

к.т.н. Полилов Е. В.,
к.т.н. Руднев Е. С.,
Скорик С. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХМАССОВЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Приведен синтез робастной системы управления двухмассовым электромеханическим объектом на базе электродвигателя переменного тока с H_∞ -субоптимальным регулятором скорости, функционирующей в условиях неполной информации об объекте и с учетом его структурных неопределенностей. Синтезированный H_∞ -регулятор обеспечивает робастную устойчивость и робастное качество для всех допустимых неопределенностей, действующих на объект.

Ключевые слова: робастное управление, неопределенность, H_∞ -регулятор.

Введение. Одной из основных проблем современной теории управления является управление динамическими объектами в условиях неопределенности. Неопределенность вызывается отсутствием полных сведений относительно параметров или характеристик объекта управления (ОУ), кроме того, сама математическая модель ОУ, полученная аналитически или в результате идентификации, отличается от реальной технической системы. В последние десятилетия развивается подход, когда при наличии неопределенности возникает задача управления не единственным объектом, а семейством объектов, принадлежащих заданному множеству. По сравнению с алгоритмами классической теории управления необходимо единственным регулятором обеспечить устойчивость замкнутой системы не только для номинального объекта, но и любого объекта из заданного класса неопределенности – это и есть задача синтеза робастного управления (H_∞ -теория). Робастные САУ не являются адаптивными, но обеспечивают необходимое качество работы при изменении характеристик ОУ.

Интерес к синтезу робастных регуляторов связан с потребностями в снижении необходимого объема априорной информации об ОУ, стремлением к универсальности управляющих систем и сокращению затрат на их наладку. Несмотря на серьез-

ные теоретические достижения [1], в том числе и в области автоматизированного ЭП, методы H_∞ -оптимизации не вошли в повседневную отечественную и зарубежную практику. Это объясняется доминированием на рынке комплектных электроприводов с «классическими» алгоритмами управления.

Постановка задач и исследования. Целью работы является повышение точности стабилизации и качества регулирования скорости электропривода переменного тока с синхронным двигателем как двухмассовой электромеханической системы, функционирующего в условиях неполной информации об объекте и с учетом параметрической неопределенности методами H_∞ -теории робастного управления.

Материалы исследования. В качестве объекта управления принят двухмассовый электромеханический объект (ДЭМО), включающий в себя синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ) с управляемым транзисторным преобразователем.

Во многих случаях при математическом описании используется идеализация ОУ, основанная на представлении о жесткой связи двигателя и исполнительного механизма (ИМ). Допущение верно при условии что частота собственных упругих колебаний механизма оказывается значительно выше частоты, определяющей бы-

стродействие системы управления электроприводом. В случае когда это условие не выполняется, то пренебрежение упругостью и наличия зазоров при анализе и синтезе системы может привести к ошибочным результатам. Система уравнений, описывающая ДЭМО в форме Коши [2, 3]:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \frac{1}{J_2} M_{12}; \\ pM_{12} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ p\omega_1 = -\frac{1}{J_1} M_{12} + \frac{k_t}{J_1} I; \\ pI = -\frac{k_e}{R_s T_s} \omega_1 - \frac{1}{T_s} I + \frac{1}{R_s T_s} E_n; \\ pE_n = -\frac{1}{T_\mu} E_n + \frac{k_n}{T_\mu} U_y, \end{cases} \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 - угловая скорость двигателя и исполнительного механизма, соответственно, 1/с; J_1, J_2 - момент инерции якоря двигателя и приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции различных частей рабочего органа, соответственно, кг·м²; M_{12} - момент упругого закручивания вала, Нм; M - электромагнитный момент двигателя, Нм; I - ток якорной цепи двигателя, А; c_{12} - коэффициент жесткости вала, Нмс; $k_t = 3/2 p_0 \Psi_f$ - постоянная электромагнитного момента, постоянная величина, связывающая электромагнитный момент с действующим значением тока статора, Нм/А; $k_e = p_0 \Psi_f$ - постоянная двигателя; Ψ_f - потокосцепление постоянных магнитов на роторе; p_0 - число пар полюсов машины; R_s - активное сопротивление обмотки статора, Ом; T_s - электромагнитная постоянная времени, с; E_n - э.д.с. преобразователя, В; T_μ - постоянная времени преобразователя, с; k_n - коэффициент усиления преобразователя; U_y - управляющее напряжение, В.

Полагаем, что активное сопротивление обмотки статора в диапазоне $\pm 40\%$ и момент инерции, приведенный к валу двигателя – в диапазоне $\pm 50\%$ от номинальных значений.

