e - электромагнитная постоянная времени двигателя, ω_0 - синхронная частота вращения двигателя, J_1, J_2 - моменты инерции, C - упругий элемент, x_1, x_2 - скорости первой и второй масс, x_3 - упругий момент, x_3^* - заданная величина момента, определяемая линейной характеристикой электродвигателя.

Для синтеза оптимального закона управления в математическую модель системы необходимо ввести макропеременные Ψ_1, Ψ_2 , которые выбираются из условий формирования желательных свойств системы.

Закон управления должен обеспечивать движение системы с макропеременными Ψ_1, Ψ_2 на инвариантных многообразиях с постоянными времени T_1, T_2 .

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= x_3 - x_3^* = 0, \quad \Psi_2 = x_3 - \xi = 0, \\ T_1 \dot{\Psi}_1 + \Psi_1 &= 0, \quad T_2 \dot{\Psi}_2 + \Psi_2 = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где ξ - желаемая траектория скорости первой массы.

В качестве критериев оптимальности приняты:

$$\Phi_1 = \int_0^{t_y} (T_1^2 \dot{\Psi}_1^2 + \Psi_1^2 + T_2^2 \dot{\Psi}_2^2 + \Psi_2^2 + U^2) dt, \quad (9)$$

$$\Phi_2 = \int_0^{t_y} \Psi_1^2 dt, \quad \Phi_3 = \int_0^{t_y} \Psi_2^2 dt, \quad \Phi_4 = \int_0^{t_y} H dt. \quad (10)$$

Структура первого критерия (9) принята согласно работе А.М. Летова [14].

Закон управления динамическим объектом представлен в пространстве состояния и имеет линейную форму

$$U = a_1 x_3 + a_2 M_c + a_3 \dot{x}_3 + a_4 x_3^*, \quad (11)$$

где \dot{x}_3 - производная упругого момента, M_c - момент сопротивления, a_1, \dots, a_4 - коэффициенты поисковой оптимизации.

В уравнение (11) введено слагаемое $a_3 \dot{x}_3$, которое обеспечивает устойчивость при решении задачи вместо отдельных слагаемых, учитывающих скорости x_1 и x_2 .

Для двухмассовой системы при $J_1 = 0,102 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 0,408 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $C = 2000 \text{ Н/рад}$, определен диапазон варьирования параметров

$$1,0 \leq a_1 \leq 1,3; \quad 0,1 \leq a_2 \leq 0,3; \quad 0,001 \leq a_3 \leq 0,004;$$

$$0,1 \leq a_4 \leq 0,8; \quad 0,1 \leq T_1 \leq 0,8; \quad 0,1 \leq T_2 \leq 0,8.$$

В результате решения оптимизационной задачи (2) с учетом макропеременных (8) и критериев (9),(10) сформировано множество расчетных вариантов, оптимальных по Парето, из которого принят расчетный вариант для оптимального закона управления со следующими значениями параметров

$$a_1 = 1,191, a_2 = 0,25, a_3 = 0,00346, a_4 = 0,0586,$$

$$T_1 = 0,02949, T_2 = 0,02949.$$

Графики переходных процессов для оптимального управления приведены на рис. 2, а на рис. 1 без оптимального управления.

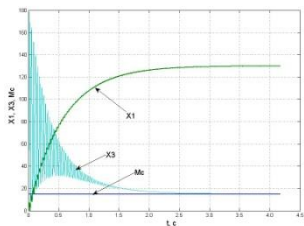


Рис. 1. График переходного процесса без управления

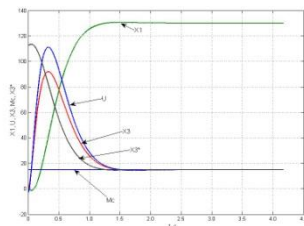


Рис. 2. График переходного процесса с управлением

Особый интерес вызывает работа динамической системы при периодическом характере изменения момента сопротивления M_c , приведенного на рис. 3.

Момент сопротивления за период времени до 10 с имеет наибольшее значение $M_c = 10 \div 15 \text{ Нм}$, $M_c = 15 + 25 \sin(30t)$; $M_c = 20 \div 25 \text{ Нм}$, $M_c = 15 + 20 \sin(60t)$.

Оптимальный закон управления (13) обеспечивает минимальное значение упругого момента X_3 , график которого приведен на рис. 4.

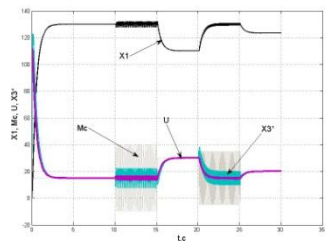


Рис. 3. График переходного процесса при периодической нагрузке

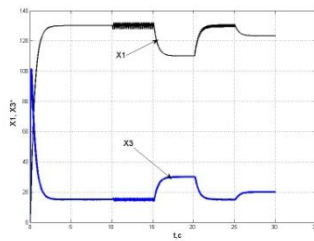


Рис. 4. График изменения x_1, x_3 при периодической нагрузке

Поисковый метод определения параметров управляющего воздействия (11) можно распространить на формирование управления из класса S (5) однозначных отображений. Основная проблема заключается в генерации структуры $u = st(x, A)$. Для этого разработан алго-

ритм, использующий точки $ЛП_{\tau}$ -последовательности [18], нейронную сеть и открытую базу унарных операций. Результатом работы алгоритма является закон управления, который реализует эталонную модель для нейроконтроллера (рис. 5).

