

Р. С. ВОЛЯНСКИЙ, к.т.н., докторант ДГТУ, Днепродзержинск;
А. В. САДОВОЙ, д.т.н., проректор по научной работе ДГТУ, Днепродзержинск.

СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Введение. Для ряда электромеханических систем высокоточного промышленного оборудования, робототехнических систем и астрономических комплексов наряду с формированием желаемых траекторий движения актуальной является задача обеспечения инвариантности этих траекторий к изменению параметров замкнутых систем, которые вызваны действием большого количества различных дестабилизирующих факторов. В большинстве случаев эта задача осложняется отсутствием точной информации о параметрах объекта.

Известные решения, основанные на использовании робастных, адаптивных, нечетких и других классических и современных методов и подходов [1], не всегда обеспечивают желаемое качество процессов управления, отличаются сложностью технической реализации, элементами субъективизма при определении структуры и параметров регулятора и повышенным энергопотреблением.

Устранить указанные недостатки можно в результате использования на этапе синтеза системы управления методов интервального анализа [2], который является одной из достаточно бурно развивающихся отраслей современной математики. В соответствии с подходами интервального анализа одновременно рассматривается множество траекторий движения замкнутой системы, которые определяются всеми возможными сочетаниями ее параметров, которые определены наперед заданных интервалах. В настоящее время известны работы, посвященные синтезу систем управления интервальными объектами [3]. Однако вследствие конечных коэффициентов усиления синтезируемых регуляторов такие системы, оставаясь устойчивыми при изменении параметров объекта управления, тем не менее не обеспечивают высокое качество процессов управления и низкую чувствительность к изменению этих параметров. Поэтому задача синтеза высокоточной системы управления, инвариантной к изменению параметров объекта, параметры которого заданы интервально, является актуальной.

Постановка задачи. Целью данной статьи является синтез алгоритмов управления интервальным электромеханическим объектом первого порядка с иррациональной активационной функцией.

Материалы исследования. Рассмотрим уравнение движения электропривода с безынерционным каналом формирования электромагнитного момента в относительных единицах

$$py = -\frac{1}{T_m}y + \frac{1}{T_m}U, \quad (1)$$

где T_m – электромеханическая постоянная времени, $y = \omega / \omega_0$ – скорость двигателя в относительных единицах, U – управляющее воздействие, $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Будем считать, что точные значения и/или законы изменения параметров объекта управления не известны, а определен только интервал их возможных значений

$$T_m = [T_m^{\min}, T_m^{\max}]. \quad (2)$$

С учетом интервала (2) уравнение (1) можно представить следующим образом

$$py = -\frac{1}{[T_m^{\min}, T_m^{\max}]}y + \frac{1}{[T_m^{\min}, T_m^{\max}]}U \quad (3)$$

или

$$py = \left[\frac{1}{T_m^{\min}}, -\frac{1}{T_m^{\max}} \right]y + \left[\frac{1}{T_m^{\max}}, \frac{1}{T_m^{\min}} \right]U. \quad (4)$$

Вводя следующие обозначения

$$b = [b^{\min}, b^{\max}]; \quad m = [m^{\min}, m^{\max}], \quad (5)$$

$$b^{\min} = -\frac{1}{T_m^{\min}}; \quad b^{\max} = -\frac{1}{T_m^{\max}}; \quad m^{\min} = \frac{1}{T_m^{\max}}; \quad m^{\max} = \frac{1}{T_m^{\min}}, \quad (6)$$

уравнение (4) можно представить следующим образом

$$py = by + mU. \quad (7)$$

В отличие от уравнения (1), которое описывает одну траекторию движения, уравнение (7) позволяет одновременно рассматривать траектории движения, которые соответствуют всем параметрам объекта, определенным на интервалах (2).

Используя принцип преобразования обратной связью по выходу [4] и введя новое управляющее воздействие V , исключим из уравнения движения (7) составляющие с неопределенностью. Такой подход позволяет представить уравнение (3) в виде

$$py = V \quad py = V, \quad (8)$$

© Р.С. Волянский, А.В. Садовой, 2015 которое не зависит от параметров объекта (1).

