

## 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

**Лариса Геннадьевна Копылова**

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

**Сергей Вячеславович Тарарыкин**

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

### **Адаптивное селективно-инвариантное управление следящими электроприводами с упругими кинематическими передачами<sup>1</sup>**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В настоящее время удалось достичь высоких показателей качества адаптивных версий селективно-инвариантных электромеханических систем, предназначенных для регулирования скорости в широком диапазоне, что создает предпосылки для эффективного использования предложенных методов синтеза и полученных структурных решений в системах контурно-позиционного и следящего управления угловыми перемещениями рабочих органов технологических машин.

**Материалы и методы.** В основу проводимого структурно-параметрического синтеза положены методы теории модального управления, редуцирования регуляторов, принципы селективной инвариантности, разделения темпов движения локальных подсистем, адаптивного, контурно-позиционного и следящего управления. Исследование проведено путем постановки детализированных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных электромеханических систем.

**Результаты.** Изложены особенности синтеза и функционирования адаптивных селективно-инвариантных систем с упругими кинематическими звеньями в режимах слежения и позиционирования.

**Выводы.** Сочетание принципов следящего, селективно-инвариантного и адаптивного управления в структуре единой электромеханической системы позволяет в наиболее полной мере обеспечить новые возможности для реализации высокоточного динамичного управления рабочими машинами.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, синтез систем управления, селективная инвариантность, адаптивное управление, редукция управляющих устройств, режимы слежения и позиционирования

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ.

**Irina Aleksandrovna Tikhomirova**

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

**Larisa Gennadievna Kopylova**

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

**Sergey Vyacheslavovich Tararykin**

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

## Adaptive selective-invariant control of tracking electric drives with elastic kinematic transmissions

**Abstract**

**Background.** Currently, high quality indicators of adaptive versions of selective-invariant electromechanical systems designed to control the speed in a wide range have been obtained. Thus, it lays the groundwork for effective use of the proposed synthesis methods and obtained structural solutions in the systems of contour-positional and tracking control of angular displacements of the working elements of technological machines.

**Materials and methods.** The implemented structural-parametric synthesis is based on the methods of the theory of modal control, reduction of regulators, the principles of selective invariance, separation of the rates of movement of local subsystems, adaptive, contour-positional and tracking control. The study has been carried out by detailed computational experiments with models of synthesized electromechanical systems.

**Results.** The features of synthesis and functioning of adaptive selective-invariant systems with elastic kinematic links in the tracking and positioning modes are described.

**Conclusions.** The combination of the principles of tracking, selective-invariant and adaptive control in the structure of a single electromechanical system makes it possible to fully provide new opportunities for the implementation of high-precision dynamic control of working machines.

**Key words:** electromechanical system, synthesis of control systems, selective invariance, adaptive control, control devices reduction, tracking and positioning modes

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2021.4.057-064

**Введение.** Специфика систем следящего управления угловыми положениями рабочих органов машин [1–4] заключается в том, что в процессе отработки угловых перемещений их частоты вращения (угловые скорости) могут претерпевать значительные и достаточно быстрые изменения в пределах от нулевого до максимально возможного значения. При этом спектр частот гармонических возмущений моментов нагрузки электромеханических систем (ЭМС) также динамично меняется, что существенно затрудняет их компенсацию при использовании в регуляторах стационарных внутренних моделей, полученных для постоянных значений угловой скорости.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является переход от стационарных «скоростных» (или «частотных») моделей возмущения к динамичным «угловым» моделям, отражающим зависимость момента нагрузки от углового положения рабочего органа [5, 6].

Однако существенно нелинейный характер таких моделей возмущения приводит к большим затруднениям при синтезе управляющих устройств, которые в известных реализациях могут в лучшем случае обеспечивать лишь устойчивость разрабатываемых систем без каких-либо гарантий достижения требуемых показателей качества.

Результаты, полученные к настоящему времени в рамках реализации такого подхода, не могут быть признаны удовлетворительными.