Описание вышеуказанных неопределенностей, которые либо точно не известны, либо изменяются в процессе работы электропривода, представленных как линейное дробное преобразование (ЛДП); определение динамики входов/выходов системы в матричном представлении с учетом неопределенностей как $\mathbf{G}(s)$ - матрица передаточных функции (МПФ), а также последовательность преобразования структурных схем ОУ с неопределенными параметрами, рассмотрены авторами в работах [3-5].

Создание обобщенного объекта $\mathbf{P}(s)$ с учетом весовых функций $\mathbf{W}_S(s), \mathbf{W}_R(s)$ и $\mathbf{W}_T(s)$, которые используются для обеспечения желаемого качества системы, а также детализированный синтез H_∞ -регулятора с использованием «Два-Риккати подхода» опубликованы в [3-5].

Задачей H_∞ -оптимизации является выбор такого регулятора \mathbf{K} , который бы минимизировал бесконечную норму T_{zw} . Выбор оптимального регулятора \mathbf{K} осуществляется над множеством всех регуляторов, обладающих свойством делать замкнутую систему T_{zw} внутренне устойчивой, т.е. над множеством стабилизирующих регуляторов. H_∞ -норма служить мерой усиления системы. H_∞ -норма ПФ есть энергия выхода системы при подаче на вход сигнала с единичной энергией. Если выходом является ошибка, а входом возмущение, то минимизируя H_∞ -норму ПФ, мы минимизируем энергию ошибки для наихудшего случая входного возмущения.

Робастный H_∞ -субоптимальный регулятор скорости СДПМ был синтезирован с помощью эффективных методов реализованных в пакете расширения Robust Control Toolbox системы MATLAB, позво-

ляющих по представленным алгоритмам [3-5] вычислить центральный H_∞ -субоптимальный регулятор, который минимизирует H_∞ -норму замкнутой системы $\|T_{zw}\|_\infty$. Синтезированный робастный регулятор скорости по критерию H_∞ -нормы является регулятором 7 порядка. Достигнутая H_∞ -норма замкнутой системы, полученная в ходе итерационного процесса, составила 0,814. С помощью эффективных алгоритмов понижения порядка системы, регулятор скорости был редуцирован до 5-го порядка (рис. 2 б).

На рис. 1 представлены результаты работы двухмассового электромеханического объекта с синтезированным H_∞ -регулятором скорости при отработке

замкнутой САР заданной траектории и приложенном моменте сопротивления $0,5 \cdot M_{ндв}$. На рис.2 приведены сингулярные значения функции чувствительности S и дополнительной чувствительности T ограниченными по амплитуде весовыми функциями.

Данные характеристики указывают на достигнутое качество робастной САР с синтезированным H_∞ -регулятором. На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования с вариацией параметров ОУ (одновременное уменьшение и увеличение момента инерции различных частей рабочего органа J_2 и активного сопротивления обмотки статора R_s в 2 раза от номинальных значений).

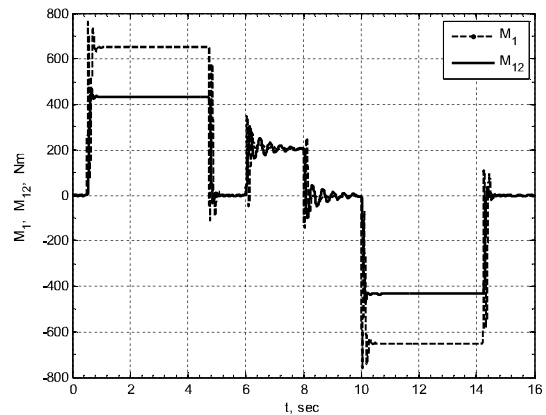
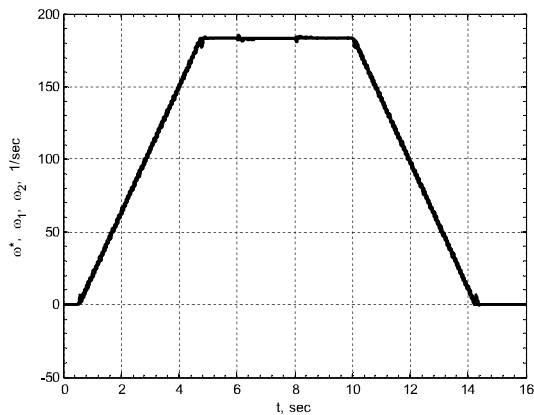


Рисунок 1 - Графики переходных процессов в робастной САР при номинальных параметрах $M_c=0,5 \cdot M_{ндв}$

