АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 625.083

Ирина Александровна Тихомирова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: tia@eims.ispu.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: tsv@ispu.ru

Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с упругими кинематическими звеньями на основе разделения модели гармонического возмущения¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время удалось достичь большого разнообразия структурных решений селективно-инвариантных электромеханических систем с различными схемами компоновки внутренней модели возмущений для электроприводов с жесткими кинематическими звеньями. Однако для селективно-инвариантных систем с «жесткой» кинематикой механической части были разработаны методы структурно-параметрического синтеза только для регуляторов с объединенной моделью возмущения. В связи с этим актуальным является дальнейшее расширение структурного разнообразия систем, учитывающих специфические особенности влияния упругих кинематических звеньев механической части, за счет применения при их синтезе распределенных моделей гармонического возмущения.

Материалы и методы. В основу проводимого структурно-параметрического синтеза положены методы теории модального управления, редуцирования регуляторов, принципы селективной инвариантности, разделения темпов движения локальных подсистем, регулирования по координатам состояния и по выходу, каскадное и подчиненное регулирование координат, разделения модели возмущения на отдельные составляющие в контурах управления. Исследование проведено путем постановки детализированных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных электромеханических систем.

Результаты. Разработаны новые структурные решения селективно-инвариантных электромеханических систем с упругими механическими звеньями, сформированные с использованием дополнительного принципа разделения модели возмущения на отдельные составляющие с их перемещением в

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ.

The project was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

контуры «быстрых» и «медленных» подсистем. На основе проведенных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных систем выполнено их сравнительное исследование по комплексу определяющих показателей качества.

Выводы. Полученные результаты, отражающие степень выполнения всего комплекса заданных требований, позволяют наглядно продемонстрировать основные достоинства и недостатки каждого варианта селективно-инвариантных электромеханических систем с упругими звеньями, определяют области их предпочтительного использования и облегчают проектировщикам решение задач их структурной оптимизации по выбранной схеме компромиссов.

Ключевые слова: двухконтурная электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, разделение модели возмущения, селективная инвариантность, редукция управляющих устройств

Irina Aleksandrovna Tikhomirova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tia@eims.ispu.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Rector, Head of the Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tsv@ispu.ru

Development and research of selectively invariant electromechanical systems with elastic kinematic units based on the separation of the harmonic disturbance model

Abstract

Background. Currently there is a big variety of structure solutions of the selective invariant electromechanical systems with different layout schemes of disturbance internal model for electric drives with robust kinematic units. However, methods of structural parametric synthesis for controllers with combined triggering model only were developed selective invariant systems with “robust” kinematic of mechanical part. Consequently, further improvement of the structure variety of systems for special effects of elastic kinematic units of mechanical part is of current interest. It can be performed by including the distributed model of harmonic disturbance into the synthesis process.

Materials and methods. Structural parametric synthesis is based on the methods of modal control theory, regulators reduction, selective invariant principals, velocity separation in local sub-systems, regulation by coordinates of state and by output, cascade and slaved coordinates regulation, splitting of disturbance model to separate elements in managing contours. Investigation was performed by specified computing experiments with synthesized electromechanical system models.

Results. Now, new structure solutions of selective invariant electromechanical systems with elastic mechanical elements are developed. They are created by using the additional separation principle for disturbance model into separate parts and moving them in to the contours of “fast” and “slow” sub-systems. Acquired models of synthesized systems were compared upon the complex of main quality indicators, the comparison was based on the performed computing experiments.

Conclusions. The acquired results of complex performance of set requirements demonstrate main pros and cons for each variant of selective invariant electromechanical systems with elastic elements, determine areas of their preferred usage and allow the developers to simplify the solution of structure optimization based on selected schema of compromises.

Key words: dual circuit electromechanical system, harmonic disturbance compensation, internal model separation, selective invariance, control devices reduction

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.1.049-059

Состояние вопроса. Благодаря применению индивидуальных приводных устройств удается достичь существенного упрощения или полного исключения кинематических передач между электродвигателем (ЭД) и главным рабочим органом (РО) и тем самым существенно снизить габариты и повысить точность работы машин.

матических передач между электродвигателем (ЭД) и главным рабочим органом (РО) и тем самым существенно снизить габариты и повысить точность работы машин.

При этом РО, сохраняющий значительные габаритные размеры, становится главным элементом механической части электромеханических систем (ЭМС).

