

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електромеханічні системи автоматизації», Донбаска державна машинобудівна академія, Україна, E-mail: zadorozhnyaya_in@ukr.net

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електромеханічні системи автоматизації», Донбаска державна машинобудівна академія, Україна

АНАЛІЗ СВОЙСТВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ СИНТЕЗЕ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ

Рассмотрена задача синтеза систем автоматического управления электроприводами с упругими связями. Показано, что упругая двухмассовая электромеханическая система может быть описана характеристическим полиномом, коэффициенты которого для реализации «инерционного» демпфирования должны обязательно учитывать вариацию параметров механической подсистемы.

Ключевые слова: электропривод, упругие связи, синтез систем, автоматическое управление, стандартный характеристический полином, демпфирование, электромеханическая связь.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей проектирования автоматизированных электроприводов технологических машин является точное воспроизведение заданных законов движения исполнительных органов и ограничение динамических нагрузок [1].

Практическая реализация высоких динамических показателей регулируемых электроприводов нового поколения по точности, диапазону регулирования, быстродействию требует учета специфических свойств управляемых преобразователей, структурных и параметрических отклонений, взаимосвязи и взаимовлияния процессов в электромагнитной и упругой механической подсистеме.

Упругие механические звенья передач способствуют возбуждению колебаний в электромеханической системе привода, что отрицательно влияет на качество выполнения технологических операций, ускоряет износ и разрушение узлов механических передач, дополнительно нагружаются управляемые преобразователи и электродвигатели, нарушаются расчетные динамические режимы функционирования систем автоматического регулирования [2].

Динамические процессы взаимодействия электромагнитной и упругой механической подсистем электропривода в полной мере выявляются при представлении механической части электропривода двухмассовой расчетной схемой [1]. Двухмассовая расчетная схема с упругим звеном характеризуется параметрами:

– частота свободных колебаний

$$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)/J_1J_2};$$

– коэффициент соотношения инерционных масс двигателя и механизма

$$\gamma = J_1/(J_1 + J_2) = T_{M1}/(T_{M1} + T_{M2}).$$

Отмеченные негативные факторы в системах подчиненного регулирования последовательной коррекции и системах регулирования параллельной коррекции параметров электроприводов с упругими механическими звеньями использование типовых критериев настройки регуляторов при сильной электромеханической связи [1, 2] на «модульный», «линейный» и «симметричный» оптимумы не представляется возможным [3].

Обзор и обобщение результатов опубликованных за последнее десятилетие научно-исследовательских работ по методам синтеза систем управления электроприводов показывает, что они интенсивно развиваются, и совершенствование динамических качеств двухмассовых электромеханических систем (ЭМС) осуществляется по двум направлениям:

– синтез ЭМС с целью минимизации реакции электропривода на действие колебаний упругого момента как внешнего (гармонического) возмущения по нагрузке на валу электродвигателя;

– решение задач синтеза ЭМС минимальной колебательности при использовании эффектов взаимодействия колебаний упругой механической (МП) и электромагнитной подсистем (ЭП).

В настоящее время по указанным направлениям синтез систем автоматического регулирования электроприводов постоянного и переменного тока сложных структур производится на основании общих принципов формирования переходных характеристик. При инженерных оценках оптимальности переходных процессов в теории автоматического управления существует метод стандартных форм характеристических полиномов (СХП) [4]. Переходный процесс для систем с передаточными функциями, не имеющими нулей, будет иметь заранее заданную (желаемую, стандартную) форму, определяемую стандартными коэффициентами характеристического

полинома, которые диктуются распределением корней. Метод СХП прост, вычислительные процедуры легко алгоритмируются при применении ЭВМ, но требует при синтезе принимать во внимание некоторые особенности [5], оказывающие влияние на свойства двухмассовых электроприводов.

Рекомендации, оценки и приемы оптимизации рассмотрим на примере структурной схемы двухмассовой системы (рис. 1) для нормированной формы относительных единиц и общепринятых обозначений. При анализе принимаем допущения [2], известные для МП, что деформация механических звеньев линейна, зазор не замыкается, и контур регулирования тока аппроксимируется инерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{T_T p + 1}$$

Для структур систем электроприводов с упругими звеньями механических передач решение задач синтеза методом СХП соответствует направлению работ по минимизации реакции электропривода на действие колебаний упругого момента в виде внешнего (гармонического) возмущения по нагрузке на валу электродвигателя.