Формирование желаемых траекторий движения объекта (8) осуществляется подачей на его вход соответствующим образом определенного управляющего воздействия. Широкий класс траекторий движения получается в результате использования алгоритма управления вида [5], определенного в открытой области $V \in R$

$$V = g|y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y), \quad (9)$$

где g - произвольный коэффициент усиления регулятора, α - показатель степени, определяющий порядок скользящего режима в замкнутой системе [6].

При равенстве траекторий движения (3) и (6) можно записать управляющее воздействие, подаваемое на объект, следующим образом

$$U = \frac{1}{m}V - \frac{b}{m}y \quad (10)$$

или с учетом коэффициентов (5) и (6)

$$U = \frac{1}{\begin{bmatrix} \frac{1}{T_m^{max}} & \frac{1}{T_m^{min}} \end{bmatrix}} V + \frac{\begin{bmatrix} \frac{1}{T_m^{max}} & \frac{1}{T_m^{min}} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \frac{1}{T_m^{max}} & \frac{1}{T_m^{min}} \\ \frac{1}{T_m^{min}} & \frac{1}{T_m^{max}} \end{bmatrix}} y = [T_m^{max}, T_m^{min}]V + y. \quad (11)$$

Интервальный алгоритм управления (11) можно разбить на два алгоритма, применение которых позволяет управлять объектами с минимальными и максимальными параметрами

$$\begin{aligned} U^{max} &= T_m^{max} V + y; \\ U^{min} &= T_m^{min} V + y. \end{aligned} \quad (12)$$

Алгоритмы (12) описывают границы трубки управления, которая показана на рис.1.

Задавшись некоторой величиной γ , $\gamma \in [0,1]$, определим внутри этой трубки эквивалентное управляющее воздействие следующим образом

$$U = U_0 + \begin{cases} \gamma g_1 (U^{max} - U^{min}) \left| \frac{V}{p} - y \right|^\beta & \text{при } \frac{V}{p} - y > 0; \\ (\gamma - 1) g_1 (U^{max} - U^{min}) \left| \frac{V}{p} - y \right|^\beta & \text{при } \frac{V}{p} - y < 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $U_0 = U^{min} + (U^{max} - U^{min})(1 - \gamma)$, $\beta \in [0,1]$ - показатель степени, определяющий нелинейность управляющего воздействия, g_1 - коэффициент, обеспечивающий выполнение условия

$$\frac{V}{p} - y = 0. \quad (14)$$

При $\gamma = 0,5$ управляющее воздействие (13) с учетом алгоритмов управления (9), (12) и (14) примет вид

$$\begin{aligned} U &= g \frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2} |y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y) + y + g_1 \left(g \frac{T_m^{max} - T_m^{min}}{2} |y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y) \right) \times \\ &\times \left| \frac{|y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y)}{p} - y \right|^\beta \text{sign} \left(\frac{|y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y)}{p} - y \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Первое слагаемое алгоритма управления (15) осуществляет грубое управление скоростью для объекта с усредненными параметрами, второе слагаемое в соответствии с принципом преобразования динамического объекта обратными связями компенсирует усредненное значение противо-ЭДС двигателя и третье слагаемое осуществляя приближение траекторий движения объекта (1) к траекториям объекта (8), позволяет формировать желаемую траекторию движения рассматриваемого электромеханического объекта, инвариантную к изменению его параметров.

Результат математического моделирования системы управления объектом (1) при $\alpha = 0.5$ и $\beta = 0.5$ представлены кривой 1 на рис.2. Там же кривыми 2 и 3 показаны результаты исследования той же системы с алгоритмами

$$U = g \frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2} |y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y) + y, \quad (16)$$

$$U = g \frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2} |y^* - y|^\alpha \text{sign}(y^* - y), \quad (17)$$

соответственно, кривая 4 иллюстрирует изменение постоянной времени T_m . На рис. 3 кривые 1-3 иллюстрируют изменения управляющих воздействий, которые формируются регуляторами с алгоритмами управления (12-14), соответственно. На рис. 3 пунктирными линиями ограничена область, представляющая собой трубку управления, ограниченную сверху и снизу выражениями (12) после подстановки в них управляющего воздействия (9). Результаты моделирования показывают, что алгоритм управления (16) представляет собой усреднение выражений (12) и управляющее воздействие, формируемое в соответствии с этим

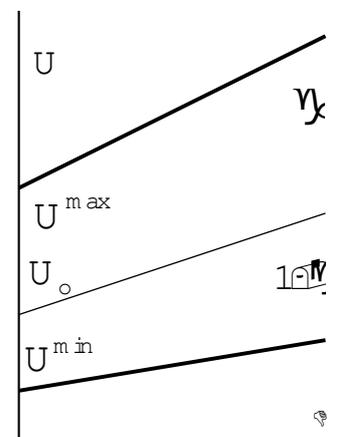


Рис.1 – Трубка управления

алгоритмом, автоматически располагается в центре рассматриваемой трубки.

Управляющее воздействие (17) не учитывает наличие в составе объекта управления внутренней обратной связи и поэтому, выходя за границы найденной трубки управления, не обеспечивает синтезируемой замкнутой системе заданную статическую точность.

Выводы.

Приведенные выше выкладки и результаты численных исследований позволяют сделать следующие выводы:

Использование интервальных вычислений позволяет сформировать трубку управляющего воздействия, которая для замкнутых электромеханических систем с иррациональной активационной функцией в установившемся режиме вырождается в прямую и поэтому по сравнению с системами разрывного управления гарантирует пониженное энергопотребление в установившемся режиме.

Управляющие воздействия, расположенные в найденной трубке, в результате компенсации внутренней обратной связи обеспечивают повышение порядка астатизма замкнутой системы и нулевую статическую ошибку, но не гарантируют низкую чувствительность к изменению параметров объекта.

Инвариантность к изменению параметров объекта управления обеспечивается в результате формирования управляющим воздействием (15) для объекта (1) траектории движения, которая описывается выражениями (8) и (9). Амплитуда синтезированного управляющего воздействия определяется заданными интервалами параметров и переменными состояниями объекта управления. Амплитуда найденного таким образом управляющего воздействия уменьшается при стремлении к заданному значению.

Изменение параметров в замкнутой электромеханической системе с алгоритмом (15) приводит к автоматическому формированию дополнительных форсирующих или демпфирующих воздействий, запрещающих отклонения траектории движения системы от описываемых выражениями (8) и (9).

Список литературы: 1. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 5. Методы современной теории автоматического управления [Текст] / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.-783с. 2. Jaulin L. Applied interval analysis [Текст] / Luc Jaulin, Michel Kieffer, Oliver Didrit, Eric Walter. – London.: Springer, 2001. – 379р. 3. Fiedler M. Linear optimization problem with inexact data [Текст]/ M.Fiedler et al. – New York.: Springer, 2006.- 224р. 4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст] / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2004.-464с. 5. Волянский Р.С. Синтез оптимальной системы управления с нелинейной активационной функцией [Текст] / Р.С. Волянский, А.В. Садовой// Электротехнические и компьютерные системы №15 (91), 2014. – С.69-71. 6. Волянский, Р.С. Скользящие режимы дробных порядков [Текст] / Волянский Р.С., Садовой А.В. // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ» : Проблемы автоматизованого электроприводу. Теорія і практика. №36 - [Вестник НТУ "ХПИ"](#), 2013. – С.66-67.

Bibliography (transliterated): 1. Pupkov K. A. Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. Tom 5. Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija [Tekst] / K. A. Pupkov, N. D. Egupov. – M.:Izd-vo MGTU im. N.Je.Baumana, 2004.-783s. 2. Jaulin L. Applied interval analysis [Tekst]/ Luc Jaulin, Michel Kieffer, Oliver Didrit, Eric Walter. – London.: Springer, 2001. – 379p. 3. Fiedler M. Linear optimization problem with inexact data [Tekst]/ M.Fiedler et al. – New York.: Springer, 2006.- 224p. 4. Kim D.P. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Mnogomernye, nelinejnye, optimal'nye i adaptivnye sistemy [Tekst] / D.P.Kim. - M.: Fizmatlit, 2004.-464s. 5. Volianskiy R.S. Sintez optimal'noy sistemy upravleniya s nelinejnoy aktivacionnoy funkciej [Tekst] / R.S.Voljanskiy, A.V.Sadovoy// Elektrotehničeskie i kompjuternye sistemy №15 (91), 2014. – S.69-71. 6. Voljanskiy R.S. Skolzyashhie rezhimy drobnih porjadkov [Tekst] / Volianskiy R.S., Sadovoy A.V. // Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika. №36 - [Vestnik NTU "HPI"](#), 2013. – S.66-67.

Поступила (received)

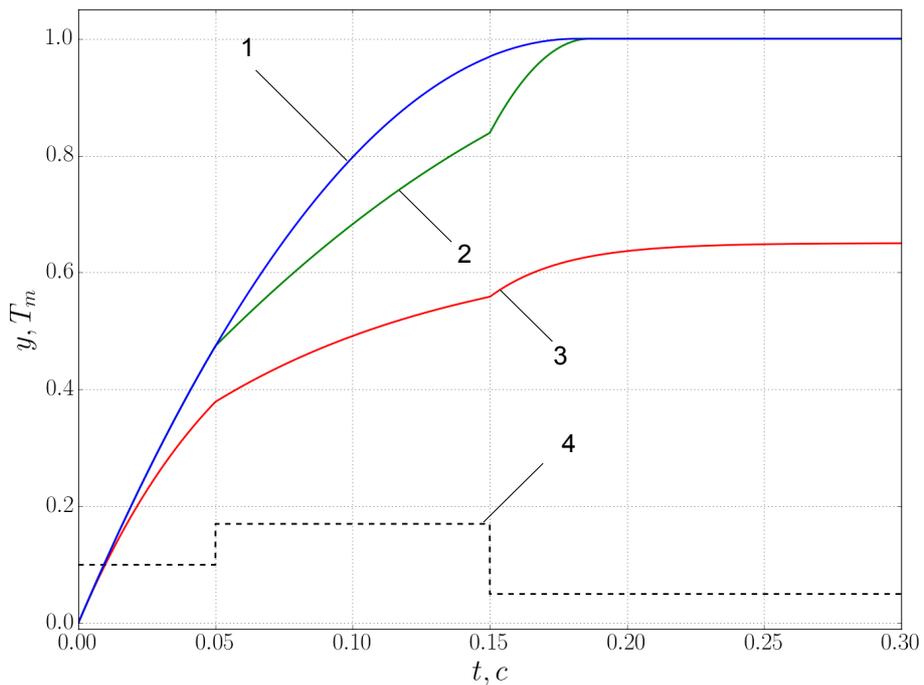


Рис.2 – Процесс разгона синтезированных системах

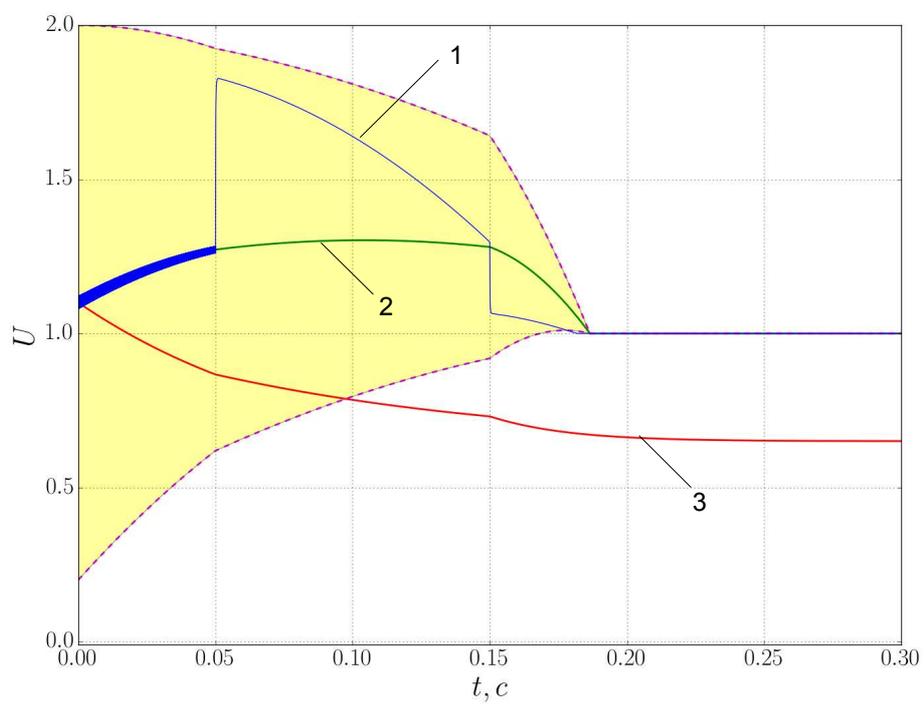


Рис.3. – Управляющие воздействия в синтезированных системах