В этих условиях более продуктивным представляется подход, основанный на использовании традиционных «скоростных» моделей возмущения, которые могут считаться квазистационарными, т. е. зафиксированными для конкретного (произвольного) значения скорости. Линейный характер таких моделей позволяет достаточно легко синтезировать управляющее устройство ЭМС, обеспечивающее задан-

ные показатели качества на этом уровне скорости, а перестройка внутренней модели возмущения и всего управляющего устройства при изменениях скорости может обеспечиваться соответствующим адаптивным алгоритмом.

Безусловно, наиболее сложным в реализации такого подхода является построение контуров адаптации, которые должны функционировать с темпом процессов (быстродействием) основных контуров управления, определяемым заданными техническими требованиями к системе.

Однако в [7] эти проблемы адаптации селективно-инвариантных электромеханических систем (СИ ЭМС), обеспечивающих регулирование скорости в широком диапазоне, были достаточно успешно решены на основе использования при реализации регуляторов различных канонических форм (управляемости и наблюдаемости) в зависимости от вида управляемого объекта, а также применения алгоритмов самонастройки управляющих устройств в функции сигналов действительной или заданной скорости.

Все это дает основания рассчитывать на эффективное применение второго подхода для построения контурно-позиционных и следящих СИ ЭМС, способных обеспечить высокодинамичное управление угловыми перемещениями рабочих органов технологических машин.

Рассмотрим возможность применения указанного подхода для реализации следящего селективно-инвариантного управления на базе электропривода постоянного тока с электродвигателем независимого возбуждения и «упругой» кинематикой. Следует отметить, что такие ЭМС будут во многом аналогичны соответствующим системам переменного тока, построенным на базе вентильных (синхронных) электродвигателей или на базе асинхронных двигателей с векторным управлением переменными.

Комплекс основных требований, традиционно предъявляемых к качеству контурно-позиционного и следящего управления, можно сформулировать следующим образом [4, 8–10]:

- отработка заданного положения с нулевой статической ошибкой в условиях воздействия номинального момента нагрузки;

- отработка линейно нарастающего сигнала задания положения с нулевой ста-

тической ошибкой при воздействии номинальной нагрузки;

- отработка параболически нарастающего сигнала задания положения с нулевой статической ошибкой в условиях номинальной нагрузки;

- обеспечение обусловленного технологическими условиями быстродействия: для ЭМС средней мощности (5–100 кВт) с «упругой» кинематикой – в пределах 120–300 мс с заданным качеством переходных процессов.

Принимая во внимание отмеченную ранее специфику индивидуальных электроприводов технологических машин с погрешностями исполнения рабочих органов (РО), приводящими к гармоническим колебаниям моментов нагрузки, следует дополнить этот комплекс следующим важным требованием: полной статической компенсацией этих возмущений с частотой вращения основного рабочего органа и амплитудой, достигающей 20 % от величины номинального момента нагрузки.

**Методы исследования.** Выполним структурно-параметрический синтез адаптивной СИ ЭМС, ориентированной на прецизионную отработку угловых перемещений.

В качестве объекта исследований примем ЭМС, состоящую из электропривода (ЭП), включающего силовой преобразователь и двигатель постоянного тока независимого возбуждения, механической части, физические свойства которой могут быть описаны с помощью упругого двухмассового эквивалента, внешнего полиномиального регулятора (ПР) с моделью возмущения (МВ) и внутренней быстрой подсистемы на базе безынерционного регулятора состояния (РС).

Для обеспечения нулевой статической ошибки слежения при отработке задающего сигнала, меняющегося с постоянным ускорением, повысим степень интегральной составляющей во внешнем регуляторе до второй, синтезировав двукратно интегрирующую СИ ЭМС. Структурная схема разрабатываемой системы автоматического управления (САУ) приведена на рис. 1.