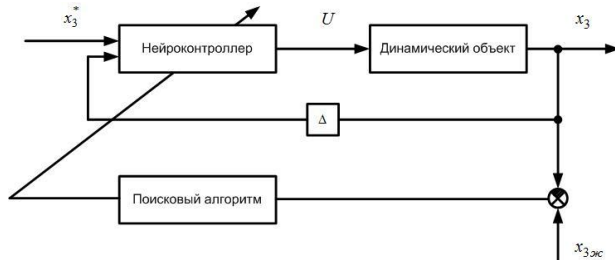


Рис. 5. Схема обучения нейроконтроллера

Заключение

Применение адаптивного метода исследования пространства параметров, использующий точки $ЛП_{\tau}$ -последовательности, позволяет решать задачи поиска оптимальной совокупности параметров с учетом нескольких критериев и выполнять синтез законов управления электромеханической системы на основе поиска оптимальных параметров системы управления. За счет поиска оптимальных параметров, распределенных на заданном интервале, формируется программное управление с учетом нескольких критериев и ограничений.

Полученные результаты решения задачи оптимального управления показывают, что методом АМИПП осуществляется поиск управляющего воздействия с необходимой точностью и распространяем на нелинейные системы с ограничениями. Выполняется построение системы управления с пространственной траекторией, программных систем и систем со стабилизацией выходного параметра.

Список литературы

1. Афанасьева С.М., Кузнецова О.А. Программный комплекс многокритериальной оптимизации // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». Выпуск 1. Том 9. Технические науки. - Одесса: КУПРИЕНКО. - 2013. - С. 22-24.
2. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Поиск оптимальной структуры системы управления динамическим объектом // Механика и процессы управления. Т.3. Материалы XXXII Всероссийского симпозиума. -

М.: РАН. – 2012. - С 50-59.

3. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Применение $ЛПТ$ - последовательности при оптимизации динамического объекта // Известия ТулГУ. Естественные науки. - Тула: Изд-во ТулГУ. – 2013. - Т.1. - С. 142-153.

4. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Оптимальное управление асинхронным электроприводом // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5: в 3 ч. - Ч.2. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2011. - С.212-220.

5. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Формирование оптимального управления электромеханическими системами // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5: - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2012. - С.130-135.

6. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Оптимизация параметров и системы управления динамического объекта с упругими связями // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта. - М.: Изд-во МАИ. - 2013. - С. 761-763.

7. Кузнецова, О.А. Адаптивный метод исследования пространства параметров. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - 288 с.

8. Кузнецова О.А. Многокритериальная оптимизация асинхронного электропривода // под ред. В.А. Сушкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. - 104 с.

9. Кузнецова О.А. Формирование управления в пространстве варьируемых параметров // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. – 2010. - Т. 5. - №3. - С.61-62.

10. Кузнецова О.А. Многокритериальная концепция оптимального управления динамическим объектом // Съом мїжнародна науково-практична конференція. Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2012. Тези доповідей. - С.411-415.

11. Кузнецова О.А. Многокритериальная концепция энергоэффективных режимов электроприводов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: Ч.1. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2011. - С.191-196.

12. Кузнецова О.А. Энергетические особенности регулируемого электропривода // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: Ч.1. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2011. - С.196-203.

13. Кузнецова О.А., Сушкин В.А. Диалоговая система многокритериальной оптимизации и синтеза оптимальных законов управления // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. - 2010. - Т. 4. - №2. - С.47-54.

14. Летов А.М. Динамика полета и управление. - М.: Наука, 1969, - 360 с.

15. Пупков К.А., Фам С.Ф., Дивеев А.И. Синтез оптимального управления динамическим объектом со случайными начальными значениями // Наука и образование. – 2012. – №3. <http://technomag.edu.ru/doc/376455.html>.

16. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. - М.: Дрофа. - 2006. - 175 с.

17. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления // под ред. А.А. Колесникова. Ч.II. - Таганрог: Изд-во ТРТУ. - 2000. - 559 с.

18. Сушкин В.А. Применение многокритериальной оптимизации на основе точек Соболя // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». - Выпуск 1. - Том 9. Технические науки. - Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. - С. 19-21.

19. Сушкин В.А., Кузнецова О.А. Эффективное множество расчетных вариантов оценки электромеханических систем. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2006. - 80 с.

УДК 621.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА

В.В.Шохин, О.В.Пермякова, Е.В.Короткова

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск
shww@mgn.ru*

Аннотация

Проводится моделирование прокатного стана с частотно-регулируемым электроприводом. Структурная схема асинхронного двигателя с преобразователем частоты и система регулирования скорости представлены во вращающейся системе координат с ее ориентацией по вектору потокосцепления ротора, при этом учитываются перекрестные связи в структуре и возможность учета нелинейности кривой намагничивания двигателя. Силовая связь электроприводов клетей учтена известной зависимостью для натяжения в интегральной форме.

Ключевые слова: моделирование электропривода, прокатный стан, асинхронный электродвигатель, регулирование скорости, регулирова-