В таком случае движение РО в совокупности с его конструктивными особенностями и дефектами изготовления оказывает гораздо большее влияние на момент нагрузки двигателя, вызывая появление характерных гармонических колебаний, которые в первом приближении можно представить в виде [1]

$$M_H(t) = M_0 + M_1 \cdot \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где M_0 – постоянная составляющая; M_1 и ω_1 – амплитуда колебаний момента и скорость вращения РО.

Возмущающее воздействие (1), состоящее из постоянной и гармонической составляющих, имеет следующий вид изображения Лапласа:

$$M_H(s) = \frac{M_0}{s} + \frac{M_1 \omega_1}{s^2 + \omega_1^2}, \quad (2)$$

где s – комплексная переменная Лапласа; $\omega_1 = \Omega/i$, Ω – частота вращения ЭД; i – передаточное отношение редуктора.

Флуктуации моментов нагрузки и, как следствие, угловых скоростей ЭД и РО машин вызывают неравномерность движения, которая приводит к снижению точности выполнения операций технологического процесса.

Эффективным способом компенсации воздействий указанного типа является применение принципа селективной инвариантности САУ, основанного на использовании внутренней модели возмущения [2–5].

Как показано в [6], применение принципа разделения модели гармонического возмущения момента нагрузки ЭД на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в структуру «быстрой» внутренней подсистемы создает новые возможности для улучшения показателей качества селективно-инвариантных ЭМС (СИ ЭМС) и позволяет получить большое разнообразие структур с различными свойствами.

Тем не менее до настоящего времени при наличии в системе упругих кинематических звеньев механической части данный принцип не применялся.

В связи с этим актуальным является дальнейшее расширение структурного раз-

нообразия и возможностей СИ ЭМС, имеющих в своем составе упругие кинематические звенья, за счет применения при их синтезе распределенных моделей гармонического возмущения.

Материалы и методы. В качестве объекта исследований примем типовую ЭМС, состоящую из электропривода (ЭП), включающего силовой преобразователь и двигатель постоянного тока независимого возбуждения, и механической части, физические свойства которой могут быть описаны с помощью упругой двухмассовой механической системы (рис. 1,а). В схеме (рис. 1,а) приняты следующие обозначения величин и параметров: U_y , U – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя (СП); I_a – ток якорной цепи электродвигателя (ЭД); $K_{с.п.}$ и $T_{с.п.}$ – коэффициент передачи и постоянная времени СП напряжения; R_a и T_a – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи; C – конструктивная постоянная ЭД; J_1 и J_2 – приведенные моменты инерции ротора ЭД и рабочего органа (РО) соответственно; C_{12} и b_{12} – приведенные коэффициенты жесткости и внутреннего трения кинематической передачи.

Для конкретности и возможности сопоставления результатов, полученных для других вариантов ЭМС как с жесткими, так и с упругими звеньями, примем следующие значения параметров системы, использованные в [6, 10]: $K_{с.п.} = 22$, $T_{с.п.} = 0,001$ с, $R_a = 0,177$ Ом, $T_a = 0,002$ с, $C = 1,37$ Вб, $J_1 = 0,4$ кг·м², $C_{12} = 500$ Н·м/рад, $b_{12} = 4$ Н·м·с/рад, $J_2 = 0,4$ кг·м², $i = 10$, $M_1 = 8,22$ Н·м.

Предположим, что требуется обеспечить время нарастания переходной характеристики системы регулирования частоты вращения в линейной зоне ее работы не более 300 мс при отсутствии перерегулирования и нулевую статическую ошибку по скорости от действия момента нагрузки вида (1), а также эффективную динамическую компенсацию возмущения со временем восстановления, равным времени регулирования.

Будем анализировать переходные характеристики ЭМС при пуске ЭД на пониженную частоту вращения $\Omega = 15,7$ рад/с (что соответствует скорости вращения РО $\omega_1 = \Omega/i = 1,57$ рад/с).