Для конкретности примем следующие значения параметров системы:  $K_{сп} = 22$ ;  $T_{сп} = 0,001$  с;  $R_a = 0,177$  Ом;  $T_a = 0,002$  с;  $C = 1,37$  Вб;  $J_1 = 0,4$  кг·м<sup>2</sup>;  $C_{12} = 500$  Н·м/рад;  $b_{12} = 4$  Н·м·с/рад;  $J_2 = 0,4$  кг·м<sup>2</sup>;  $i = 10$ ;  $M_1 = 8,22$  Н·м.

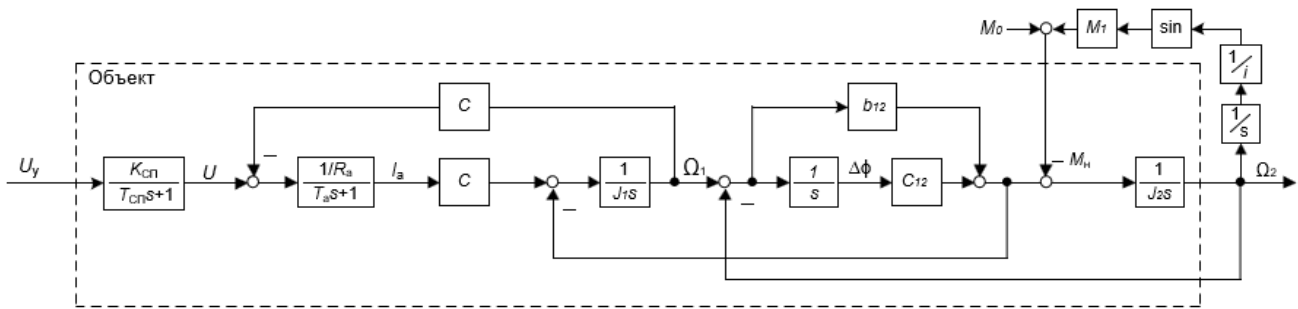


Рис. 1. Структурная схема двукратно интегрирующей следящей СИ ЭМС:  $U_y$ ,  $U$  – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя (СП);  $i_a$  – ток якорной цепи ЭД;  $K_{cp}$  и  $T_{cp}$  – коэффициент передачи и постоянная времени СП напряжения;  $R_a$  и  $T_a$  – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи;  $C$  – конструктивная постоянная электродвигателя (ЭД);  $J_1$  и  $J_2$  – приведенные моменты инерции ротора ЭД и РО соответственно;  $C_{12}$  и  $b_{12}$  – приведенные коэффициенты жесткости и внутреннего трения кинематической передачи;  $i$  – передаточное отношение редуктора;  $s$  – комплексная переменная Лапласа;  $M_1$  – амплитуда колебаний момента

На первом этапе с учетом принятых в [10] принципов редуцирования параметров объекта управления (ОУ) пренебрежем в расчетах относительно малыми постоянными времени  $T_{cp}$  и  $T_a$  и методом модального управления синтезируем безынерционный регулятор состояния внутренней подсистемы регулирования скорости, обеспечивающий ее высокое быстродействие (50 мс).

Для этого в качестве желаемого выбирается характеристический полином (ХП) Ньютона 3-го порядка с величиной СГК. В результате расчета получаем матрицу коэффициентов обратных связей по угловым скоростям и разности угловых перемещений валов электродвигателя и рабочего органа:

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3] = [-1,15 \quad -112,86 \quad -9,74].$$

На втором этапе, согласно предлагаемой методике, составляется уравнение синтеза внешнего контура в развернутом виде:

$$P(s) \cdot s^{v+1} \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s),$$

где  $P(s)$  и  $Q(s)$  – ХП и полином воздействия передаточной функции (ПФ) внутренней подсистемы;  $E(s)$  и  $F(s)$  – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора;  $v$  – кратность интегрирования регулятора.

Высокое быстродействие внутренней подсистемы дает основание считать ее безынерционным звеном при синтезе

внешнего ПР, т.е. принять при указанных параметрах  $P(s) = 1$ ,  $Q(s) = \frac{b_0}{\Omega_{0B}^3}$ .

