

УДК 621.3.076

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ
МНОГОМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ
АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ РОЕМ ЧАСТИЦ**

Аннотация. Разработан метод многокритериального синтеза анизотропийного регулятора комбинированного робастного управления многомассовой электромеханической системой на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Приведены примеры сравнения динамических характеристик многомассовых систем с синтезированными при многокритериальном подходе анизотропийных регуляторов и с типовыми регуляторами.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, многокритериальный синтез, мультиагентный алгоритм оптимизации.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Создание систем, способных обеспечивать высокую точность управления при интенсивных задающих и возмущающих воздействиях широкого спектра частот, является центральной проблемой современной теории и практики автоматического управления [1].

Анализ последних достижений и публикаций. К проектируемым динамическим системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах: качество переходных процессов задается временем первого согласования, временем регулирования, перерегулированием и т.д.: при отработке случайных задающих, либо компенсации случайных возмущающих воздействий задается дисперсия ошибки слежения либо стабилизации [2]. 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.

Одним из основных требований, предъявляемых к современным системам управления, является требование робастности синтези-

рованной системы, т.е. способность системы сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении в определенных пределах параметров объекта управления и внешних воздействий [3-4]. Одним из интенсивно развивающихся подходов к синтезу робастных систем управления является синтез регуляторов, минимизирующих различные нормы вектора цели управления [5-7]. Для повышения точности управления в робастной системе реализуется комбинированное управление, в котором сочетается управление с обратной связью по выходу объекта управления и управление по разомкнутым циклам как по задающему, так и по возмущающему воздействиям [1, 8]. Эффект комбинированного управления определяется тем, что при синтезе робастного управления используется вся имеющаяся информация о задающем и возмущающем воздействиях [9-10].

Однако при проектировании реальных систем управления не предъявляются требования к нормам вектора цели, да и сам вектор цели робастного управления не задан.

Целью статьи является разработка метода многокритериального синтеза комбинированных многомассовых электромеханических систем стохастического робастного управления, у которых используется информация о задающем и возмущающем воздействиях для минимизации анизотропийной нормы системы на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации рою частиц.

Задачей статьи является многокритериальный синтез и исследование динамических характеристик стохастической робастной системы управления двухмассовой электромеханической системой.

Изложение материала исследования и полученных результатов. Рассмотрим исходную дискретную систему, имеющую n -мерный вектор состояния x , m -мерный вектор входа ω и p -мерный вектор цели z , заданную в пространстве состояний матрицами A , B , C , D , так что

$$x_{k+1} = Ax_k + B\omega_k, z_k = Cx_k + D\omega_k, \quad (1)$$

Средняя анизотопия этой системы равна

$$\bar{A}(G) = -\frac{1}{2} \ln \det \left(\frac{m \Sigma}{\text{Trace}(LPL^T + \Sigma)} \right), \quad (2)$$

где матрица $P \in R^{n \times n}$ есть грамиан управляемости G , удовлетворяющий уравнению Ляпунова, а матрицы L и Σ соответствуют решению

R уравнения Риккати [6]. Решение задачи синтеза анизотропийных регуляторов во временной области в виде матриц A , B , C , D реализации, с помощью которых минимизируется средняя анизотропия системы (2), сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [7].

Если величина анизотропии входной дискретной последовательности системы находятся в диапазоне $0 < a < \infty$, то значение анизотропийной нормы системы $\|w\|_a$ ограничено значениями H_2 и H_∞ нормами системы. Причем, при нулевой средней анизотропии синтез оптимального регулятора, минимизирующего анизотропийную норму, сводится к решению двух уравнений Риккати и такой оптимальный анизотропийный регулятор соответствует оптимальному стохастическому регулятору, минимизирующему дисперсию выходного сигнала – H_2 норму. При бесконечной средней анизотропии входного сигнала, соответствующего полностью определенному детерминированному сигналу, анизотропийный регулятор является оптимальным детерминированным робастным регулятором, минимизирующим H_∞ норму. При значениях средней анизотропии входного сигнала в диапазоне $0 < a < \infty$, анизотропийный регулятор занимает промежуточное положение между регуляторами, минимизирующими H_2 и H_∞ нормы. В настоящее время практически полностью разработана теория детерминированного робастного управления, основанная на решениях уравнений Риккати для синтеза во временной области робастного регулятора и робастного наблюдателя. При этом можно синтезировать регулятор, минимизирующий смешанный критерий, основанный на минимизации H_2 и H_∞ норм, взятых с определенными весовыми множителями. При этом, роль такого весового множителя фактически играет параметр толерантности γ .

Таким образом имеется взаимосвязь различных задач теории стохастического робастного управления с задачей синтеза анизотропийных регуляторов для линейных систем, причем классические H_2 и H_∞ регуляторы являются предельными случаями оптимального анизотропийного регулятора, а оптимальный анизотропийный регу-

лятор минимизирует функционал H_∞ -энтропии замкнутой системы для определенного значения его параметра γ .

Часто к системам управления, кроме требований по точности отработки либо компенсации случайных входных сигналов, предъявляются определенные требования к качеству переходных процессов – времени первого согласования, времени регулирования, перерегулирования и т.д. Таким образом, кроме требований по работе системы при случайных входных сигналах, предъявляются определенные требования по отработке системой детерминированных воздействий – ступенчатых сигналом. Причем, эти требования могут существенно отличаться для переходных процессов при отработке системой «малых» и «больших» воздействий [2].

Кроме того, к системе часто предъявляются определенные требования по отработке гармонических сигналов фиксированных частот, либо заданного диапазона частот, которые также являются детерминированными сигналами. Естественно, что эти требования могут быть удовлетворены при детерминированном подходе синтеза проектируемой системы.

Естественно, что проектируемая система должна одновременно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к работе системы в различных режимах и при различных входных сигналах.

Основной подход к синтезу робастного управления во временной области основан на решении задачи оптимального управления. Однако, в отличие от классического подхода к синтезу систем оптимального управления, при робастном управлении в уравнение состояния исходного объекта управления кроме вектора управления включается также вектор внешних воздействий. Причем вектор внешних воздействий характеризует изменение состояния системы за счет параметрических и структурных изменений модели объекта управления.

Центральная идея синтеза систем робастного управления связана с синтезом системы, минимизирующей критерий качества по норме управления, но максимизирующей этот же критерий по норме вектора внешних воздействий. При этом, за счет введения в функцию Гамильтона нормы вектора внешних воздействий со знаком минус, синтезируемая система минимизирует чувствительность системы к

изменяемым параметрам объекта управления, а следовательно, обеспечивает робастность системы

Такой подход соответствует игровому подходу к задаче оптимизации, когда первый игрок «управление» минимизирует функцию цели, а второй игрок «неопределенные параметры объекта управления» максимизирует эту же функцию цели. Причем, так как исходная система описывается системой дифференциальных уравнений – матричным уравнением состояния, а оба игрока используют одну и ту же функцию цели, то такая игра называется дифференциальной игрой с нулевой суммой.

Исходная система, замкнутая синтезированным анизотропийным регулятором, обладает определенными динамическими характеристиками, которые определяются вектором цели. Возможность решения задачи многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем путем соответствующего выбора вектора цели показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах.

Введем вектор искомых параметров $\chi = \{C, D\}$, компонентами которого являются элементы матриц C и D исходной системы (1), с помощью которых формируется вектор цели z стохастического робастного управления (2). Зададим начальное значение вектора χ , синтезируем анизотропийный регулятор и определим следующие показатели качества замкнутой системы в различных режимах: время отработки заданного угла рассогласования – $t_{рег}$; время разгона до номинальной скорости и время торможения до полной остановки – $t_{раз}$, ошибку отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты $\varepsilon_{гар}$, ошибку стабилизации случайного изменения момента нагрузки $\varepsilon_{сл}$, максимальную скорость наведения ω_{max} , минимальную скорость наведения ω_{min} , неплавность наведения при минимальной скорости $\Delta\omega_{min}$, переменные состояния и управления, которые требуется ограничивать. Пронормируем эти частные критерии y_i , так чтобы они находились в диапазоне $0 \leq y_i \leq 1$. Приближение нормирован-

ного значения i -го частного критерия к единице соответствует напряженной ситуации, а если величина нормированного значения частного критерия приближается к нулю, то это соответствует спокойной ситуации. Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации воспользуемся нелинейной схемой компромиссов [2]

$$\chi^* = \arg \min_z \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1}, \quad (3)$$

где α_i - весовые коэффициенты, характеризующие важность частных критериев.

При многокритериальном синтезе в системе управления кроме локальных критериев необходимо учитывать ограничения на переменные состояния и управления, заданные в форме неравенств. Обычно бывает ситуация, когда исходная точка по некоторым ограничениям является недопустимой. В частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности отработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других показателей качества, предъявляемых к системе. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза могут быть вообще не выполнены. Однако, ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в нелинейной схеме компромиссов (3) используется комбинация метода штрафных функций [11-13] с внутренней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся допустимыми, и метода с внешней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся недопустимыми, так что целевая функция в (3) примет следующий вид

$$f(\chi, r, \lambda) = \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1} + s(r)L(z) + p(\lambda)T(\chi), \quad (4)$$

где $s(r)$ и $p(\lambda)$ - весовые функции, учитывающие влияние функции

штрафа $L(\chi, r) = r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\chi)}$ для метода внутренней точки и функции

штрафа $T(\chi) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(\chi(r))]\}^2$ для метода внешней точки. Для

получения оптимального решения и выполнения ограничений необходимо, чтобы $r \rightarrow 0$, а $\lambda \rightarrow \infty$.

Исследования целевой функции полученной задачи (4) показало, что она является многоэкстремальной и имеет участки типа оврагов и «плато». Для нахождения глобального оптимума такой целевой функции вначале использовался метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming – SQP method) со случайным заданием точек мультистарта, покрывающих область значений искомых параметров. Однако в областях многомерных оврагов и «плато», такой подход оказался малоэффективным и приводил к «блужданию» по дну оврага, медленному продвижению к глобальному оптимуму в окрестности участка типа «плато». Для повышения скорости нахождения глобального оптимума использованы стохастические мультиагентные алгоритмы на основе оптимизации роением частиц [14-15].

Результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы. На основании экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы установлено, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило сократить время первого согласования в пять раз, повысить плавность движения на низких скоростях в 1.7 раза, уменьшить дисперсию ошибки отработки случайного задающего воздействия в четыре раза. Синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Разработан метод многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Возможность такого подхода показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния. Обоснован и разработан метод выбора матриц, с помощью которых формируется вектор цели стохастического робастного управления путем решения задачи нелинейного программирования. Для решения такой многоэкстремальной задачи нелинейного программирования, использованы стохастические мультиагентные алгоритмы на основе оптимизации роением частиц. Синтезированные систе-

мы являются робастными по отношению к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий за счет минимизации анизотропийной нормы. Приведены результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления /В.М. Кунцевич // Праці міжнародної конференції «50 років Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України». – Київ: інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – С. 61-74.
2. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
3. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления /В.М. Кунцевич // Труды научного семинара «70 – лет теории инвариантности». – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 61 – 90.
4. Кунцевич В.М. От проблем управления одним объектом – к проблемам управления классами объектов /В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 1994. - № 1-2. – С. 3-15.
5. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42.
6. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R, Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – Pp. 427 – 432.
7. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ -optimization // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – Pp 2249 – 2250.
8. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации/В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
9. Hoyle D., Hyde R., Limebeer D.J.N. An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design / Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. – Brighton: 1991. – P. 1581-1585.
10. Limebeer D.J.N., Kasenally E.M., Perkins J.D. On the design of robust two degree of freedom controllers / Automatica.– 1993. – №29. – P. 157 – 161.
11. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
12. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения/[под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
13. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.
14. Clerc. M. Particle Swarm Optimization.– London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.
15. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.