Рис. 1. Структурные схемы объекта управления и различных вариантов ЭМС

Согласно рекомендациям [7], для повышения робастных свойств синтезируемых САУ (исключения появления положительных обратных связей или неминимально-фазовых звеньев в составе регуляторов) пренебрежем в расчетах относительно малыми постоянными времени $T_{с.п.}$ и T_a . В результате этого передаточная функция (ПФ) объекта управления принимает следующий вид:

$$H_{\text{оу}}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{4258s + 532200}{s^3 + 46,5s^2 + 2766s + 33140} \quad (3)$$

Как показали результаты исследований, проведенных для систем с «жесткой»

кинематикой² [6], с увеличением порядка динамической составляющей регулятора, вводимой в состав «быстрой» подсистемы, возрастает чувствительность СИ ЭМС к влиянию факторов, не учтенных при ее синтезе, в частности к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе.

Этот неблагоприятный эффект указывает на целесообразность применения структурных решений ЭМС, предполагающих введение более простой интегральной составляющей в состав внутреннего контура управления.

² Тихомирова И.А. Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Иваново, 2018.

Перемещение интегральной составляющей модели возмущения (МВ) в «быстрый» внутренний контур управления ЭМС призвано обеспечить лучшее качество отработки постоянной составляющей момента нагрузки ЭД и снижение порядка полиномиального регулятора (ПР) внешнего контура, содержащего колебательную часть МВ.

Результаты. Наименьшей сложностью регуляторов будет характеризоваться ЭМС, обозначенная далее, как ПРМВ_к(РС_и)б, структура которой представлена на рис. 1,б. Она содержит «быстрый» внутренний контур, построенный на основе регулятора состояния (РС) с интегральной составляющей МВ, настраиваемый на высокое быстродействие, значительно (в 5–6 раз) превосходящее заданные динамические требования к САУ, и внешний контур с ПР, содержащий колебательную составляющую МВ.

Такая структура формируется на основе сочетания принципов регулирования

состояния (РС), разделения темпов движения (РД), полиномиального регулирования (ПР) и разделения модели возмущения (РМВ). Для синтеза ее регуляторов может использоваться следующая расчетная процедура.

Методом МУ синтезируется РС внутренней подсистемы, обеспечивающий повышенное быстродействие (43 мс). Для этого в качестве желаемого принимается характеристический полином Ньютона 4-го порядка с величиной СГК $\Omega_{0Б} = 125 \text{ с}^{-1}$. Полученные значения коэффициентов обратных связей (ОС) приведены в первой строке табл. 1.

При расчете внешнего ПР с колебательной составляющей МВ используется основное полиномиальное уравнение синтеза

$$P(s) F(s) + Q(s) E(s) = D(s) \quad (4)$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ – характеристический полином (ХП) и полином воздействия ПФ внутренней подсистемы; $F(s)$ и $E(s)$ – ХП и полином воздействия регулятора.

Таблица 1. Структуры и параметры синтезированных регуляторов

№ САУ	Тип САУ	Структура и параметры регулятора
1	ПРМВ _к (РС _и)б	$K = [-1,06 \quad -104,24 \quad -9,88 \quad -458,8]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{26s + 166,54}{s^2 + 1,57^2}$
2*	ПРМВ _к (ПР _и)б	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{40,1s^3 + 6439,92s^2 + 487943,26s + 14147944,4}{s^3 + 793,5s^2 + 83556,17s}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{26s + 166,54}{s^2 + 1,57^2}$
3	П(ПРМВ _к -РС _и)	$K = [-0,47 \quad -32,61 \quad -1,03 \quad -27,8]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,966s^2 + 37,283s + 234,167}{s^2 + 1,57^2}$
4*	П(ПРМВ _к -ПР _и)	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{5,2s^3 + 369,38s^2 + 15236,36s + 221061,63}{s^3 + 373,5s^2 + 31204,79s};$ $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,966s^2 + 37,283s + 234,167}{s^2 + 1,57^2}$
5	П2(ПРМВ _к -РС _и)	$K = [-0,47 \quad -32,61 \quad -1,03 \quad -27,8];$ $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0578s^3 + 3,164s^2 + 69,313s + 431,563}{(s^2 + 1,57^2)(0,0005s + 1)}$
6*	П2(ПРМВ _к -ПР _и)	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{5,2s^3 + 369,38s^2 + 15236,36s + 221061,63}{s^3 + 373,5s^2 + 31204,79s}$ $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0578s^3 + 3,164s^2 + 69,313s + 431,563}{(s^2 + 1,57^2)(0,0005s + 1)}$

* неработоспособные (неэффективные) САУ

Высокое быстродействие внутренней подсистемы с интегральным РС дает основание считать ее безынерционным звеном при синтезе внешнего ПР, т.е. принять при указанных параметрах $P(s) = 1$, $Q(s) = 1$. В соответствии с заданными требованиями динамики, при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 2-го порядка назначаем СГК $\Omega_0 = 13 \text{ с}^{-1}$, что соответствует заданному быстродействию (300 мс).

В этом случае уравнение синтеза (4) принимает следующий развернутый вид:

$$1 \cdot (s^2 + 1,57^2) + 1 \cdot (e_1 s + e_0) = (s + 13)^2.$$

Его решение позволяет получить ПФ внешнего регулятора минимального порядка, параметры которой приведены в первой строке табл. 1.

ЭМС, синтезированная указанным методом, способна обеспечить выполнение заданных технических требований при минимальной степени сложности динамической части регулятора (общий порядок звеньев равен 5). Но она, очевидно, будет обладать повышенной чувствительностью к неучтенным при синтезе факторам, например к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе напряжения.

Сочетание тех же принципов – РД и РМВ – может быть обеспечено при измерении одной выходной координаты в структуре ЭМС, представленной на рис. 1, в и обозначенной как $\text{ПРМВ}_K\text{-(ПР}_И\text{)}_Б$. В этом случае «быстрая» внутренняя подсистема регулирования скорости реализуется динамическим $(\text{ПР}_И)_Б$ с полиномами числителя $R(s)$ и знаменателя $s \cdot C(s)$ его ПФ, а уравнение синтеза внутреннего регулятора принимает вид

$$A(s) \cdot s \cdot C(s) + B(s)R(s) = P(s). \quad (5)$$

При выборе в качестве $P(s)$ полинома Ньютона 6-го порядка с величиной СГК (для быстродействия в 75 мс) уравнение (5) принимает следующий развернутый вид:

$$\begin{aligned} & (s^3 + 46,5s^2 + 2766s + 33140) \times \\ & \times (c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s) + (4258s + 532200) \times \\ & \times (r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0) = (s + 180)^6. \end{aligned}$$

Его решение позволяет получить ПФ регулятора с параметрами, приведенными во второй строке табл. 1.

Однако, несмотря на точное выполнение вычислительных процедур, получить

работоспособный $\text{ПР}_И$ внутреннего контура удастся только при быстродействии, в 4 раза превышающем заданные требования динамики, что при синтезе внешнего ПР с МВ оказывается недостаточным для обеспечения желаемого разделения темпов процессов. Кроме того, такой регулятор является неминимально-фазовым звеном высокого порядка (общий порядок звеньев с учетом внеконтурного префильтра равен 9), что приводит к чрезмерно высокой чувствительности системы к возможным вариациям внутренних параметров.

Использование принципа последовательной коррекции (П) и более «медленная» настройка внутренней подсистемы регулирования скорости с $\text{РС}_И$ и $\text{ПР}_И$ в структурных схемах рис. 1, б, в может обеспечить снижение чувствительности ЭМС к воздействию помех и влиянию запаздывания сигналов СП, а применение дополнительного принципа РМВ позволит понизить порядок регулятора по сравнению с аналогичными САУ с объединенной МВ. В этом случае при синтезе внешнего ПР с МВ по уравнению (4) умеренно (в 2–2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется аperiодическим звеном 1-го порядка.

Для синтеза внутренней подсистемы на базе $\text{РС}_И$ в качестве желаемого принимается ХП Ньютона 4-го порядка величиной СГК $\Omega_{0Б} = 62 \text{ с}^{-1}$, что позволяет при синтезе внешнего ПР с колебательной составляющей МВ аппроксимировать ее передаточной функцией вида

$$H_{БН}(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{1}{0,035s + 1},$$

получаемой путем минимизации различий соответствующих переходных характеристик по методу наименьших квадратов.

Уравнение (4) синтеза внешнего регулятора при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 3-го порядка с величиной СГК $\Omega_0 = 19 \text{ с}^{-1}$ принимает следующий развернутый вид:

$$\begin{aligned} & (0,035s + 1)(s^2 + 1,57^2) + 1(e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = \\ & = (s + 19)^3. \end{aligned}$$

Полученные значения коэффициентов ОС, выражения и параметры полиномов ПФ регуляторов для такой структуры, обозначенной как $\text{П(ПРМВ}_K\text{-РС}_И\text{)}_Б$, приведены в третьей строке табл. 1.

При синтезе внутренней подсистемы с использованием $PR_{\text{и}}$ и при выборе в качестве $P(s)$ полинома Ньютона 6-го порядка с величиной СГК (для быстрогодействия в 150 мс) уравнение (5) принимает следующий развернутый вид:

$$\begin{aligned} & (s^3 + 46,5s^2 + 2766s + 33140) \times \\ & \times (c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s) + (4258s + 532200) \times \\ & \times (r_3s^3 + r_2s^2 + r_1s + r_0) = (s + 70)^6. \end{aligned}$$

Виды и параметры ПФ регуляторов для структуры ЭМС, представленной на рис. 1, в и обозначенной как П(ПРМВ_к-ПР_и), приведены в четвертой строке табл. 1.

Использование ЭМС такой структуры представляется нецелесообразным, поскольку она будет обладать повышенной сложностью и очень высокой чувствительностью к вариациям внутренних параметров как управляемого объекта, так и самого регулятора вследствие того, что общий порядок звеньев регуляторов увеличивается до десяти.

Применение принципа последовательной коррекции при использовании РСИ в составе внутреннего контура управления незначительно повышает степень сложности регуляторов, но сопровождается погрешностями аппроксимации внутренней подсистемы звеном низкого порядка.

Снизить погрешности аппроксимации позволяет представление внутренней подсистемы звеном 2-го порядка с ПФ вида

$$H_{\text{вн}}(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{900}{s^2 + 48s + 900},$$

также получаемой приближением переходных характеристик по методу наименьших квадратов.

Уравнение (4) синтеза внешнего регулятора при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 4-го порядка с величиной СГК $\Omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ принимает следующий развернутый вид:

$$\begin{aligned} & (s^2 + 48s + 900)(s^2 + 1,57^2) + 900 \times \\ & \times (e_3s^3 + e_2s^2 + e_1s + e_0) = (s + 19)^4. \end{aligned}$$

Полученные значения коэффициентов ОС, выражения и параметры полиномов ПФ регуляторов для данной ЭМС, обозначенной как П2(ПРМВ_к-РС_и), приведены в пятой строке табл. 1. Платой за снижение погрешностей, вносимых процессами аппроксима-

ции внутреннего контура звеньями более низких порядков, будет повышение степени сложности регуляторов (суммарный порядок звеньев становится равен 6).

Следует отметить, что замена интегрирующего РС внутренней подсистемы на интегрирующий ПР в данном варианте ЭМС оказывается нецелесообразной, так как приведет к росту суммарного порядка динамических звеньев регулятора до одиннадцати.

Виды и параметры ПФ регуляторов для структуры ЭМС, представленной на рис. 1, в и обозначенной как П2(ПРМВ_к-ПР_и), приведены в шестой строке табл. 1.

Очевидно, что каждый из синтезированных вариантов ЭМС будет обладать своими отличительными достоинствами и недостатками, обусловленными не только особенностями конкретного ОУ, но и рациональным разделением темпов движения внешнего и внутреннего контуров управления.

Однако степень сложности регуляторов, определяемая общим порядком их динамических звеньев, в предложенных структурных решениях может не удовлетворять проектировщика.

Применение двухвходовой (расширенной) канонической формы наблюдаемости (КФН)³ [8] позволяет дополнительно понизить порядок регуляторов в синтезированных системах за счет исключения из состава управляющего устройства префильтров.

В качестве примера реализации предложенного метода рассмотрим синтез регулятора для системы, представленной на рис. 1, б и обозначенной как П2(ПРМВ_к-РС_и). Для нее был получен самый высокий порядок динамических звеньев $N_{\text{пер}} = 6$.

Исключение префильтров из состава управляющих устройств ранее синтезированных ЭМС позволяет существенно понизить порядок регуляторов при сохранении остальных показателей качества на достигнутом уровне. Суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{пер}}$) для синтезированных таким образом ЭМС приведен в табл. 2 (данные указаны в скобках).

³ Тихомирова И.А. Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Иваново, 2018.

Таблица 2. Результаты вычислительных экспериментов с моделями ЭМС

№ САУ	Тип САУ	Факторы качества ЭМС			
		$J_2 = \text{var}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$e^{-\tau S} (\tau = \text{var}, \text{мс})$	$C_{12} = \text{var}, \text{Н} \cdot \text{м/рад}$	$N_{\text{пер}}$
1	ПРМВк-(РСи)б	[0,32 1,72]	0,00125	[0 1380]	4 (3)*
3	П(ПРМВк-РСи)	[0,039 0,75]	0,01	[145 3900]	5 (3)
5	П2(ПРМВк-РСи)	[0,142 1,7]	0,0048	[0 1300]	6 (4)

*() – порядок динамических звеньев регуляторов, представленных в канонической форме наблюдаемости

Однако следует отметить, что исходные структуры регуляторов (табл. 1) могут оказаться более удобными при их программной реализации на применяемых микропроцессорных устройствах.

С учетом выражений параметров ПФ данного регулятора, приведенных в третьей строке табл. 1, составим полиномиальное уравнение для внешнего контура управления:

$$U_y = \frac{1}{s^3}(\Omega_3 - e_0 \Omega - f_0 U_y) + \frac{1}{s^2}(-e_1 \Omega - f_1 U_y) + \frac{1}{s}(-e_2 \Omega - f_2 U_y) + (-e_3 \Omega). \quad (6)$$

Полученная по уравнению (6) структурная схема регуляторов для системы

П2(ПРМВк-РСи), представленная в расширенной КФН, приведена на рис. 2.

Путем постановки детализированных вычислительных экспериментов с моделями наиболее эффективных из синтезированных систем выполнено их сравнительное исследование по комплексу определяющих показателей качества. Оценивалась раздельная отработка (в момент времени $t = 2$ с) постоянной (фактор $M_{\underline{}}$) и колебательной (фактор $M_{\sim}$) составляющих момента нагрузки. Наиболее характерные графики указанных переходных процессов приведены на рис. 3, 4, где номера кривых соответствуют порядковым номерам ЭМС в табл. 1.

Рис. 2 Структурная схема системы П2(ПРМВк-РСи) с регулятором в расширенной КФН

Рис. 3. Оценка качества отработки гармонического момента нагрузки: а – 4 балла; б – 5 баллов

Рис. 4. Оценка качества обработки постоянного момента нагрузки: а – 2 балла; б – 4 балла

Помехоустойчивость ЭМС (фактор $\Pi\sim$) оценивается по уровню пульсаций выходного сигнала скорости при наложении аддитивной помехи в виде белого шума с мощностью $N = 0,00001$ Вт/Гц в канале ее измерения. Наиболее характерные графики тока и скорости для различных вариантов систем (табл. 1) в соответствии с принятой нумерацией приведены на рис. 5.

Путем проведения многократных вычислительных экспериментов с моделями ЭМС были определены диапазоны допустимых вариаций момента инерции РО (фактор $J_2 = \text{var}$), коэффициента жесткости (фактор $C_{12} = \text{var}$) и максимальные значения времени «чистого» запаздывания си-

нала в СП (фактор $e^{-\tau s}$, $\tau = \text{var}$), при которых системы сохраняют устойчивость. Полученные значения указанных факторов, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) синтезированных ЭМС приведены в табл. 2.

Результаты исследований в виде графиков переходных процессов и числовых значений указанных факторов, полученных в ходе экспериментов, оцениваются по традиционной 5-балльной шкале экспертным методом и сводятся в итоговую таблицу (табл. 3), где приводится суммарная оценка качества Q_{Σ} каждой ЭМС, полученная при условии одинаковой значимости перечисленных факторов.

Рис. 5. Оценка реакции системы на введение помехи в цепи измерителя скорости: а – 4 балла; б – 5 баллов

Таблица 3. Результаты оценки качества ЭМС по комплексу заданных требований

№ САУ	Тип САУ	Оценки факторов качества ЭМС							
		$M\sim$	$M=$	J_2	$\Pi\sim$	$e^{-\tau s}$	C_{12}	Сложность $N_{\text{рег}}$	Q_{Σ}
1	ПРМВк-(РСи)б	3	2	2	5	1	3	5 (5)	21 (21)
3	П(ПРМВк-РСи)	2	4	4	5	5	5	4 (5)	29 (30)
5	П2(ПРМВк-РСи)	4	3	5	4	3	3	3 (5)	25 (27)

Полученные результаты, отражающие в целом степень выполнения всего комплекса заданных требований, наглядно демонстрируют основные достоинства и недостатки каждого варианта ЭМС с распределенными моделями возмущения, органично дополняют аналогичные результаты, полученные ранее для селективно-инвариантных систем с объединенными моделями возмущения⁴ [6, 9], и позволяют проектировщикам в более полном объеме решать задачи структурной оптимизации по выбранной схеме компромиссов.

Выводы. Результаты проведенных исследований показывают, что распределенная модель возмущения в САУ с упругими кинематическими звеньями дает меньшее улучшение показателей качества по сравнению с системами с «жесткой» кинематикой⁵ [9]. Кроме того, необходимость более глубокого редуцирования объекта при синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем приводит к большим трудностям при использовании полиномиальных регуляторов в составе «быстрых» внутренних контуров.

Тем не менее предложенными методами могут быть получены достаточно эффективные решения на базе интегральных регуляторов состояния с лучшим сочетанием свойств в сравнении с САУ с объединенной моделью возмущения. Поэтому их, безусловно, целесообразно рассматривать как альтернативные решения в ходе проектирования селективно-инвариантных электромеханических систем с упругими кинематическими звеньями.

Список литературы

1. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем // Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II. – М.: Наука, 1965.
3. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.

⁴ Тихомирова И.А. Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Иваново, 2018.

⁵ Там же.

4. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012.

5. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999.

6. Тарарыкин С.В., Тихомирова И.А., Копылова Л.Г. Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. – 2016. – № 12. – С. 51–60.

7. Аполонский В.В., Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В. Редуцирование регуляторов линейных динамических систем на основе анализа физических особенностей объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2016. – № 5. – С. 5–21.

8. Сокращение порядка управляющего устройства при синтезе САУ полиномиальным методом / В.В. Тютюков, Л.Г. Копылова, И.А. Тихомирова, Е.М. Шляцкая // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 5. – С. 44–52.

9. Структурно-параметрический синтез и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с упругими кинематическими звеньями / И.А. Тихомирова, С.В. Тарарыкин, Л.Г. Копылова, В.В. Аполонский // Электротехника. – 2021. – № 4.

References

1. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannye elektroprirody* [Automated electric drives: translated from German]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985.
2. Kulebakin, V.S. Ob osnovnykh zadachakh i metodakh povysheniya kachestva avtomaticheskogo regulirovaniya sistem [On the main tasks and methods of improving the quality of automatic control systems]. *Trudy II Vsesoyuznogo soveshchaniya po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya. T. II* [Proceedings of the II all-union meeting on the theory of automatic control. Vol. II]. Moscow: Nauka, 1965.
3. Gudvin, G.K., Grebe, S.F., Sal'gado, M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Control system design]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004.
4. Gayduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: Fizmatlit, 2012.
5. Andrievskiy, B.R., Fradkov, A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automatic control theory with examples in MATLAB]. Saint-Petersburg: Nauka, 1999.

6. Tararykin, S.V., Tikhomirova, I.A., Kopylova, L.G. Primenenie printsipa razdeleniya modeli garmonicheskogo vozmushcheniya v strukturno-parametricheskom sinteze selektivno-invariantnykh elektromekhanicheskikh sistem [Application of the principle of separation of the harmonic disturbance model in the structural-parametric synthesis of selectively invariant electromechanical systems]. *Elektrotehnika*, 2016, no. 12, pp. 51–60.

7. Apolonskiy, V.V., Kopylova, L.G., Tararykin, S.V. Redutsirovanie regulyatorov lineynykh dinamicheskikh sistem na osnove analiza fizicheskikh osobennostey ob"ekta [Reduction of controllers of linear dynamic systems based on the analysis of the physical features of the object]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2016, no. 5, pp. 5–21.

8. Tyutikov, V.V., Kopylova, L.G., Tikhomirova, I.A., Shlyatskaya, E.M. Sokrashchenie poryadka upravlyayushchego ustroystva pri sinteze SAU polinomial'nym metodom [Reducing the order of the control device when synthesizing the ACS by means of the polynomial method]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 5, pp. 44–52.

9. Tikhomirova, I.A., Tararykin, S.V., Kopylova, L.G., Apolonskiy, V.V. Strukturno-parametricheskii sintez i issledovanie selektivno-invariantnykh elektromekhanicheskikh sistem s uprugimi kinematicheskimi zven'yami [Structural-parametric synthesis and research of selective-invariant electromechanical systems with elastic kinematic units]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 4.