При этом используется желаемый полином 5 порядка в форме Ньютона с величиной  $\Omega_0 = 32 \text{ с}^{-1}$ , гарантирующий требуемую динамику (280 мс):

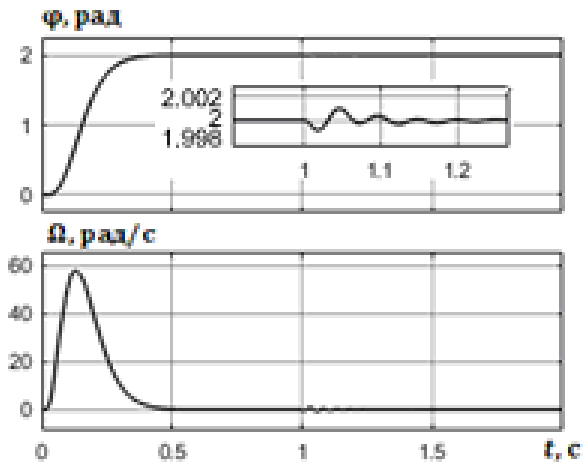
$$s^3(s^2 + 15,7^2) + 0,091 \times (e_4 s^4 + e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + \Omega_0)^5. \quad (1)$$

Выполним исследование полученной двукратно интегрирующей СИ ЭМС (рис. 1) при отработке ступенчатого задания угла (рис. 2, а), линейно нарастающего (рис. 2, б) и параболически нарастающего (рис. 2, в) сигналов задания положения путем цифрового моделирования средствами программного комплекса MatLab. При получении графиков слежения блок префильтра исключается из схемы.

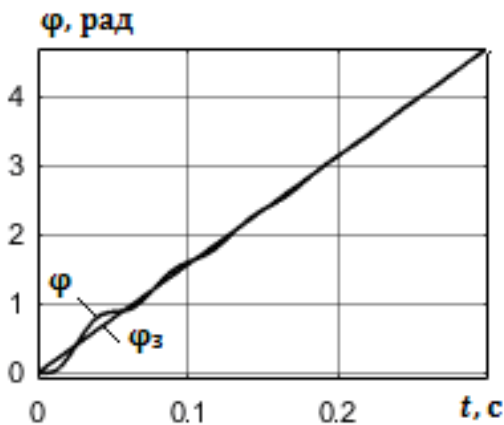
Из анализа полученных результатов следует, что двукратное интегрирование в регуляторе внешнего контура управления снижает величину статической ошибки в САУ при динамически меняющемся сигнале задания (рис. 2, б, в) до нуля.

Рассмотрим реакцию полученной САУ (рис. 1) на гармоническую составляющую в возмущающем воздействии. На рис. 3 показаны графики ее переходных процессов в режиме отработки линейно нарастающего с разными темпами сигнала задания положения (б) при наличии на валу двигателя возмущающего воздействия.

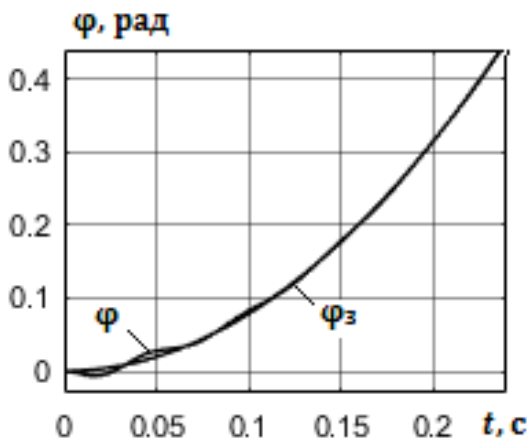
Анализ полученных результатов подтверждает полную компенсацию гармонического момента нагрузки на расчетной скорости (рис. 3, а) и выявляет наличие пульсаций скорости (рис. 3, б) на уровне, отличном от расчетного.