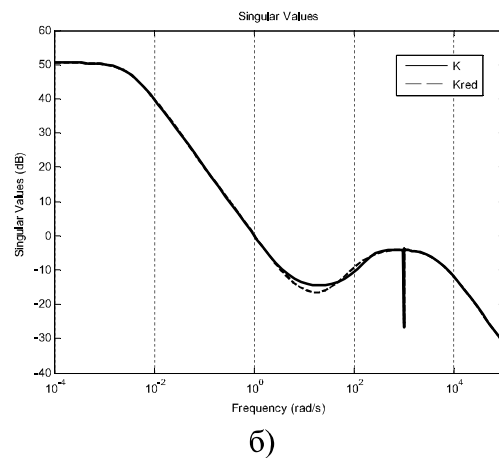
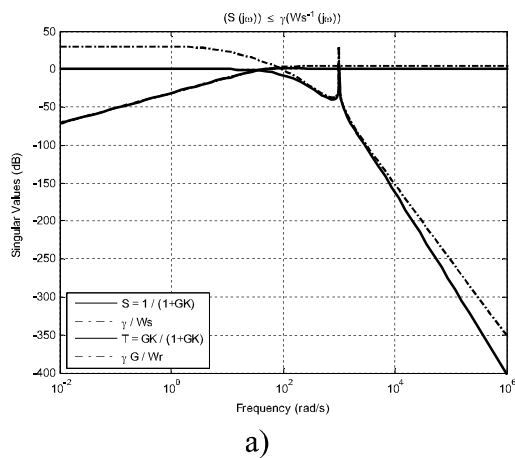


Рисунок 2 – Сингулярные значение S и T ограниченными по амплитуде весовыми функциями (а) и частотные характеристики регулятора полного порядка (7-го) и редуцированного (5-го порядка) (б)

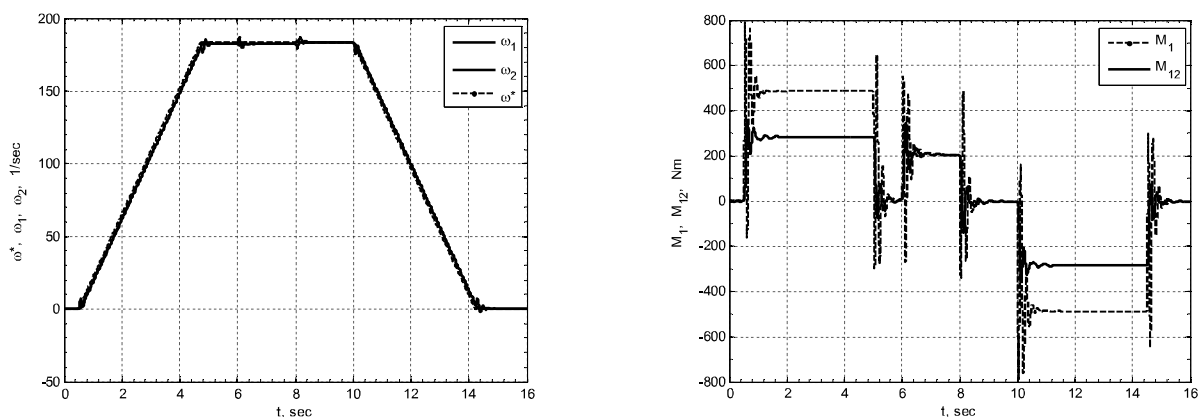


Рисунок 3 – Графики переходных процессов в робастной САР при одновременном уменьшении J_2 и R_s в 2 раза

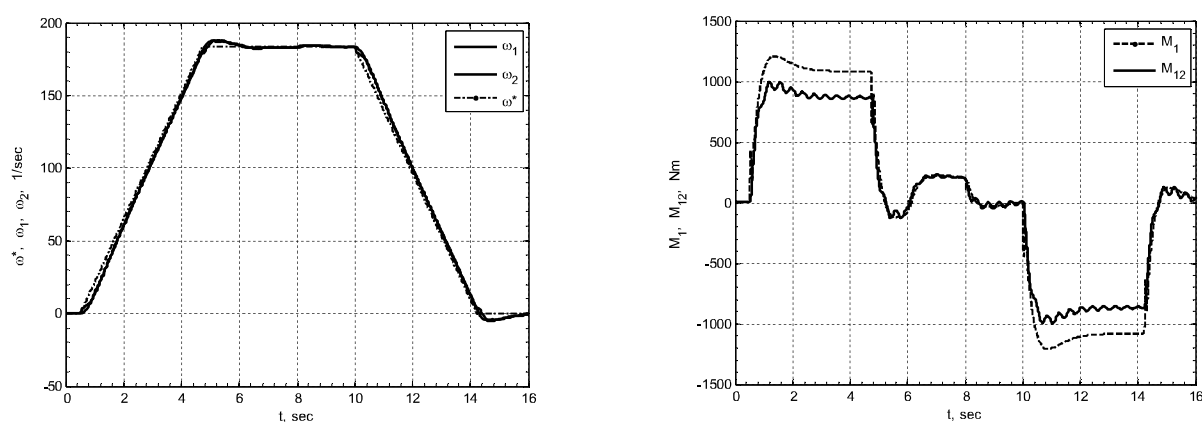


Рисунок 4 – Графики переходных процессов в робастной САР при одновременном увеличении J_2 и R_s в 2 раза

Уравнение в пространстве состояний редуцированного H_∞ -регулятора скорости двухмассового ЭП:

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|------------|------------|----|---------|--|--|-----|
| a = | | | | | b = | | | | | |
| | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | | u1 | | | |
| x1 | -4258 | 339 | -472.7 | 0 | 0 | x1 | 46.38 | | | |
| x2 | 59.46 | -4.99 | 6.608 | 0 | 0 | x2 | 2.54 | | | |
| x3 | -44.82 | -6.22 | -4.712 | 0 | 0 | x3 | 87.82 | | | |
| x4 | 0 | 0 | 0 | 2.369e+04 | 4783 | x4 | 0.07115 | | | |
| x5 | 0 | 0 | 0 | -1.175e+05 | -2.369e+04 | x5 | 0.01442 | | | |
| c = | | | | | d = | | | | | |
| | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | | u1 | | | |
| y1 | 47.62 | -2.719 | 5.257 | 10.2 | 2.082 | y1 | 0 | | | (2) |

Выводы. Для эффективного подавления колебаний, возникающих в двухмассовой упруговязкой электромеханической системе «электродвигатель - исполнительный механизм», показана возможность использования H_∞ -теории при построении систем регулирования подобными объектами. Синтезирован робастный H_∞ -

субоптимальный регулятор скорости двухмассового электромеханического объекта в условиях неполной информации о объекте и с учетом его неопределенностей. Полученный регулятор обеспечивает системе управления робастные характеристики качества и заданную точность поддержания скорости.

Библиографический список

1. Doyle J.C. *State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems* / J.C Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar, B.A. Francis // *IEEE Trans. Automat. Control.* – 1989. – Vol.34. - No8. – P.831-847.
2. Борцов Ю.А. *Автоматизированный электропривод с упругими связями* / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский // 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург, 1992. – 288 с.
3. Синтез алгоритмов робастного управления двухмассовым электромеханическим объектом методами H_∞ -теории / Е.В. Полилов, Е.С. Руднев, С.П. Скорик, А.Г. Щелоков, П.В. Горелов // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С.125-132.
4. Руднев Е. С. *Практическая реализация и исследование робастных алгоритмов управления синхронным электроприводом* / Е. С. Руднев // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* – Кременчук: КрНУ. – 2012. – вип. 3 (19). – С.102-107.
5. Полилов Е.В. *Робастное управление синхронным электроприводом: монография* / Е.В. Полилов, Е.С. Руднев, С.П. Скорик. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – 253 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Луцником В. Д.

Статья поступила в редакцию 06.11.13.

к.т.н. Полілов Є. В., Руднев Є. С., Скорик С. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ДВОМАСОВИМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ

Наведено синтез робастної системи управління двомасовим електромеханічним об'єктом на базі електродвигуна змінного струму з H_∞ -субоптимальним регулятором швидкості, що функціонує в умовах неповної інформації про об'єкт і з урахуванням його структурних невизначеностей. Синтезований H_∞ -регулятор забезпечує робастну стійкість і робастну якість для всіх допустимих невизначеностей, що діють на об'єкт.

Ключові слова: робастне керування, невизначеність, H_∞ -регулятор.

Polilov E. V., Rudnev E. S., Skorik S. P. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

ROBUST CONTROL OF TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM

Presents a synthesis of robust control systems two-mass electromechanical object based on the AC motor with the H_∞ -suboptimal control speed, operating in conditions of incomplete information about the object and taking into account its structural uncertainties. The synthesized H_∞ -controller provides robust stability and robust quality for all admissible uncertainties, acting on the object.

Key words: robust control, uncertainty, H_∞ -controller.