Система автоматического управления выполняет роль фильтра, а в электроприводе с линейной механической характеристикой при упругих колебаниях проявляется эффект аналогичный введению в систему вязкого трения [1]. Выбор параметров электромеханических систем (в том числе и регуляторов) осуществляют формально как систем соответствующего порядка, который выявляется в результате преобразований, дополненных содержанием в электроприводе упругих звеньев [6]. Естественно, что синтез на основании стандартных форм характеристических полиномов задает динамические свойства электропривода как единого целого. И, конечно, известные (стандартные) распределения корней в задачах синтеза электромеханических систем [4], как отмечено в работе [7], принимают, а не выбирают, что в большинстве случаев не обеспечивает процессов в составных (отдельных) подсистемах электромеханических систем

требуемого качества. Следует добавить, что принятое распределение корней по тем или иным соображениям при синтезе не связано с физическими свойствами упругого объекта, исключаются при этом специфические (особые) эффекты процессов взаимодействия подсистем и характер влияния на процессы вида связи подсистем.

В связи с изложенным при использовании несомненных преимуществ метода СХП возникает практическая задача учета особенностей процедуры синтеза параметров двухмассовых электромеханических систем при реализации свойств собственно электропривода как динамического гасителя колебаний. Выявление дополнительных возможностей при минимизации колебательности позволяют спроектировать демпфированную систему с высоким качеством процессов регулирования.

Цель исследования. Анализ влияния взаимосвязи обобщенных параметров электромагнитной и механической подсистем при выборе коэффициентов стандартных характеристических полиномов в задачах синтеза систем автоматического управления двухмассовых электроприводов.

Материалы исследования. Синтез параметров системы автоматического регулирования для критерия минимума колебательности выполняется на основе характеристического полинома электромеханической системы с передаточными функциями по основным координатам [8]

$$W_1(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_0(p)} = \frac{K_R}{Q(p)}; W_2(p) = \frac{m(p)}{m_c(p)} = \frac{K_R}{Q(p)},$$

где $Q(p)$ – характеристический полином в канонической форме следующего вида

$$Q(p) = \frac{\gamma T_{M1} T_T}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_{M1}}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \left(T_{M1} T_T + \frac{K_R}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \gamma T_{M1} p + K_R. \quad (1)$$

где K_R – коэффициент усиления пропорционального регулятора скорости.

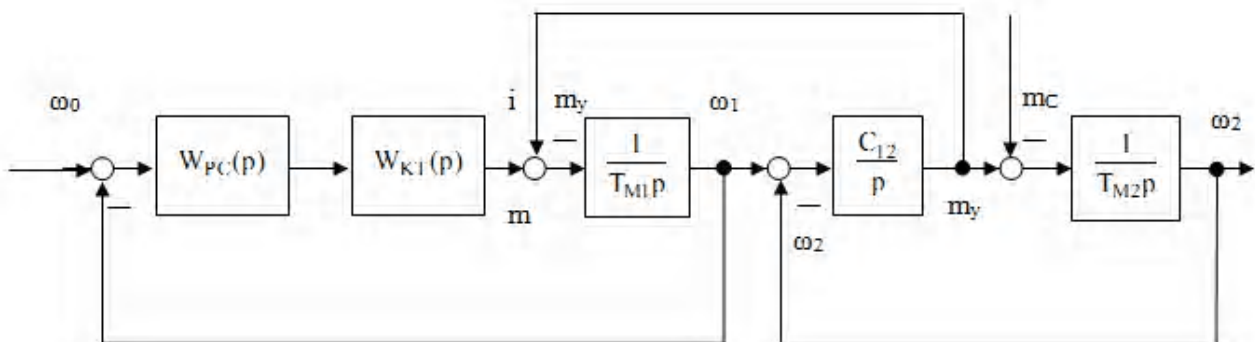


Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматического регулирования двухмассового электропривода

Характеристический полином (1) приводится нормированием через среднегеометрический корень Ω_0 к виду

$$Q(p) = p^4 + \frac{1}{T_T} p^3 + \left(\Omega_{12}^2 + \frac{K_R}{T_{M1}T_T} \right) p^2 + \frac{\Omega_{12}^2}{T_T} p + \frac{K_R \Omega_{12}^2}{\gamma T_{M1}T_T}. \quad (2)$$

Распределение корней соответствующих стандартных форм в литературных источниках, например [7], представляется как

$$Q(p) = p^4 + A_1 \Omega_0 p^3 + A_2 \Omega_0^2 p^2 + A_3 \Omega_0^3 p + A_4 \Omega_0^4. \quad (3)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 - коэффициенты, определяющие форму переходной характеристики; Ω_0 - среднегеометрический корень - своеобразный масштаб времени переходных процессов (мера быстродействия).

Для распределения корней соответствующей стандартной формы полинома записывается система алгебраических уравнений, составленная на основании равенства коэффициентов при соответствующих степенях оператора «р» приведенного полинома (2) и стандартной формы полинома (3)

$$\begin{cases} \frac{1}{T_T} = A_1 \Omega_0; \\ \Omega_{12}^2 + \frac{K_R}{T_{M1}T_T} = A_2 \Omega_0^2; \\ \frac{\Omega_{12}^2}{T_T} = A_3 \Omega_0^3; \\ \frac{\Omega_{12}^2 K_R}{\gamma T_{M1}T_T} = A_4 \Omega_0^4. \end{cases} \quad (4)$$

Совместность системы алгебраических уравнений (4) для заданного коэффициентами A_i распределения корней достигается только при определенном значении коэффициента соотношения инерционных масс

$$\gamma = \frac{(A_1 A_2 - A_3) A_3}{A_1 A_4}. \quad (5)$$

Возможное быстродействие системы автоматического регулирования определяется среднегеометрическим корнем по зависимости

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{A_1}{A_3}} \Omega_{12}. \quad (6)$$

Из анализа (5), (6) можно сделать заключение, что для каждого стандартного характеристического полинома, определяемого коэффициентами A_1, A_2, A_3, A_4 , существует строго определенное значение γ , а быстродействие электропривода зависит от частоты свободных колебаний Ω_{12} . О невозможности произвольного - свободно выбора Ω_0 отмечается авторами [9] при реализации упрощенной процедуры синтеза регулятора системы управления двухмассовым электроприводом. В таблице 1 в качестве примера для стандартных форм характеристических полиномов ЭМС с минимизацией колебательности и с $A_4 = 1,0$ приводятся расчетные значения γ и Ω_0 .

Из (5), (6) также ясно, что при практической реализации метода СХП в рамках рассматриваемой системы для достижения минимальной колебательности и заданного быстродействия требуется варьировать и параметры механической подсистемы γ и Ω_{12} .

Полученные аналитически из соотношений (4) и (6) условия выбора среднегеометрического корня Ω_0 близкое к частоте свободных колебаний Ω_{12} физически означает, что энергия упругих колебаний МП целиком (полностью) извлекается электромагнитной подсистемой [3], а для распределения корней № 7 таблицы 1 силы упругой связи компенсируются силами инерционной связи [8].

Параметры настройки регуляторов, которые обеспечивают желаемое распределение корней характеристического полинома ЭМС определяется следующими зависимостями:

$$T_T = \frac{1}{A_1 \Omega_0}, \quad (7)$$

$$K_R = \frac{\gamma T_{M1} \Omega_0}{A_3} A_4. \quad (8)$$

Таблица 1 – Варианты распределения корней

№	Варианты распределения корней	A_1	A_2	A_3	Параметры	
					γ	Ω_0
1	Биномиальное	4	6	4	5	Ω_{12}
2	Псевдополином Бесселя	3,26	4,56	3,26	3,56	Ω_{12}
3	Кратные комплексно-сопряженные корни ($\zeta = 0,75$)	3	4,25	3	3,25	Ω_{12}
4	Оптимум по модулю ($\zeta = 2\sqrt{2}$)	$2\sqrt{2}$	4	$2\sqrt{2}$	3,0	Ω_{12}
5	Распределение по Баттерворту	2,613	3,414	2,613	2,414	Ω_{12}
6	Равные проекции на мнимую ось ($\zeta = 1/2$)	2	3	2	2	Ω_{12}
7	Компенсация упругой связи	$2\sqrt{\gamma-1}$	$\gamma+1$	$2\sqrt{\gamma-1}$	$\gamma > 1,0$ $\gamma < 5,0$	Ω_{12}

* коэффициент $A_4 = 1,0$

Как следует из (7) в контуре формирования электромагнитного момента постоянная интегрирования T_T определяется коэффициентом A_1 и величиной среднегеометрического корня, который зависит от частоты свободных колебаний Ω_{12} (6). Постоянная времени форсирования T_2 пропорционально-интегрального регулятора тока (момента) принимается равной электромагнитной постоянной времени T_3 силовой цепи

$$T_2 = T_3. \quad (9)$$

Коэффициент усиления пропорционального регулятора скорости K_R (8) зависит от соотношения коэффициентов A_4, A_3 и оптимален (в смысле желаемых переходных характеристик) только для соответствующего распределению корней, коэффициента соотношения инерционных масс γ (5) и среднегеометрического корня Ω_0 (6).

ВЫВОДЫ

Анализ условий совместности системы уравнений (5), (6) расчетных формул параметров (7), (8) имеют простую математическую интерпретацию, но выводы, которые следуют из условий и формул, не являются тривиальными.

Во-первых, при решении задач синтеза систем автоматического управления электроприводов с подавлением упругих механических колебаний величину среднегеометрического корня Ω_0 следует выбирать в зависимости от коэффициентов соответствующей стандартной формы и частоты упругих колебаний (6).

Во-вторых, при физически имеющейся в ЭМС инерционной связи оптимальный процесс с желаемым распределением корней реализуется при определенном значении коэффициента соотношения инерционных масс γ . Коэффициенты выбранной при оптимизации ЭМС стандартной формы распределения корней предопределяют величину γ значением (5), а быстродействие, определяемое среднегеометрическим корнем (6), нельзя задавать произвольно.

В-третьих, параметры ЭП и МП для расчета регуляторов системы автоматического управления (7), (8) находятся во взаимосвязи. Действительно, если определить демпфирующие возможности отдельной электромагнитной подсистемы

$$\xi_D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_R T_T}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_1 A_3}{\gamma A_4}}, \quad (10)$$

то видно, что эта связь с коэффициентами полинома инерционная, ξ_D зависит от γ и коэффициентов A_1, A_3, A_4 . Это соответствует и физическому представлению о демпфирующих свойствах электромеханической связи [5].

Следует также обратить внимание при синтезе по методу стандартных характеристических полиномов, что в ЭМС с областью значений коэффициентов соотношения инерционных масс $2 < \gamma < 5$ (таблица 1) значительно

эффективнее реализовать «инерционным» демпфированием (распределение корней № 7 таблицы 1) [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электро-привода / В. И. Ключев. – М. : Энергия, 1971. – 320 с.
2. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
3. Задорожний Н. А. Анализ электромеханического демпфирующего действия в электро-приводах с вязким трением и упругим механическим звеном / Н. А. Задорожний, В. Д. Земляков, А. Г. Ровенский // Электричество. – 1985. – №5. – С. 60–63.
4. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Кузовков Н. Т. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
5. Задорожний Н. А. Оптимизация процессов преобразования энергии электромеханического взаимодействия в электроприводах с упругими связями / Н. А. Задорожний, И. Н. Задорожня // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «Электро-информ». – Львов : Экоинформ, 2009. – С. 80–81.
6. Бургин Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем: монография / Бургин Б. Ш. – Новосибирск : НЭТИ, 1992. – 199 с.
7. Осичев А. В. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе / Осичев А. В., Когляров В. О., Марков В. С. // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Труды конференции. – Харьков : Основа, 1997. – С. 104–109.
8. Задорожний Н. А. Анализ и синтез электромеханических систем управления приводом машин с упругими механическими связями : учебное пособие / Задорожний Н. А., Задорожня И. Н. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 192 с.
9. Акимов Л. В. Синтез статического регулятора скорости двухмассового электропривода переменного тока ТРН-АД с нелинейной нагрузкой / Л. В. Акимов, Пирожок А. В. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – Вип. 12, Т.1. – С. 124–129.
10. Задорожня И. Н. Анализ условий предельной степени демпфирования колебаний в электромеханической системе с упругими связями / И. Н. Задорожня, Н. А. Задорожний // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 28. – С. 210–213.

Статья поступила в редакцию 17.12.2014.
После доработки 22.12.2014.

Задорожня І. М.¹, Задорожній М. О.²

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електромеханічні системи автоматизації», Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електромеханічні системи автоматизації», Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДВОХМАСОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ СИНТЕЗІ ПАРАМЕТРІВ НА ОСНОВІ СТАНДАРТНИХ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ПОЛІНОМІВ

Розглянуто задачу синтезу систем автоматичного управління електроприводами з пружними зв'язками. Авторами вирішується актуальна практичне завдання врахування особливостей процедури синтезу параметрів двомасових електромеханічних систем при реалізації властивостей власне електроприводу як динамічного гасителя коливань. Показано, що при максимальному взаємодії пружна двомасова електромеханічна система буде описана характеристичним поліномом, коефіцієнти якого для реалізації «інерційного» демпфірування повинні обов'язково враховувати варіацію параметрів механічної підсистеми

Ключові слова: електропривод, пружні зв'язки, синтез систем, автоматичне управління, метод стандартних характеристичних поліномів, демпфірування, електромеханічна зв'язок.

Zadorozhnyaya I. ¹, Zadorozhniy N. ²

¹PhD, Associate Professor, Associate professor of «Electromechanical automation system» Donbas State Machine-building Academy, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Associate professor of «Electromechanical automation system» Donbas State Machine-building Academy, Ukraine

ANALYSIS OF FEATURES OF AUTOMATIC CONTROL DUAL MASS ELECTRIC PARAMETERS IN THE SYNTHESIS BASED ON STANDARD CHARACTERISTIC POLYNOMIAL

The article considers the problem of synthesis of automatic control systems for electrical drives with elastic constraints. Analytical dependences, confirming that the optimal transition process to the desired root distribution is realized in electromechanical drive system only at a specific value of the distribution coefficient of inertial mass z , while the speed can not be arbitrarily set.

It is shown that under the maximum interaction the elastic two-mass electromechanical system is described by the characteristic polynomial and its coefficients for the implementation of the «inertia» of damping must necessarily take into account the variation of the mechanical subsystem parameters.

Keywords: electrical drive, elastic connection, the synthesis of systems, automatic control, the standard method of characteristic polynomials, damping electromechanical coupling.

REFERENCES

1. Klyuchev V. I. Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda, Moscow, Russian Federation, Energiya, 320 p.
2. Bortsov, Yu. A., Sokolovskiy G. G. Tiristornyie sistemyi elektroprivoda s uprugimi svyazyami, Sankt-Peterburg, Energiya, 1979, 160 p.
3. Zadorozhniy N. A., Zemlyakov V. D., Rovenskiy A. G. Analiz elektromehaničeskogo dempfiroyuscheho deystviya v elektroprivodah s vyzkim treniem i uprugim mehaničeskim zvenom, *Elektrichestvo*, 1985, No. 5, pp. 60–63.
4. Kuzovkov N. T. Modalnoe upravlenie i nablyudayushie ustroystva. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 184 p.
5. Zadorozhnyaya I. N. Sintez parametrov elektromehaničeskoy sistemyi glavnoy linii kletey nepreryivnykh prokatnykh stanov s minimalnyimi dinamicheskimi nagruzkami, *Zbirnik naukovih prats Dniprodzerzhinskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu*. Dniprodzerzhinsk, DGTU, 2007, pp. 226–229.
6. Burgin B. Sh. Analiz i sintez dvuhmassovyih elektromehaničeskikh sistem: monografiya. Novosibirsk, NETI, 1992, 199 p.
7. Osichev A. V., Kotlyarov V. O., Markov V. S. Standartnyie raspredeleniya korney v zadachah sinteza v elektroprivode, *Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika*. Harkov, Osnova, 1997, pp. 104–109.
8. Zadorozhniy N. A., Zadorozhnyaya I. N. Analiz i sintez elektromehaničeskikh sistem upravleniya privodom mashin s uprugimi mehaničeskimi svyazyami: uchebnoe posobie. Kramatorsk, DGMA, 2010, 192 p.
9. Akimov L. V., Pirozhok A. V. Sintez statičeskogo reguljatora skorosti dvuhmassovogo elektroprivoda peremennogo toka TRN-AD s nelineynoy nagruzkoj, *Visnik Natsionalnogo tehničnogo unIversitetu «Harkivskiy polltehnIchniy Institut»*. Harkiv, NTU, «HPI», 2002.
10. Zadorozhnyaya I. N., Zadorozhniy N. A. Analiz uslovij predelnoy stepeni dempfirovaniya kolebanij v elektromehaničeskoy sisteme s uprugimi svyazyami, *Visnik Natsionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskiy polltehnIchniy Institut»*. Harkiv, NTU «HPI», 2010, Vip. 28, pp. 210–213.