а)

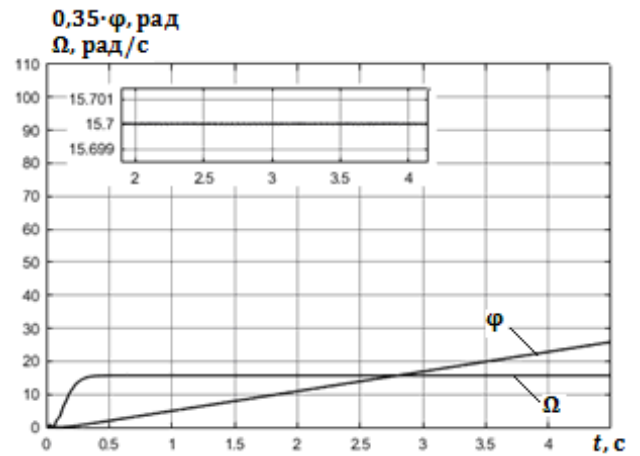


б)

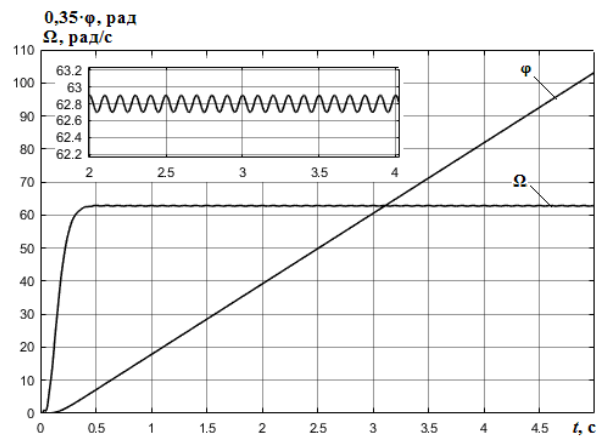


в)

Рис. 2. Переходные характеристики (а) и графики слежения с постоянной скоростью (б) и постоянным ускорением (в) для СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором



а)



б)

Рис. 3. Переходные характеристики СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором в режиме слежения при темпе изменения положения: а – 15,7 рад/с; б – 62,8 рад/с

Это наглядно отражается также на каскадных переходных характеристиках синтезированной ЭМС (рис. 4).

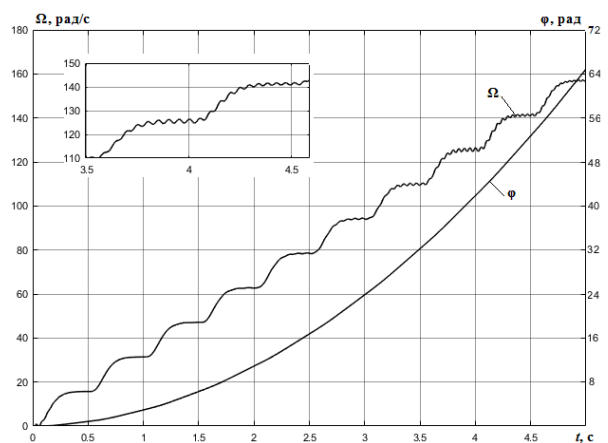


Рис. 4. Каскадные переходные характеристики СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором положения

Зависимость частоты гармонического возмущения от угловой скорости РО определяет необходимость использования принципа адаптации внутренней модели возмущения и внеконтурного префильтра к изменениям скоростного режима ЭМС в широком диапазоне.

Для данной системы запишем полученное ранее полиномиальное уравнение синтеза внешнего контура управления (1) в общем виде, используя символическое обозначение скорости  $\omega$ :

$$s^3(s^2 + \omega^2) + 0,091 \times (e_4 s^4 + e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + \Omega_0)^5. \quad (2)$$

Полученное уравнение позволяет реализовать внеконтурный формирователь и регулятор в виде цифровых или аналоговых блоков, выполняющих математические преобразования с учетом текущего значения  $\omega$ .

