

УДК 62-83:621.77

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р. техн. наук, проф., зав. отд. ИТПМ НАН
Украины, Харьков,

Т.Б. НИКИТИНА, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. ХНАДУ,
Харьков,

В.В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доц., директор УНППИ УИПА,
Харьков,

В.В. ХОМЕНКО, асп. УИПА, Харьков

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТОХАСТИЧЕСКОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Разработан метод многокритериального синтеза стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, стохастическое робастное управление, многокритериальный синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация.

Постановка проблемы и анализ литературы. Системы автоматического управления, способные обеспечивать высокую точность при наличии интенсивных задающих и возмущающих воздействий, а также при изменении структуры и параметров объекта управления в ходе функционирования необходимы при создании новых поколений техники и новых технологий. К таким системам управления обычно предъявляются весьма разнообразные и часто противоречивые требования при их работе в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. [1].

Системы робастного управления [2 – 4] являются одним из интенсивно развивающихся направлений современной теории систем управления и имеют существенно меньшую чувствительность к изменению структуры, параметров объекта управления и внешних воздействий. Синтез робастных систем затрудняется, прежде всего, формулированием такого критерия качества робастного управления,

чтобы синтезируемая система удовлетворяла предъявляемым техническим требованиям [5 – 7]. В работах [8 – 9] разработан метод многокритериального синтеза регуляторов, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. При этом выбор матриц, с помощью которых формируется вектор цели робастного управления осуществляется путем решения задачи нелинейного программирования. Для решения этой задачи с ограничениями использован метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming – SQP method). Так как целевая функция является многоэкстремальной, то используется процедура мультистарта для задания начальных точек решения задачи многокритериальной оптимизации из области рассматриваемого пространства с помощью алгоритмов поиска локальных критериев. Такой подход позволяет найти глобальный экстремум, однако требует многократного вычисления целевой функции и значительных затрат машинного времени. В последнее время для решения многоэкстремальных задач математического программирования широкое распространение получили бионические алгоритмы [10 – 11], позволяющие надежно находить глобальный оптимум многоэкстремальных овражных целевых функций и целевых функций с участками типа "плато" и существенно уменьшить количество вычислений целевой функции, и значительно сократить затраты машинного времени.

Целью статьи является разработка метода решения задачи многокритериального синтеза стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе таких систем в различных режимах и сократить время определения параметров стохастических робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем.

Формулировка задачи стохастического робастного управления.

Представим вектор внешних воздействий в виде двух векторов: вектор ω_k включает внешние сигнальные воздействия на объект управления в виде заданий, возмущений и помех измерений, а вектор η_k включает внешние воздействия, которые приводят к изменению состояния системы за счет параметрических и структурных изменений модели объекта управления. Запишем для дискретного объекта управления с вектором состояния x_k разностное уравнение состояния, вектор цели z_k и вектор

измеряемого выхода y_k в стандартной форме, принятой в теории робастного управления [9]:

$$x_{k+1} = Ax_k + B_0\omega_k + B_2u_k + B_1\eta_k, \quad (1)$$

$$z_k = C_1x_k + D_{12}u_k, \quad (2)$$

$$y_k = C_2x_k + D_{21}\omega_k. \quad (3)$$

Таким образом, входными векторами этого объекта робастного управления являются вектор управления u_k и векторы внешних сигнальных ω_k и параметрических η_k возмущений.

Будем искать регулятор такой системы в виде дискретной динамической системы, заданной следующим разностным уравнением

$$\xi_{k+1} = \hat{A}\xi_k + \hat{B}y_k, \quad (4)$$

$$u_k = \hat{C}\xi_k. \quad (5)$$

Входом этой динамической системы (4) – (5) является вектор измеряемых переменных y_k , а ее выходом является вектор управления u_k исходной системы (1).

При синтезе робастного управления будем считать вектор внешних параметрических возмущений η_k независимым, а задачей синтеза робастного управления является минимизация принятой нормы вектора цели $\bar{z}(t)$ (2) по вектору управления u_k , и максимизация этой же нормы вектора цели $\bar{z}(t)$ по вектору параметрических возмущений η_k . При таком подходе с помощью робастного управления фактически минимизируется чувствительность системы к параметрическим возмущениям.

В настоящее время одним из интенсивно развивающихся подходов к синтезу стохастических робастных систем управления является синтез регуляторов, минимизирующих анизотропийную норму вектора цели управления [5 – 7]. Решение задачи синтеза стохастического робастного управления (4) – (5), с помощью которого минимизируется средняя анизотропия системы, сводится к вычислению четырех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [2 – 4]. Однако при проектировании реальных систем управления не предъявляются требования к величине анизотропийной нормы вектора цели, да и сам вектор цели робастного управления обычно не задан. Основные

трудности практического применения современных методов управления связаны не столько с разработкой новых методов управления, сколько с неформальным выбором вектора цели робастного управления. Введем вектор искомым параметров X , компонентами которого являются матрицы C_1 и D_{12} , в виде

$$X = \{C_1, D_{12}\}, \quad (6)$$

с помощью которых формируется вектор цели робастного управления (2) исходной системы (1).

Требования, предъявляемые к проектируемым системам управления. К проектируемым многомассовым системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах [1]. Как правило, накладываются определенные ограничения на качество переходных процессов – задается время первого согласования, время регулирования, перерегулирование и т.д. Обычно также задается максимальная дисперсия ошибки слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсация случайных возмущающих воздействий, и при этом, естественно, должны выполняться ограничения на переменные состояния и управления. Еще одним требованием, предъявляемым к системам управления, является ограничение ошибок отработки задающих, либо компенсации возмущающих воздействий в виде гармонических сигналов. При этом может быть задан входной сигнал одной частоты, либо несколько характерных рабочих частот, а может быть задан диапазон рабочих частот, в котором необходимо выполнить определенные условия [9].

Для таких систем в большинстве практических случаев с помощью типовых ПИД регуляторов не удастся выполнить технические требования, предъявляемые к системе, что обуславливает применение более сложных регуляторов и современных методов их синтеза и, в частности, робастного управления.

Формирование нелинейной схемы компромисса при многокритериальном синтезе многомассовых систем. Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации используется простейшая нелинейная схема компромиссов [1], при которой исходная многокритериальная задача сводится к однокритериальной. Такая нелинейная схема компромиссов соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой. При этом предполагается, что исходная точка является допустимой. При синтезе многомассовых электромеханических систем обычно бывает ситуация, когда по ряду локальных критериев исходная точка является недопустимой. В

частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности обработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других локальных критериев качества. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза вообще не могут быть выполнены. Однако при этом ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в рассматриваемой схеме компромиссов используется комбинация метода штрафных функций с внутренней точкой для локальных критериев, являющихся допустимыми и метод штрафных функций с внешней точкой для локальных критериев, являющихся недопустимыми.

Тогда исходная многокритериальная задача оптимизации вектора искомых параметров (6) с помощью такой нелинейной схемы компромиссов сводится к однокритериальной задаче нелинейного программирования

$$f(x^*) \leq f(x), \quad (7)$$

при ограничениях

$$D = \{ \forall x \in R^n \mid g_i(x) \leq 0, \quad i = \overline{1, l}; \quad h_j(x) = 0, \quad j = \overline{1, m} \}. \quad (8)$$

Алгоритм решения многоэкстремальной задачи нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации. При решении задач многокритериального синтеза стохастических робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем было установлено [9], что целевая функция исходной задачи нелинейного программирования (7), полученная в результате сворачивания локальных критериев и ограничений с помощью такой нелинейной схемы компромиссов [1], является многоэкстремальной и для ее вычисления требуется значительное время. В целевой функции (7) имеются многомерные овраги и области, в окрестности которых значение целевой функции меняется очень медленно, вследствие чего применение классических методов оптимизации является малоэффективным. В первую очередь это связано с тем, что использование градиентов целевой функции и ограничений не только требует проведения дополнительных вычислений целевой функции, увеличение количества которых нежелательно, но может также привести к явлению "блуждания" по дну оврага или медленному продвижению к глобальному оптимуму при нахождении в окрестности участка типа "плато". Кроме того, высока вероятность попадания в область притяжения одного из локальных экстремумов с невозможностью выхода из него на следующих шагах оптимизационного процесса.

Применение бионических алгоритмов для решения многоэкстремальных задач математического программирования показало их высокую эффективность нахождения глобального оптимума таких целевых функций. Среди большого разнообразия бионических алгоритмов наиболее перспективными являются стохастические мультиагентные методы, к которым относится оптимизация роем частиц [10 – 11], в котором частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска.

При этом вероятность генерации новой связи равна

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{s}\right)^K, \quad (9)$$

а вероятность наличия у частицы n информаторов равна

$$p(n) = C_{s-1}^{n-1} \left(\frac{K}{s}\right)^{n-1} \left(1 - \frac{K}{s}\right)^{s-n}. \quad (10)$$

Алгоритм движения частиц описывается следующей рекуррентной зависимостью

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \chi[v_i(t) + \varphi_{i1}(t)(p_i(t) - x_i(t)) + \varphi_{i2}(t)(g_i(t) - x_i(t))], \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1). \end{aligned}$$

Здесь x_i и v_i – соответственно положение и скорость i -ой частицы, χ – шаг по скорости движения. Функции φ_{i1} и φ_{i2} характеризуют соответственно притяжение i -ой частицы к локальному оптимуму p_i , определяемому i -ой частицей и к глобальному оптимуму g_i , определяемому всеми частицами роя. Таким образом, функции φ_{i1} и φ_{i2} характеризуют отталкивание и притяжение частиц роя. При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, что позволяет находить глобальный оптимум за меньшее количество итераций. Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближения к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Результаты моделирования на ЭВМ. В качестве примера рассмотрим динамические характеристики многомассовой электромеханической следящей системы [8] с синтезированными

стохастическими робастными регуляторами. Одной из основных характеристик такой следящей системы является ошибка слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсации случайных возмущающих воздействий. На рис. 1 показана реализация случайного процесса изменения угла поворота объекта управления $\varphi(t)$ при случайном изменении момента внешнего сопротивления, действующего на объект управления при его установке на подвижном основании, движущемся с заданной скоростью по неровной поверхности с нормированными характеристиками неровностей. Другими важнейшими характеристиками такой следящей системы являются показатели качества переходных процессов в различных режимах работы.

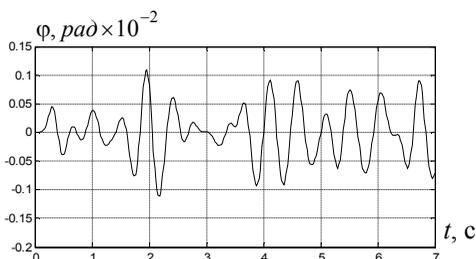


Рис. 1. Реализация случайного процесса изменения угла поворота объекта управления при случайном изменении момента внешнего сопротивления

На рис. 2 показан переходный процесс угла поворота объекта управления $\varphi(t)$ при отработке системой заданного рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$ между фактическим и заданным углом поворота объекта управления.

Процессы, показанные на рис. 1 и рис. 2, построены для одного набора параметров объекта управления из заданных в техническом задании диапазонов изменения параметров объекта управления. Результаты сравнений полученных динамических характеристик рассмотренной многомассовой электромеханической следящей системы показали, что применение синтезированного стохастического робастного управления позволило уменьшить ошибку компенсации случайного внешнего возмущения в 1,3 – 1,5 раза, сократить время переходных процессов в 1,5 – 2 раза в зависимости от принятого набора параметров объекта управления и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с существующей системой с типовыми регуляторами.

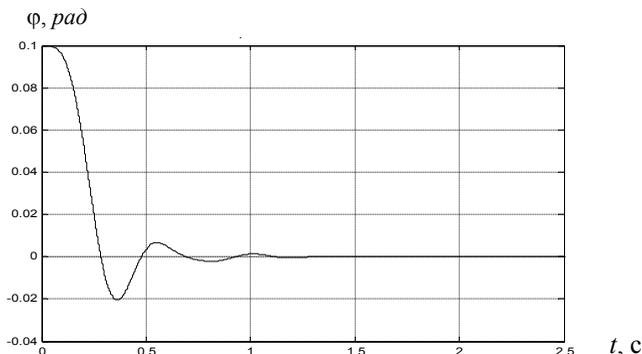


Рис. 2. Переходный процесс угла поворота объекта управления при отработке системой рассогласования между фактическим и заданным углом поворота объекта управления

Выводы. На основе стохастической мультиагентной оптимизации роум частиц разработан метод решения сформулированной многоэкстремальной задачи нелинейного программирования с ограничениями, к которой с помощью нелинейной схемы компромиссов сводится синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах работы, и существенно сократить время решения задачи. Показано, что применение синтезированных стохастических робастных регуляторов позволило уменьшить ошибку компенсации случайного внешнего возмущения, сократить время регулирования и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Список литературы: 1. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с. 2. Diamond P. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – P. 28-42. 3. Vladimirov I.G. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem / I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA), 1996. – P. 427-432. 4. Semyonov A.V. Stochastic approach to H_∞ -optimization / A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – P 2249-2250. 5. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с. 6. Штойер Р. Многокритериальная

оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Под ред. А.В. Лотова. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с. 7. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматгиздат, 2004. – 176 с. 8. *Кузнецов Б.И.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с. 9. *Никитина Т.Б.* Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / Т.Б. Никитина. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с. 10. *Clerc. M.* Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 11. *Gazi V.* Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p.

Bibliography (transliterated): 1. *Voronin A.N.* Многокритериальный синтез динамических систем / A.N. Voronin. – К.: Naukova dumka, 1992. – 160 с. 2. *Diamond P.* Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – P. 28-42. 3. *Vladimirov I.G.* State-space solution to anisotropy-based stochastic H_{∞} -optimization problem / I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – P. 427-432. 4. *Semyonov A.V.* Stochastic approach to H_{∞} – optimization / A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – P. 2249-2250. 5. *Batishhev D.I.* Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / D.I. Batishhev, D.E. Shaposhnikov. – Nizhny Novgorod: IPF RAN, 1994. – 92 с. 6. *Shtojer R.* Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Под ред. А.В. Лотова. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с. 7. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматгиздат, 2004. – 176 с. 8. *Kuznetsov B.I.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / B.I. Kuznetsov, T.B. Nikitina, V.V. Kolomiets. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с. 9. *Nikitina T.B.* Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / T.B. Nikitina. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с. 10. *Clerc. M.* Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 11. *Gazi V.* Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p.

Поступила (received) 25.02.14.

Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Kuznetsov Borys, , Dr.Sci.Tech, Professor
State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism"
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Str. Industrialnaya, 19, Kharkov, Ukraine, 61106
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: bikuznetsov@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-1100-095X

Nikitina Tatyana, , Dr.Sci.Tech, Professor
Kharkov National Automobile and Highway University
Str. Petrovskogo, 25, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: bikuznetsov@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-0185-3078

Kolomiets Valery, Cand.Tech.Sci.
Training and Research Institute of Professional Education
of the Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
Str. Universitetskaya, 16, Kharkov, Ukraine, 61003
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: pr.etfuipa@yandex.ru
ORCID ID 0000-0002-9073-5793

Khomenko Viktor, master
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
Str. Universitetskaya, 16, Kharkov, Ukraine, 61003
Tel.: (095)712-88-18, e-mail: vitman_@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-9826-1123