

УДК 621.3.076

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец, В.В. Хоменко
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА
ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С АНИЗОТРОПИЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРИ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ**

Аннотация. Разработана методика экспериментального исследования динамических характеристик стенда двухмассовой электромеханической системы с анизотропийными регуляторами в различных режимах работы. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов выполнен на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Приведены примеры сравнения экспериментальных динамических характеристик стенда с синтезированными анизотропийными регуляторами и с типовыми регуляторами.

Ключевые слова: макет двухмассовой электромеханической системы, анизотропийные регуляторы, многокритериальный синтез.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Центральной проблемой современной теории и практики автоматического управления является создание систем, способных обеспечивать высокую точность управления при интенсивных задающих и возмущающих воздействиях широкого спектра частот [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, при отработке случайных задающих, либо компенсации случайных возмущающих воздействий задается дисперсия ошибки слежения либо стабилизации и т.д.[2]. Кроме того, синтезированная система должна сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении параметров объекта управления и внешних воздействий, т.е. являться робастной [3-4].

© Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В., 2015

В частности, свойством робастности обладают системы, с помощью которых минимизируется анизотропийная норма системы [5-7]. Существенное повышение точности управления в робастной системе достигается применением комбинированного управления, когда используется вся имеющаяся информация о задающем и возмущающем воздействиях [8-11]. Для решения многокритериальной задачи синтеза динамической системы [12-14] используются мультиагентные методы оптимизации [15-16]. Для отладки алгоритмов управления разрабатываются специальные стенды электромеханических систем [1, 17].

Целью статьи является разработка методики и проведение экспериментальных исследований динамических характеристик стенда двухмассовой электромеханической системы в различных режимах работы при многокритериальном синтезе анизотропийных регуляторов на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роом частиц.

Изложение материала исследования и полученных результатов. Центральная идея синтеза систем стохастического робастного управления связана с синтезом системы, минимизирующей критерий качества по анизотропийной норме управления, но максимизирующей этот же критерий по норме вектора внешних воздействий [7]. 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 разностных уравнений – матричным уравнением дискретного состояния, а оба игрока используют одну и ту же функцию цели, то такая игра называется дифференциальной игрой с нулевой суммой.

Для нахождения анизотропийных регуляторов полного порядка необходимо решить ряд уравнений [5-6]. Вначале рассмотрим определение входа, максимизирующего анизотропийную норму. Для этого необходимо решить следующие уравнения:

- первое уравнение Риккати

$$\tilde{Y} = A_t^T \tilde{Y} A_t + L_t^T \Pi L_t + Q, \quad (1)$$

где

$$L_t = \Pi^{-1} F_t^T \tilde{Y} A_t, \quad \Pi = \Gamma - F_t^T \tilde{Y} F_t,$$

- второе уравнение Риккати

$$R = A_\omega^T R A_\omega + q C_\omega^T C_\omega + L^T \Sigma^{-1} L, \quad (2)$$

где

$$L = \Sigma (B_\omega^T R A_\omega + q D_\omega^T C_\omega), \quad \Sigma = (I_{m_1} - B_\omega^T R B_\omega)^{-1}.$$

Рассмотрим синтез анизотропийных наблюдателей состояния многомассовых электромеханических систем с параметрической неопределенностью, необходимых для реализации анизотропийных регуляторов полного порядка. Для нахождения анизотропийных наблюдателей состояния необходимо решить третье уравнение Риккати

$$S = \tilde{A}_{11} S \tilde{A}_{11}^T + \tilde{B}_1 \tilde{B}_1^T - \Lambda \Theta \Lambda^T, \quad (3)$$

где

$$\Theta = \tilde{C}_{21} S \tilde{C}_{21}^T + \tilde{D} \tilde{D}^T, \quad \Lambda = (\tilde{A}_{11} S \tilde{C}_{21}^T + \tilde{B}_1 \tilde{D}^T) \Theta^{-1}.$$

Для нахождения анизотропийного регулятора, минимизирующего анизотропийную норму системы решается четвертое уравнение Риккати

$$T = A_u^T T A_u + C_u^T C_u - N^T \Psi N, \quad (4)$$

где

$$\Psi = B_u^T T B_u + D_{12}^T D_{12}, \quad N = -\Psi^{-1} (B_u^T T A_u + D_{12}^T C_u).$$

Анизотропийная норма системы определяется выражением специального вида

$$a = -\frac{1}{2} \ln \det \left(\frac{m_1 \Sigma}{Trace(L P L^T + \Sigma)} \right), \quad (5)$$

где матрица P удовлетворяет уравнению Ляпунова

$$P = (A_\omega + B_\omega L) P (A_\omega + B_\omega L)^T + B_\omega \Sigma B_\omega^T. \quad (6)$$

Таким образом, нахождение анизотропийных регуляторов сводится к решению системы из четырёх связанных уравнений Риккати (2) – (4), уравнения Ляпунова (6) и вычисления анизотропийной нормы системы по выражению специального вида (5). Эти системы уравнений численно решаются с помощью метода гомотопий, включающего векторизацию матриц и итерации по методу Ньютона.

Анизотропийный регулятор формирует управляющее воздействие на вход системы по ее измеряемому выходу и представляет собой динамический блок типа компенсатора, объединяющий анизотропийный наблюдатель и анизотропийный регулятор.

Описание стенда двухмассовой электромеханической системы. Механическая часть стенда выполнена на базе двух однотипных микродвигателей постоянного тока ДПТ-25-Н2 [1]. Валы двигателей соединены упругой передачей. Преобразователем электрической энергии в механическую является один микродвигатель, а второй микродвигатель формирует случайную нагрузку для первого микродвигателя. В режиме стабилизации, когда система замкнута по углу поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя с помощью регулятора положения первого двигателя по сигналу с датчиков положения первого либо второго двигателей. В режиме наведения, когда система замкнута по скорости изменения угла поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя с помощью регулятора скорости первого двигателя по сигналу с датчиков скорости первого либо второго двигателей. Скорости вращения двигателей измеряются с помощью тех же импульсных датчиков положения первого и второго двигателей.

С помощью второго двигателя создается случайное изменение момента нагрузки. Для имитации случайного воздействия на вход второго двигателя подается случайный сигнал с выхода формирующего фильтра в виде колебательного звена. На вход формирующего фильтра от генератора случайных сигналов подается сигнал типа белого шума. С помощью такой системы второй двигатель формирует случайное изменение момента нагрузки. Характеристики случайного изменения момента нагрузки определяются параметрами формирующего фильтра и собственно двигателя.

Результаты экспериментальных исследований. Рассмотрим экспериментальные исследования синтезированных анизотропийных регуляторов на стенде двухмассовой электромеханической системы.

Вначале рассмотрим систему стабилизации угла поворота вала двигателя при случайном изменении момента нагрузки. На рис. 1 показаны реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала второго двигателя с типовым регулятором, а на рис. 2 показаны реализации случайных процессов тех же переменных

состояния с анизотропийным регулятором. Как видно из этих рисунков, в системе управления с обратной связью по углу поворота вала двигателя при случайном изменении момента нагрузки применение анизотропийного регулятора позволяет уменьшить ошибку регулирования угла поворота вала второго двигателя более чем в 2 раза.

Были также проведены экспериментальные исследования следящей системы в режиме регулирования скорости. Показано, что применение анизотропийного регулятора в системе регулирования скорости при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования скорости вращения второго двигателя более чем в 1,5 раза.

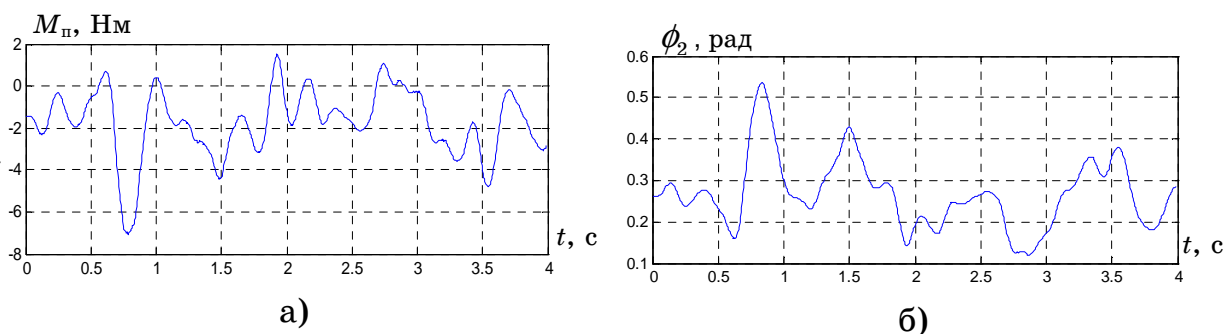


Рисунок 1 – Реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала двигателя с типовым регулятором

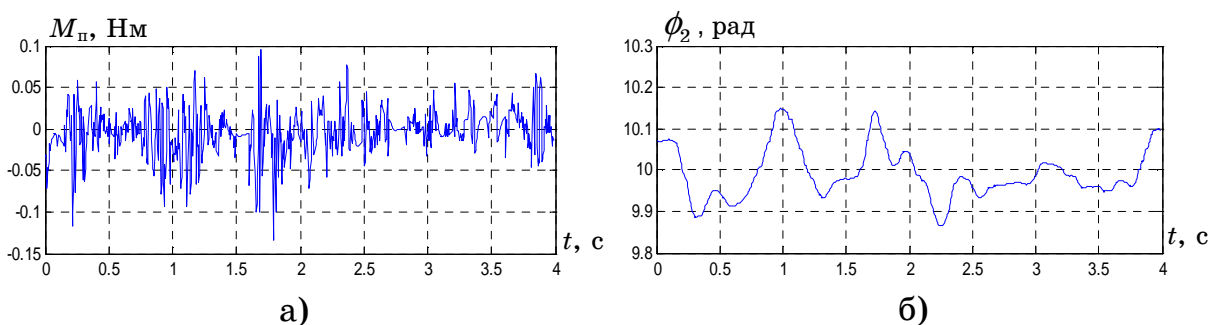


Рисунок 2 – Реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала двигателя с анизотропийным регулятором

Проведем теперь экспериментальные исследования по выявлению возможностей повышения точности управления двухмассовой системой с помощью анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами. Для уменьшения влияния сил трения выполним экспериментальные исследования переходных процессов в

системе из некоторой начальной ненулевой скорости вращения. При этом величину увеличения скорости выберем из условия, чтобы необходимые напряжения и токи якорной цепи исполнительного двигателя не превосходили допустимых значений. На рис. 3 показаны переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с П регулятором, а на рис. 4 показаны переходные процессы тех же переменных состояния в системе регулирования скорости с анизотропийным регулятором.

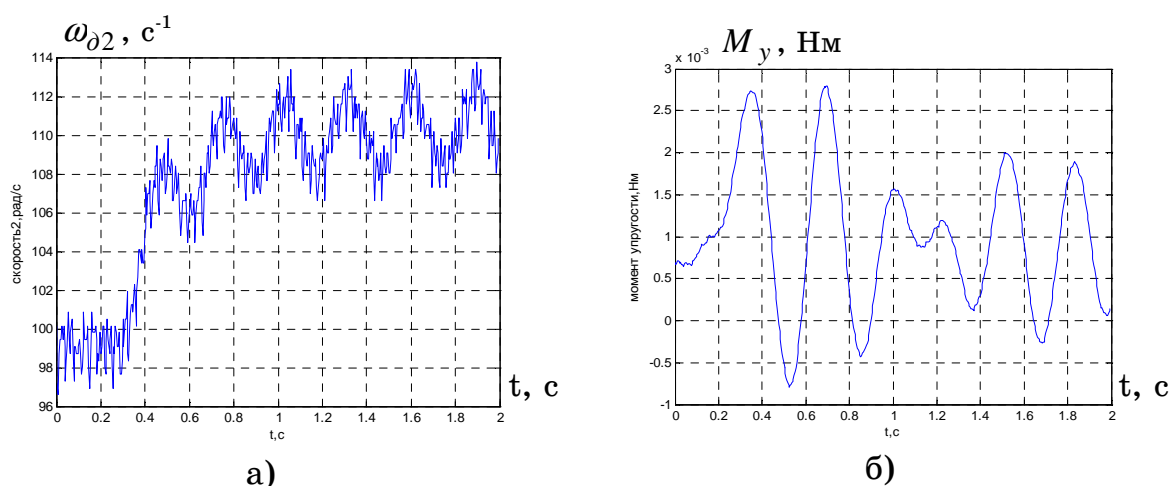


Рисунок 3 – Переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с П регулятором

Таким образом, применение анизотропийных регуляторов позволило повысить быстродействие системы в 5 раз за счет сокращения времени первого согласования с 0,5 с системы с типовым П регулятором до 0,1 с системы с робастным регулятором.

Кроме того, синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

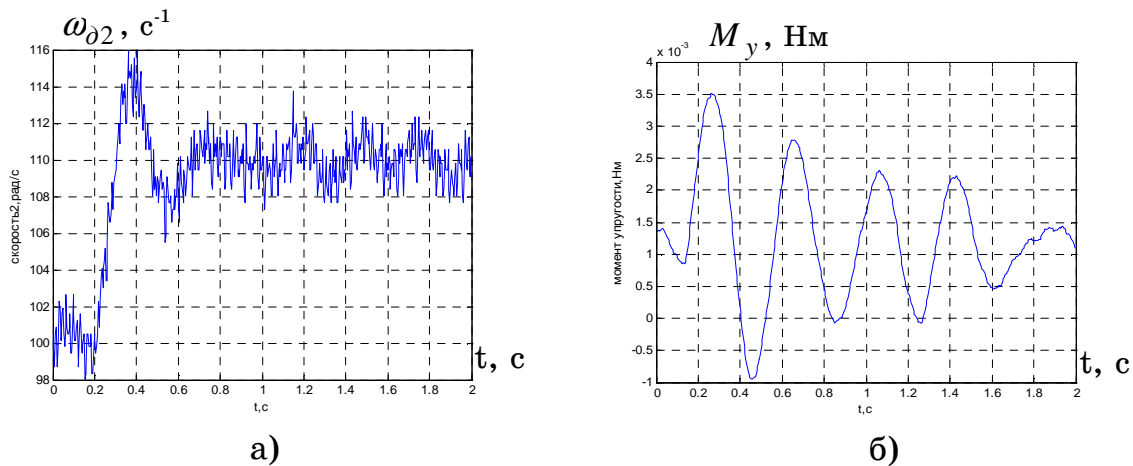


Рисунок 4 – Переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с анизотропийным регулятором

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана методика экспериментального исследования синтезированных систем с анизотропийными регуляторами на стенде двухмассовой электромеханической системы. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов выполнен на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Экспериментально подтверждена адекватность разработанных математических моделей и правильность результатов теоретических исследований метода синтеза анизотропийных регуляторов на стенде двухмассовой электромеханической системы с упругой связью между исполнительным двигателем и рабочим органом. Установлено, что с помощью анизотропийных регуляторов скорости удалось повысить быстродействие экспериментальной установки и уменьшить ошибку регулирования при случайном изменении момента нагрузки по сравнению с системой регулирования скорости с типовыми регуляторами. Для управления объектами с изменяющимися параметрами можно использовать анизотропийный регулятор и анизотропийный наблюдатель, синтезированные только для одного центрального объекта управления, что подтверждает их слабую чувствительность к изменению параметров объекта управления. Показано, что с помощью синтезированных систем удастся уменьшить чувствительность синтезированной системы по сравнению с оптимальными системами, в частности, изменение момента инерции объекта управления в широком диапазоне не приводит к существенному изменению динамических

характеристик синтезированных систем, замкнутых анизотропийными регуляторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / Т.Б. Никитина. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с.
2. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
3. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
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. 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.
9. 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.
10. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления / В.М. Кунцевич // Труды научного семинара «70 – лет теории инвариантности». Москва, 2 июня 2008 г. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 61 – 90.
11. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления / В.М. Кунцевич // Праці міжнародної конференції «50 років інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України». Україна, Київ, 24-26 грудня 2007 р. – Київ: інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – С. 61-74.
12. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
13. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / [под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
14. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.
15. Clerc. M. Particle Swarm Optimization.–London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.
16. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.
17. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с.