Решение уравнения синтеза регулятора внешнего контура (2) позволяет получить выражения коэффициентов полинома передаточной функции регулятора  $E(s)$  и  $F(s)$ :

$$e_4 = \frac{d_4}{b_0}; \quad e_3(\omega) = \frac{d_3 - \omega^2}{b_0}; \quad (3)$$

$$e_2 = \frac{d_2}{b_0}; \quad e_1 = \frac{d_1}{b_0}; \quad e_0 = \frac{d_0}{b_0},$$

где коэффициенты  $d_0, d_1, d_2, d_3$  и  $d_4$  находятся по желаемому ХП синтезируемой системы  $D(s)$  с подстановкой конкретного значения  $\Omega_0$ , соответствующего заданному быстродействию; такие же выражения  $e_0,$

$e_1, e_2, e_3$  и  $e_4$  будут присущи и полиному внеконтурного формирователя; в данной системе текущее значение скорости рабочего органа  $\omega$  вводится в регулятор с внутренней моделью возмущения как переменная, в зависимости от которой перестраивается коэффициент  $e_3(\omega)$  префильтра и регулятора с внутренней моделью возмущения.

Полученная по уравнениям (3) структурная схема регуляторов с каналом адаптации в КФУ для синтезируемой системы приведена на рис. 5.

В исследуемых режимах при отработке ступенчатого задания угла, линейно нарастающего и параболически нарастающего сигналов задания положения адаптивная двукратно интегрирующая СИ ЭМС (рис. 5) оказывается столь же эффективной, как аналогичный вариант обычной СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором положения.

На рис. 6 показаны графики переходных процессов исследуемой СИ ЭМС с двукратно-интегрирующим адаптивным регулятором по частоте вращения электродвигателя и угловому перемещению в режиме отработки линейно нарастающего с разными темпами сигнала задания при воздействии постоянной и гармонической составляющих момента нагрузки. Они свидетельствуют о достижении полной статической инвариантности синтезированной системы к воздействию гармонического момента нагрузки на различных уровнях скорости слежения.

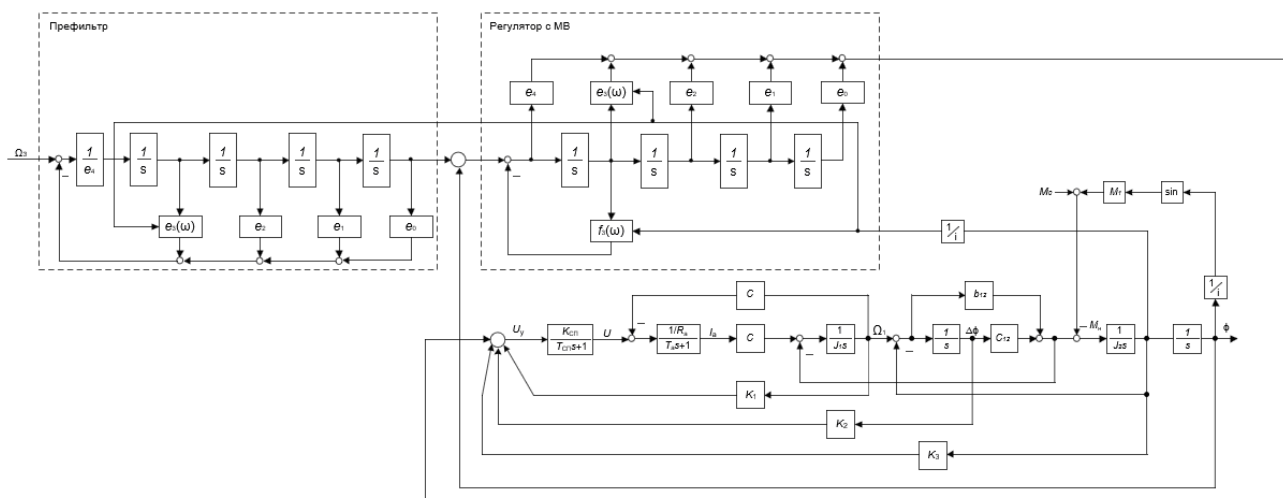


Рис. 5. Структурная схема двукратно интегрирующей следящей СИ ЭМС

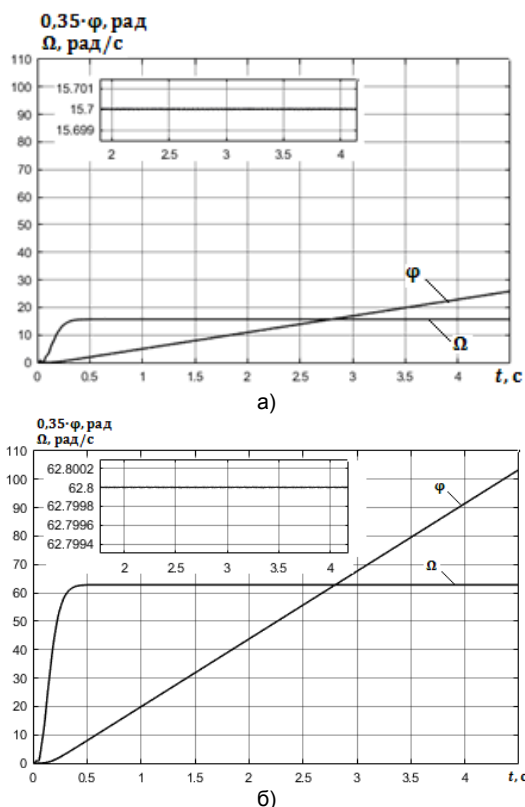


Рис. 6. Графики переходных процессов адаптивной СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором в режиме слежения при темпе изменения положения: а – 15,7 рад/с; б – 62,8 рад/с

Это наглядно иллюстрируют также соответствующие каскадные переходные характеристики системы, представленные на рис. 7.

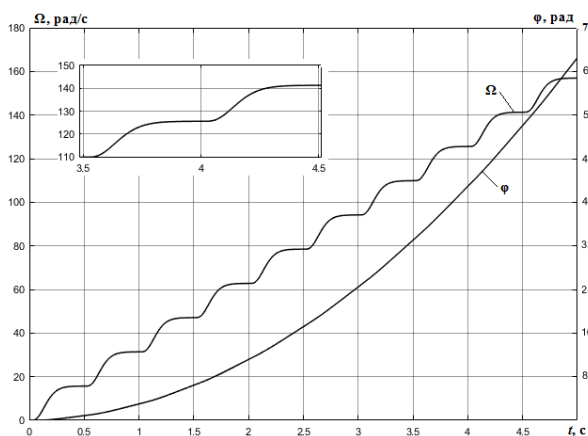


Рис. 7. Каскадные переходные характеристики адаптивной СИ ЭМС с двукратно интегрирующим регулятором положения

Дополнение принципа селективной инвариантности принципами адаптивного управления, реализуемого с высоким быстродействием в функции действительной скорости с использованием канониче-

ской формы управляемости, а также принципами разделения темпов движения внешнего и внутреннего контуров управления, модального управления позволяет в наиболее полной степени обеспечить выполнение всего комплекса требований контурно-позиционного и следящего управления технологическими машинами с «упругой» кинематикой.

При этом из-за наличия упругих звеньев в кинематических передачах электропривода применение принципа редуцирования объекта и внутренних подсистем остается одним из необходимых условий получения работоспособных и технически реализуемых решений.

**Выводы.** Для следящих систем управления угловыми перемещениями индивидуальных электроприводов технологических машин с гармоническими колебаниями момента нагрузки, обусловленными погрешностями исполнения и монтажа рабочих органов, комплекс традиционных требований обработки угловых перемещений должен быть дополнен требованием селективной инвариантности, т. е. полной статической компенсации указанных возмущений, следующих с частотой вращения основного рабочего органа и достигающих по амплитуде 20 % от величины номинального момента нагрузки.

Дополнение принципа селективной инвариантности, воплощаемого в различных структурных версиях СИ ЭМС, принципами адаптивного управления, реализуемого с высоким быстродействием в функции действительной или заданной скорости с использованием канонических форм управляемости и наблюдаемости, а также принципами разделения темпов движения (локализации, подчиненного регулирования, каскадного регулирования), управления по состоянию и по выходу, модального управления позволяет в наиболее полной степени обеспечить выполнение всего комплекса требований контурно-позиционного и следящего управления технологическими машинами.

Определенной «платой» за это является некоторое снижение быстродействия таких систем при повышении кратности интегрирования регуляторов положения или усложнении управляемого объекта при наличии упругих звеньев в кинематических передачах электропривода.

## Список литературы

1. **Михайлов О.П.** Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.

2. **Динамика** следящих приводов: учеб. пособие для вузов / Б.И. Петров, В.А. Полковников Л.В. Рабинович и др.; под ред. Л.В. Рабиновича. – М.: Машиностроение, 1982.

3. **Следящие** приводы: в 3 т. Т. 1: Теория и проектирование следящих приводов / Е.С. Блейз, В.Н. Бродовский, В.А. Введенский и др. / под ред. Чемоданова Б.К. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

4. **Шенфельд Р., Хабигер Э.** Автоматизированные электроприводы: пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 464 с.

5. **De Wit C.C., Praly L.** Adaptive eccentricity compensation // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – Sept., 2000. – Vol. 8, no. 5. – P. 757–766.

6. **Mandel Y., Weiss G.** Adaptive internal model-based suppression of torque ripple in brushless DC motor drives // *Systems Science & Control Engineering. An Open Access Journal*. – January, 2015. 3:1. – P. 162–176.

7. **Аполонский В.В., Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В.** Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с адаптацией регуляторов к изменениям уровня скорости // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2020. – № 5.

8. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003.

9. **Иванков В.А., Тарарыкин С.В., Красильникъянц Е.В.** Системы контурно-позиционного управления редукторными электроприводами многоцелевых металлорежущих станков. – Иваново, 2009. – 188 с.

10. **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. – № 5.

[Automated electric drive of machine tools and industrial robots]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 304 p.

2. Petrov, B.I., Polkovnikov, V.A. Rabinovich, L.V. *Dinamika sledyashchikh privodov* [Dynamics of tracking drives]. Moscow: Mashinostroenie, 1982.

3. Bleyz, E.S., Brodovskiy, V.N., Vvedenskiy, V.A. *Sledyashchie privody: v 3 t., t. 1: Teoriya i proektirovanie sledyashchikh privodov* [Tracking drives in 3 vol., vol. 1: Theory and design of tracking drives]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 1999.

4. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannye elektroprivody* [Automatic electric drives]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985. 464 p.

5. De Wit, C.C., Praly, L. Adaptive eccentricity compensation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Sept., 2000, vol. 8, no. 5, pp. 757–766.

6. Mandel, Y., Weiss, G. Adaptive internal model-based suppression of torque ripple in brushless DC motor drives. *Systems Science & Control Engineering. An Open Access Journal*, January, 2015, 3:1, pp. 162–176.

7. Apolonskiy, V.V., Kopylova, L.G. Tararykin, S.V. Razrabotka i issledovanie selektivno-invariantnykh elektromekhanicheskikh sistem s adaptatsiyey regulyatorov k izmeneniyam urovnya skorosti [Development and research of selective invariant electromechanical systems with regulator adaptation to changes of the speed level]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2020, no. 5.

8. Besekerskiy, V.A., Popov, E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo «Professiya», 2003.

9. Ivankov, V.A., Tararykin, S.V., Krasil'nik'yants, E.V. *Sistemy konturno-pozitsionnogo upravleniya reduktornymi elektroprivodami mnogotselovykh metallorezhushchikh stankov* [Systems of contour-positional control of gear electric drives of multipurpose metal-cutting machines]. Ivanovo, 2009. 188 p.

10. 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 links]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 5.

## References

1. Mikhaylov, O.P. *Avtomatizirovannyy elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov*