

**УПРАВЛЕНИЕ
В ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

УДК 62-503.57

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНО-ИНВАРИАНТНЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С АДАПТАЦИЕЙ
РЕГУЛЯТОРОВ К ИЗМЕНЕНИЯМ УРОВНЯ СКОРОСТИ¹**

© 2020 г. В. В. Аполонский^а, Л. Г. Копылова^а, С. В. Тарарыкин^{а,*}

^а Ивановский государственный энергетический ун-т, им. В.И. Ленина (ИГЭУ), Иваново, Россия

*e-mail: tsv@ispu.ru

Поступила в редакцию 15.08.2019 г.

После доработки 08.05.2020 г.

Принята к публикации 25.05.2020 г.

Разработаны структурные решения селективно-инвариантных электромеханических систем, реализующих адаптацию регуляторов, представленных в канонической форме управляемости и в канонической форме наблюдаемости, к изменениям уровня скорости. Выполнен сравнительный анализ их возможностей в обеспечении заданных показателей качества в широком скоростном диапазоне. Проверка полученных результатов осуществлена методами цифрового моделирования синтезированных систем и натуральных испытаний на реальном технологическом оборудовании. Выработаны конкретные рекомендации для проектирования систем в различных применениях.

DOI: 10.31857/S0002338820050030

0. Введение. В роторных электромеханических системах (ЭМС) неизбежные погрешности изготовления, сборки, монтажа и конструктивные особенности механических элементов становятся причинами появления доминирующих возмущений в виде гармонических колебаний моментов нагрузки (M_H) электродвигателей (ЭД), которые могут быть выражены [1, 2] детерминированной функцией времени общего вида

$$M_H(t) = M_0 + \sum_{j=1}^n M_j \sin(\Omega_j t + \varphi_{0j}),$$

где M_0, M_j – соответственно постоянная составляющая момента и амплитуда его j -й гармоники; Ω_j, φ_{0j} – угловая скорость и начальное угловое положение j -го ротора, n – общее число вращающихся масс, t – время.

При использовании индивидуальных электроприводов (ЭП), наиболее характерных для современного технологического оборудования, в спектре возмущений доминируют нулевая и первая гармоники, определяемые движением главного рабочего органа (РО) технологической машины:

$$M_H(t) = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \tag{0.1}$$

где ω_1 – угловая скорость РО, $\omega_1 = \Omega/i$, Ω – частота вращения ЭД, i – передаточное отношение редуктора.

Флуктуации моментов нагрузки приводят к соответствующим изменениям скорости ЭД и рабочих органов технологических машин, что может явиться причиной существенного ухудшения качества выпускаемой продукции [1–4].

Одним из наиболее эффективных методов подавления указанных возмущений в прецизионных ЭП является применение принципа селективной инвариантности (СИ) [5, 3], предполагающего включение модели возмущения (МВ) [6, 7] в знаменатель передаточной функции регуля-

¹ Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России.

тора в виде формирующего полинома, который для выражения (0.1) приобретает следующий вид:

$$G'(s) = s(s^2 + \omega_1^2) = sG(s), \quad (0.2)$$

где s – комплексная переменная Лапласа.

Однако в большинстве известных технических решений, ориентированных в том числе на управление достаточно сложными объектами, осуществляется встраивание МВ в типовые регуляторы пониженного порядка (пропорционального, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального типов) [2, 4, 8], что ограничивает возможности создаваемых систем в быстром действии при обработке возмущений и адаптации к изменениям уровня скорости РО, а также в достижении других показателей качества.

Сочетание принципа СИ с другими принципами теории управления позволили получить широкую гамму структурных решений ЭМС с различными сочетаниями свойств (показателей качества) [9, 10]. При этом эффект компенсации гармонического возмущения достигается не только на частоте настройки его модели, но в значительной мере сохраняется и на других частотах скоростного диапазона ЭМС за счет их робастных свойств.

Однако для регулирования производительности машин при смене ассортимента изделий для оптимизации режимов обработки различных деталей и материалов требуется обеспечивать работу ЭП в широком скоростном диапазоне. В этих условиях робастных свойств ЭМС может оказаться недостаточно не только для сохранения показателей качества управления, но даже для сохранения устойчивости.

Поэтому возникает необходимость применения принципа адаптации разработанных регуляторов, содержащих МВ (0.2) и соответствующие корректирующие устройства, к вариациям уровня скорости для сохранения высоких динамических показателей ЭМС в различных режимах эксплуатации. При этом контуры адаптивного управления должны работать в темпе основных (адаптируемых) контуров, не ограничивая их быстродействие.

Для технической реализации и параметрической самонастройки внутриконтурной части регулятора и его внеконтурной части (префильтра) могут быть использованы различные формы представления управляющих устройств (УУ) [11, 12], широко применяемые, например, для наблюдателей состояния. Наиболее распространенными из них являются каноническая форма управляемости Фробениуса (КФУ) и каноническая форма наблюдаемости (КФН), обладающие взаимно противоположными свойствами.

Успешная реализация адаптивного регулятора с помощью КФУ осуществлена для одного из вариантов СИ ЭМС в [13], где методами модального управления и полиномиального синтеза получены аналитические выражения для самонастройки параметров полиномиального регулятора в функции текущей скорости РО в широком диапазоне. Однако сохранение устойчивости адаптивной системы и высокое качество переходных процессов с подавлением гармонического возмущения при изменениях уровня скорости достигаются здесь в редукторном варианте электропривода, когда угловая скорость РО (т.е. частота гармонического возмущения) оказывается на порядок ниже скорости вращения ЭД. При этом требования к быстродействию контура адаптации регулятора существенно ослабляются.

При создании прецизионных высокоскоростных ЭМС с непосредственной (безредукторной) связью вала ЭД и РО, а также при реализации предложенной адаптации регулятора в других структурах СИ ЭМС с различными объектами управления указанные достоинства полученного решения могут быть в значительной степени утрачены.

В этих условиях становятся актуальными поиск новых структур СИ ЭМС, реализующих более эффективную адаптацию регуляторов, представленных как в КФУ, так и в КФН, к изменениям уровня скорости, а также исследование их возможностей в обеспечении заданных показателей качества при управлении объектами различного типа в широком скоростном диапазоне.

При этом может показаться, что лучшей альтернативой адаптивному управлению в функции реальной скорости ЭП (Ω) является адаптация УУ в функции заданного значения угловой скорости (Ω_3), т.е. реализация режимной адаптации в разомкнутом контуре [14, 15]. Однако в полной мере решить проблему устойчивости адаптивной ЭМС этим не удается, поскольку в широком скоростном диапазоне могут принимать неустойчивую неминимально-фазовую форму сами корректирующие устройства – внеконтурные префильтры, что приводит к потере устойчивости системы даже при разомкнутом контуре адаптации. Кроме того, использование сигнала задания скорости, являющегося упреждающим по отношению к реальной скорости ЭП, может ухудшать

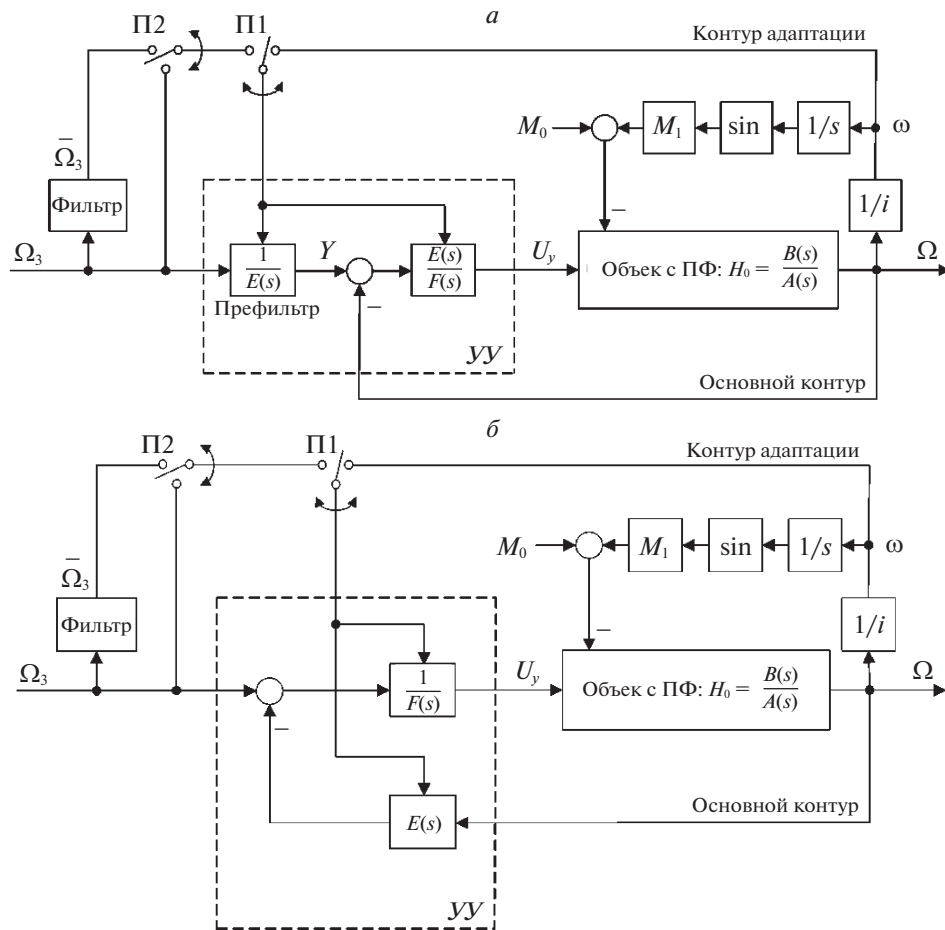


Рис. 1. Структурные схемы различных вариантов адаптивных СИ ЭМС: *a* – УУ с префильтром; *б* – УУ без префильтра

качество адаптивного управления, и для его улучшения потребуется устанавливать дополнительные фильтры, настраиваемые на модель адаптируемой системы.

В этой связи целесообразно синтезировать селективно-инвариантное управление с использованием обоих методов адаптации, реализуемых в функции как реальной, так и заданной угловой скорости ЭП, с последующим сравнительным исследованием достигнутых возможностей.

В данной работе методами модального управления и полиномиального синтеза с помощью инструментария символьных компьютерных вычислений определяются общие выражения полиномов регуляторов, содержащих модели возмущения, как функций скорости ЭМС. На этой основе разрабатываются структуры СИ ЭМС, реализующие адаптацию регуляторов, представленных в КФУ и в КФН, к изменениям уровня скорости. Выполняется сравнительный анализ их возможностей в обеспечении заданных показателей качества в широком скоростном диапазоне. Проводится исследование влияния вида объекта управления на свойства систем адаптивного управления при использовании классических схем основных контуров СИ ЭМС для типовых объектов низкого порядка. Полученные результаты распространяются на более сложные версии модернизированных СИ ЭМС, применяющих широкую гамму законов управления по состоянию и по выходу, включая принципы разделения темпов движения и декомпозиции модели возмущения.

1. Постановка задачи. При выполнении работы будем руководствоваться структурно-функциональными схемами адаптивных СИ ЭМС, представленными на рис. 1, где переключателем П1 осуществляется выбор адаптирующего сигнала (Ω или Ω_3), а переключателем П2 обеспечивается введение в канал адаптации УУ дополнительного фильтра.

Синтез регуляторов, содержащих МВ, будем выполнять по правилам полиномиального модального управления [11, 12] на основе уравнения вида

$$A(s)F(s) + B(s)E(s) = D(s), \quad (1.1)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – характеристический полином (ХП) и полином воздействия передаточной функции (ПФ) объекта управления (ОУ); $E(s)$ и $F(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора; $D(s)$ – желаемый ХП синтезируемой ЭМС, имеющий среднегеометрический корень (СГК) – Ω_0 . При этом $F(s) = G(s)V(s)$, где $V(s)$ – вспомогательный полином, обеспечивающий “техническую реализуемость” регулятора, а $E(s)$ одновременно является ХП внеконтурного префильтра.

Для обеспечения аperiodических процессов желаемый ХП будем назначать в форме Ньютона с кратными действительными значениями корней, равными величине Ω_0 , определяемой требованиями быстродействия, т.е. принимать

$$D(s) = (s + \Omega_0)^p.$$

Реализация УУ систем, согласно схеме на рис. 1, а, может осуществляться как в КФУ, так и в КФН, а схема на рис. 1, б иллюстрирует возможность выполнения УУ с использованием объединенной двухвходовой КФН, позволяющей исключить из структуры внеконтурные префильтры. В качестве пояснения на рис. 2 приведены структурные схемы для соответствующего представления внутриконтурных элементов УУ в указанных канонических формах в общем случае: $\deg E(s) = h$, $\deg F(s) = l$. При этом внутри блоков показаны в общем виде коэффициенты при различных степенях s рассматриваемых полиномов.

Поставим задачу получения аналитических зависимостей коэффициентов полиномов регулятора от скорости, построения на этой основе в КФУ и КФН соответствующих каналов адаптивного управления и синтеза адаптивных СИ ЭМС объектами различной степени сложности, способных подавлять гармонические возмущения момента нагрузки и сохранять заданные показатели качества во всем диапазоне рабочих скоростей.

На первом этапе исследований для изучения влияния вида ОУ на свойства систем адаптивного управления будем использовать классические схемы основных контуров СИ ЭМС [3, 9] при отсутствии “быстрых” внутренних подсистем (рис. 1) и проводить синтез адаптивных УУ с редуцированной МВ вида $G(s) = (s^2 + \omega^2)$ и полной МВ вида (0.2) для типовых объектов низкого порядка $n = 0, 1, 2$, постепенно повышая их сложность.

На втором этапе исследований попытаемся распространить полученные результаты на более сложные версии модернизированных СИ ЭМС [9, 10], использующих широкую гамму законов управления по состоянию и по выходу, включая принципы разделения темпов движения и полной модели возмущения.

На заключительном этапе работы обобщим полученные результаты, выполним их компьютерную и экспериментальную проверку и выработаем конкретные рекомендации для проектирования СИ ЭМС в различных применениях.

Разработки и исследования будем выполнять для безредукторных ($i = 1$) ЭМС с непосредственным сочленением вала ЭД и РО, формирующих гармонические возмущения более высоких частот и требующих соответственно лучших динамических показателей адаптивного управления.

Проверку полученных результатов будем осуществлять методами компьютерного моделирования средствами программного комплекса MATLAB и натурных испытаний на реальном технологическом оборудовании.

2. Структурная реализация и исследование адаптивных систем управления типовыми объектами низкого порядка. В качестве типовых ОУ низкого порядка будем использовать динамические звенья с ПФ

$$H_{O1}(s) = b_0 \quad (n = 0),$$

$$H_{O2}(s) = \frac{b_0}{s + a_0} \quad (n = 1),$$

$$H_{O3}(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} \quad (n = 2).$$

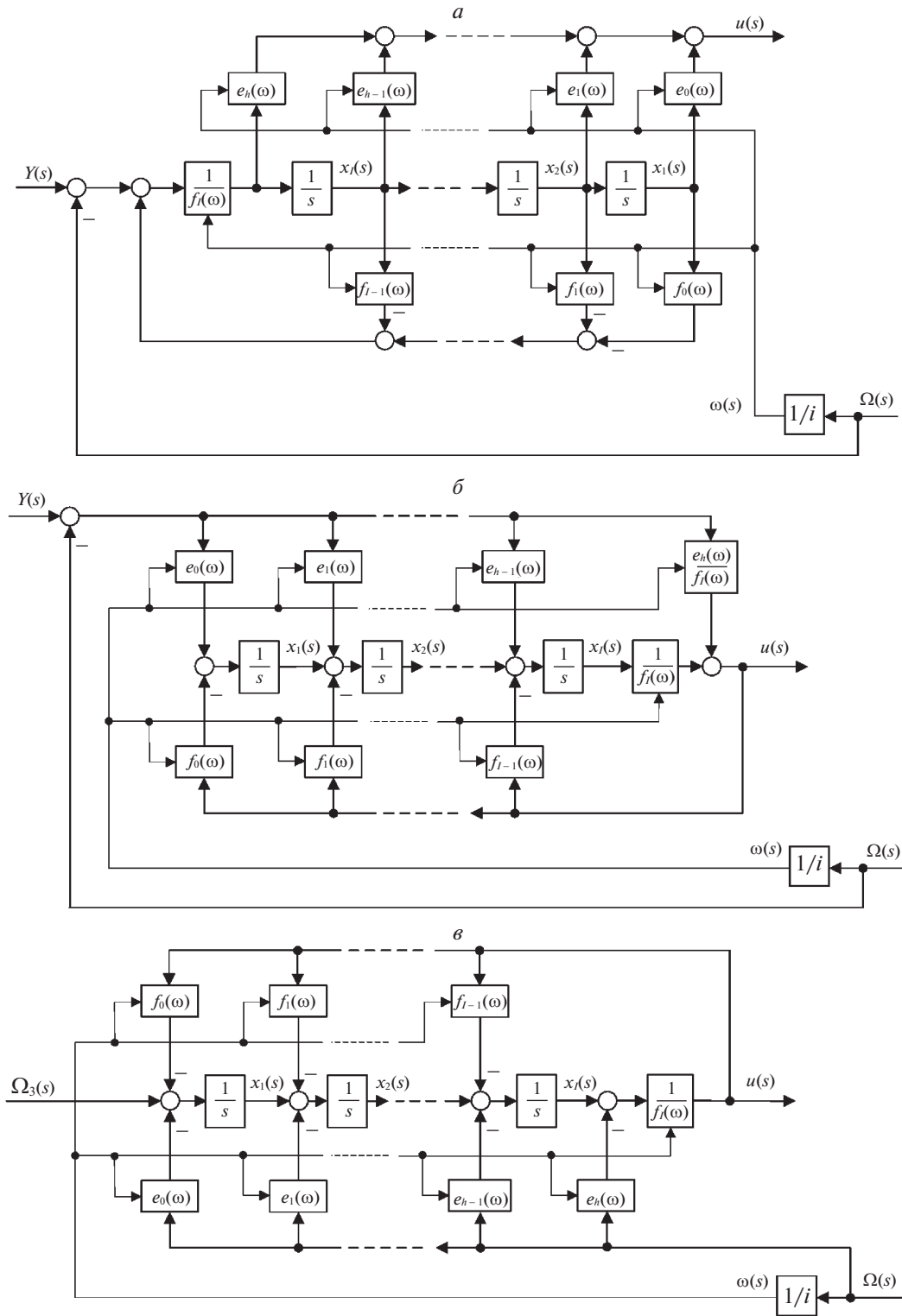


Рис. 2. Структурные схемы внутриконтурной части УУ в различных канонических формах представления: а – КФН; б – КФН; в – объединенная КФН

Результаты полиномиального синтеза соответствующих регуляторов для СИ ЭМС по уравнению (1.1) в виде выражений полиномов $E(s), F(s)$ и зависимостей их коэффициентов от величины угловой скорости Ω при использовании редуцированной и полной МВ приведены в табл. 1. Для

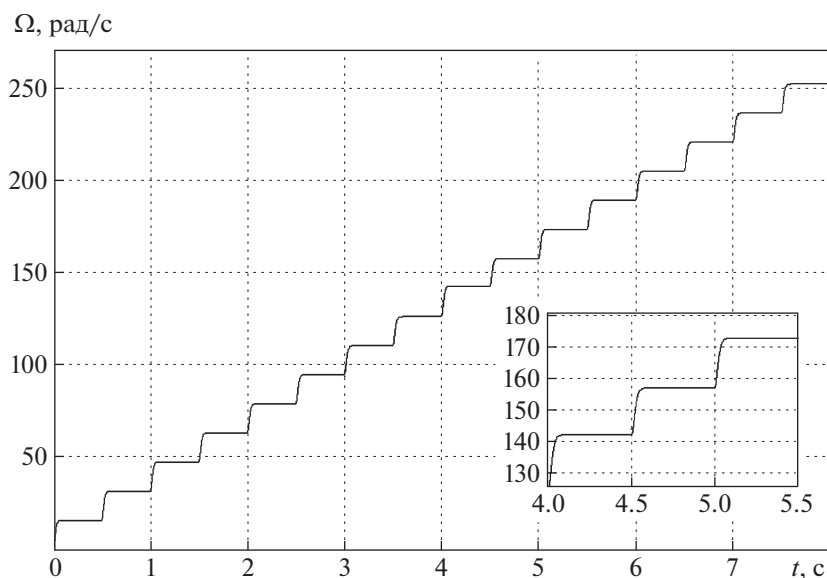


Рис. 3. Каскадные переходные характеристики адаптивной СИ ЭМС с объектом управления нулевого порядка и полной МВ

обозначения типа и отражения сложности УУ здесь введен параметр N , определяемый как отношение степеней полиномов ПФ внутриконтурной части: $N = \deg E(s) / \deg F(s) = h/l$.

Для получения аналитических зависимостей коэффициентов полиномов от Ω с целью последующей организации адаптивного управления решение уравнения синтеза (1.1) осуществляется в символьной форме с помощью панели инструментов Symbolic программного комплекса (ПК) Mathcad.

Из анализа полученных выражений $E(s)$, $F(s)$ следует, что с момента превышения реальной (или заданной) скоростью некоторой граничной величины $\omega_{гр}$, имеющей различные значения для разных регуляторов, внутриконтурная часть УУ приобретает неминимально-фазовый характер, а внеконтурный префильтр становится неустойчивым динамическим звеном. Вследствие этого адаптивные варианты СИ ЭМС, построенные с использованием таких префильтров как в КФУ, так и в КФН, также теряют свою устойчивость независимо от способа реализации алгоритма адаптации – в функции реальной скорости Ω или ее заданного значения Ω_3 . При этом наиболее узкий скоростной диапазон устойчивой работы наблюдается при управлении безынерционным ОУ с помощью редуцированной МВ, т.е. при наименьшем порядке внеконтурного префильтра.

Очевидно, что расширить пределы устойчивости таких адаптивных систем можно, увеличив значение СГК желаемого ХП, т.е. повысив быстродействие основного контура управления. Однако это либо потребует соответствующего повышения форсировочной способности (т.е. мощности) силовых исполнительных устройств, либо приведет к существенному сокращению размеров линейной зоны работы ЭМС в пределах имеющихся ограничений.

В этих условиях более рациональным структурным решением адаптивной СИ ЭМС является схема на рис. 1, б с реализацией регулятора в объединенной КФН (рис. 2, в), позволяющей исключить неустойчивые префильтры из каналов адаптации УУ и тем самым кардинально улучшить качество управления.

Для иллюстрации на рис. 3 приведены каскадные переходные характеристики модели такой системы с ОУ нулевого порядка ($b_0 = 15.7$) в широком диапазоне скоростей при $M_0 = 41.1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_1 = 8.22 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и назначении СГК $\Omega_{02} = 80 \text{ с}^{-1}$ в распределении Ньютона, обеспечивающем быстродействие системы на уровне 50 мс. В этом случае высокое качество управления достигается при адаптации УУ как в функции реальной (Ω), так и в функции заданной (Ω_3) угловых скоростей.

Из анализа данных табл. 1 также следует, что с увеличением степени сложности УУ и порядка внеконтурного префильтра вследствие повышения сложности (порядка) объекта или модели

Таблица 1. Аналитические результаты полиномиального синтеза УУ СИ ЭМС

| Вид ПФ ОУ $H_O(s)$ | Полином $D(s)$ | Полином $E(s)$ | Полином $F(s)$ | Тип УУ $N = h/l$ |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Для редуцированной МВ | | | | |
| K | $s^2 + d_1s + d_0;$ $d_1 = 2\Omega_{02}; d_0 = \Omega_{02}^2$ | $e_1s + e_0(\omega); e_1 = d_1/b_0;$ $e_0(\omega) = \frac{d_0 - \omega^2}{b_0}$ | $s^2 + f_0(\omega); f_0(\omega) = \omega^2$ | 1/2 |
| $\frac{b_0}{s + a_0}$ | $s^2 + d_1s + d_0;$ $d_1 = 2\Omega_{02}; d_0 = \Omega_{02}^2$ | $e_2s^2 + e_1(\omega)s + e_0(\omega); e_2 = \frac{d_2 - a_0}{b_0};$ $e_1(\omega) = \frac{d_1 - \omega^2}{b_0}; e_0(\omega) = \frac{d_0 - a_0\omega^2}{b_0}$ | $s^2 + f_0(\omega); f_0(\omega) = \omega^2$ | 2/2 |
| $\frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0}$ | $s^5 + d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0; d_4 = 5\Omega_{05};$ $d_3 = 10\Omega_{05}^2; d_2 = 10\Omega_{05}^3;$ $d_1 = 5\Omega_{05}^4; d_0 = \Omega_{05}^5$ | $e_3(\omega)s^3 + e_2(\omega)s^2 + e_1(\omega)s + e_0(\omega);$ $e_3(\omega) = \frac{d_3 - d_1a_1 - a_0 + a_1^2 - \omega^2}{b_0};$ $e_2(\omega) = \frac{d_2 - d_4a_0 + a_0a_1 - d_4\omega^2}{b_0};$ $e_1(\omega) = \frac{d_1 + (a_1^2 - d_4a_1 - a_0) \cdot \omega^2}{b_0};$ $e_0(\omega) = \frac{d_0 + (a_0a_1 - d_4a_0) \cdot \omega^2}{b_0}$ | $s^3 + f_2s^2 + f_1(\omega)s + f_0(\omega); f_2 = d_4 - a_1;$ $f_1(\omega) = \omega^2; f_0(\omega) = (d_4 - a_1) \cdot \omega^2$ | 3/3 |
| Для полной МВ | | | | |
| K | $s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0;$ $d_2 = 3\Omega_{03}; d_1 = 3\Omega_{03}^2; d_0 = \Omega_{03}^3$ | $e_2s^2 + e_1(\omega)s + e_0; e_2 = d_2/b_0;$ $e_1(\omega) = \frac{d_1 - \omega^2}{b_0}; e_0 = d_0/b_0$ | $s^3 + f_1(\omega)s; f_1(\omega) = \omega^2$ | 2/3 |
| $\frac{b_0}{s + a_0}$ | $s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0;$ $d_2 = 3\Omega_{03}; d_1 = 3\Omega_{03}^2; d_0 = \Omega_{03}^3$ | $e_3s^3 + e_2(\omega)s^2 + e_1(\omega)s + e_0;$ $e_3 = \frac{d_3 - a_0}{b_0}; e_2(\omega) = \frac{d_2 - \omega^2}{b_0};$ $e_1(\omega) = \frac{d_2 - a_0\omega^2}{b_0}; e_0 = \frac{d_0}{b_0}$ | $s^3 + f_1(\omega)s; f_1(\omega) = \omega^2$ | 3/3 |
| $\frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0}$ | $s^6 + d_5s^5 + d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0; d_5 = 6\Omega_{06};$ $d_4 = 15\Omega_{06}^2; d_3 = 20\Omega_{06}^3;$ $d_2 = 15\Omega_{06}^4; d_1 = 6\Omega_{06}^5;$ $d_0 = \Omega_{06}^6$ | $e_4(\omega)s^4 + e_3(\omega)s^3 + e_2(\omega)s^2 + e_1(\omega)s + e_0; e_4(\omega) =$ $= \frac{d_4 - d_5a_1 - a_0 + a_1^2 - \omega^2}{b_0}; e_3(\omega) =$ $= \frac{d_3 - d_5a_0 - a_0a_1 - d_5\omega^2}{b_0}; e_2(\omega) =$ $= \frac{d_2 + (a_1^2 - d_5a_1 - a_0) \cdot \omega^2}{b_0}; e_1(\omega) =$ $= \frac{d_2 + (a_0a_1 - d_5a_0) \cdot \omega^2}{b_0}; e_0 = \frac{d_0}{b_0}$ | $s_4 + f_3s^3 + f_2(\omega)s^2 + f_1(\omega)s; f_3 = d_5 - a_1;$ $f_2(\omega) = \omega; f_1(\omega) = (d_5 - a_1) \cdot \omega^2$ | 4/4 |

Таблица 2. Результаты полиномиального синтеза УУ СИ ЭМС в числовой форме

| ПФ объекта управления | Результаты синтеза СИ ЭМС | | | | | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| | с редуцированной МВ | | | с полной МВ | | |
| | Полиномы ПФ регулятора | СГК ХП, Ω_{0i}, c^{-1} | $\omega_{гр}, c^{-1}$ | Полиномы ПФ регулятора | СГК ХП, Ω_{0i}, c^{-1} | $\omega_{гр}, c^{-1}$ |
| $H_o = 15.7$ | $N = 1/2;$ $E(s) = 10.19s + (407.64 - 6.37 \times 10^{-2} \cdot \omega^2); F(s) = s^2 + \omega^2$ | $\Omega_{02} = 80$ | $\omega_{гр} = 80$ | $N = 2/3;$ $E(s) = 22.93s^2 + (2751.6 - 6.37 \times 10^{-2} \cdot \omega^2)s + 110063.7;$ $F(s) = s^3 + \omega^2s$ | $\Omega_{03} = 120$ | $\omega_{гр} = 207.85$ |
| $H_o = \frac{1744.4}{s + 111.1}$ | $N = 2/2;$ $E(s) = 0.1427s^2 + (24.765 - 5.733 \times 10^{-4} \cdot \omega^2)s + (990.6 - 6.37 \times 10^{-2} \cdot \omega^2); F(s) = s^2 + \omega^2$ | $\Omega_{03} = 120$ | $\omega_{гр} = 124.7$ | $N = 3/3;$ $E(s) = 0.2803s^3 + (77.39 - 5.733 \times 10^{-4} \cdot \omega^2)s^2 + (7739.1 - 6.37 \times 10^{-2} \cdot \omega^2)s + 290214.4;$ $F(s) = s^3 + \omega^2s$ | $\Omega_{04} = 150$ | $\omega_{гр} = 348.6$ |
| $H_o = \frac{42570.6}{s^3 + 50s + 2651}$ | $N = 3/3;$ $E(s) = (6.55 - 2.35 \times 10^{-5} \cdot \omega^2)s^3 + (1317 - 2.11 \times 10^{-2} \cdot \omega^2)s^2 + (123296.4 - 1.061 \cdot \omega^2)s + (4438668.9 - 52.93 \cdot \omega^2); F(s) = s^3 + 850s^2 + \omega^2s + 850 \cdot \omega^2$ | $\Omega_{05} = 150$ | $\omega_{гр} = 249.6$ | $N = 4/4;$ $E(s) = (14.055 - 2.35 \times 10^{-5} \cdot \omega^2)s^4 + (4275.54 - 2.96 \times 10^{-2} \cdot \omega^2)s^3 + (685265.2 - 1.483 \times \omega^2)s^2 + (57562275.4 - 75.35 \cdot \omega^2)s + 2014679638.1;$ $F(s) = s^4 + 1210s^3 + \omega^2s^2 + 1210 \cdot \omega^2s$ | $\Omega_{06} = 210$ | $\omega_{гр} = 380.1$ |

возмущения диапазон устойчивой работы префильтра существенно расширяется и перестает ограничивать скоростной диапазон адаптивной СИ ЭМС во всех структурных реализациях. В конкретной числовой форме это иллюстрирует табл. 2, где приведены выражения полиномов ПФ регуляторов, значения СГК желаемых ХП и максимально допустимые (по условиям устойчивости префильтров) значения угловых скоростей ЭД ($\Omega_{гр}$) при управлении типовыми ОУ с указанными значениями параметров и одинаковой настройке всех систем на быстрдействие 50 мс. Сопоставление достигаемых значений $\Omega_{гр}$ и их сравнение с номинальным значением скорости ЭД $\Omega_{ном} = 157 c^{-1}$ свидетельствует о расширении диапазона устойчивости систем с ростом степени сложности УУ и соответствующем снижении ограничений устойчивости со стороны префильтров.

Однако при усложнении объекта и синтезируемого регулятора динамические характеристики адаптивных систем начинают в определяющей степени зависеть от структурной реализации внутриконтурной части УУ, согласно рис. 2. Обеспечивая идентичную отработку сигналов задания Ω_3 в неадаптивных версиях систем, эти структуры оказываются принципиально различными в отработке адаптирующих входных сигналов Ω и Ω_3 , что обуславливает соответствующие различия показателей качества адаптивных версий синтезируемых СИ ЭМС.

Путем линеаризации каждого из рассматриваемых типов адаптивных регуляторов, реализуемых в КФУ и КФН, и проведения аналитических вычислений были получены соответствующие выражения их передаточных функций от входного (адаптирующего) сигнала к выходному сигналу

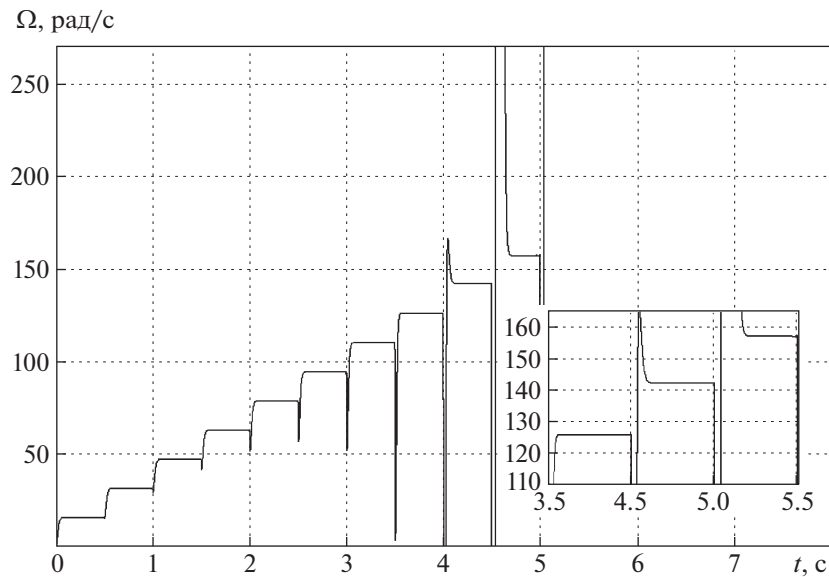


Рис. 4. Каскадные переходные характеристики адаптивной СИ ЭМС с объектом управления первого порядка и редуцированной МВ

управления. В результате их обобщения удалось получить объединенные выражения передаточных функций для обеих форм представления используемых регуляторов.

Так при реализации адаптивных регуляторов в КФУ (рис. 2, а) их линеаризованная ПФ по каналу адаптации в приращениях относительно установившегося значения Ω и соответствующих значений координат состояния x_i принимает вид

$$\frac{\Delta u(s)}{\Delta \Omega(s)} = -\frac{2x_1 \Omega W_{\text{КФУ}}(s)}{b_0 F(s)}, \quad (2.1)$$

где $W_{\text{КФУ}}(s) = D(s)$ для редуцированной МВ, $W_{\text{КФУ}}(s) = sD(s)$ для полной МВ, x_1 – установившееся значение первой переменной состояния внутриконтурного элемента УУ, соответствующее скорости Ω в точке линеаризации.

Наличие в (2.1) форсирующего полинома числителя $W_{\text{КФУ}}(s)$, полностью соответствующего выражению желаемого ХП замкнутой системы $D(s)$, свидетельствует о том, что перестройка параметров УУ по реальной скорости Ω осуществляется здесь с упреждением инерции, сформированной основным контуром управления. Благодаря этому обеспечивается устойчивость и сохраняются заданные желаемым ХП показатели качества синтезированной системы, соответствующие рис. 3, при значительных изменениях уровня скорости Ω (в пределах зоны устойчивости префильтра). Важно отметить, что это свойство сохраняется независимо от порядка объекта, степени сложности УУ и всей системы управления.

Однако использование такого решения для адаптации УУ в функции заданного значения скорости Ω_3 , т.е. с дополнительным упреждением динамики основного контура управления, приводит к существенному ухудшению качества переходных процессов из-за избыточных форсировок ОУ, особенно выраженное при управлении малоинерционными объектами. Это наглядно иллюстрируют переходные характеристики, представленные на рис. 4, которые получены моделированием системы управления объектом первого порядка с редуцированной МВ. Для устранения указанного недостатка требуется введение в состав регулятора дополнительного фильтрующего устройства с ПФ синтезируемой системы, что заметно усложняет его практическую реализацию и повышает чувствительность показателей качества к погрешностям настройки УУ.

При реализации адаптивных регуляторов в КФН (рис. 2, б, в) свойства систем существенно изменяются. Линеаризованная ПФ таких регуляторов по каналу адаптации принимает вид

$$\frac{\Delta u(s)}{\Delta \Omega(s)} = -\frac{2x_1 \Omega W_{\text{КФН}}(s, \Omega)}{b_0 F(s)}, \quad (2.2)$$

где $W_{\text{КФН}}(s, \Omega) = A(s)T(s, \Omega)$ для редуцированной МВ и $W_{\text{КФН}}(s, \Omega) = A(s)sT(s, \Omega)$ для полной МВ, а полином $T(s, \Omega)$ зависит от вида ОУ и скорости Ω , x_l – установившееся значение последней (l -й) переменной состояния внутриконтурного элемента УУ, соответствующее скорости Ω в точке линеаризации.

При этом в (2.2) полином $W_{\text{КФН}}(s, \Omega) \neq W_{\text{КФУ}}(s)$, а его выражение зависит от ПФ управляемого объекта и уровня скорости Ω . Как следствие теряется тот эффект форсировки, который свойственен КФУ, повышается инерция канала адаптации и существенно изменяются полюсы синтезированной системы.

В результате с увеличением степени сложности ОУ и уровня скорости наблюдается интенсивное снижение показателей качества и потеря устойчивости системы, как это иллюстрируется переходными характеристиками на рис. 5, а, полученными моделированием адаптивной системы управления объектом 2-го порядка с редуцированной МВ. При этом диапазон устойчивой работы системы ограничивается не префильтром (он может и отсутствовать), а внутриконтурной частью адаптивного УУ.

Использование такого решения для адаптации УУ в функции сигнала задания скорости Ω_3 позволяет решить проблему устойчивости и улучшить показатели качества адаптивной системы (рис. 5, б). Но они оказываются хуже, чем при реализации регулятора в КФУ, и для их улучшения также приходится вводить в канал адаптации дополнительное динамическое звено, с той разницей, что его параметры более сложным образом зависят от параметров адаптируемой системы и сами должны перестраиваться при изменениях заданной скорости.

Следует отметить, что существенное различие форсировочных способностей адаптивных регуляторов, реализованных в КФУ и КФН, можно спрогнозировать и по их структурным представлениям на рис. 2, из которых следует, что адаптирующий сигнал в КФУ поступает сразу на выходы интеграторов, в то время как в КФН он формирует управляющее воздействие через их входы. Однако полученные аналитические выражения (2.1) и (2.2) оказываются, безусловно, более информативными и более полно отражают особенности работы указанных видов адаптивных регуляторов в различных применениях.

Для более детального сравнительного исследования предложенных вариантов адаптивных СИ ЭМС и наглядного отражения выявленных закономерностей были проведены вычислительные эксперименты с их моделями в среде программного комплекса MATLAB.

Оценивались каскадные переходные характеристики систем, полученные при ступенчатом повышении уровня рабочей скорости, с использованием упрощенной 5-бальной шкалы оценок. При этом высшая оценка – 5 выставлялась, если система сохраняла устойчивость до уровня скорости $1.5\Omega_{\text{ном}}$ и заданное качество переходных процессов, не требовала дополнительных динамических блоков в канале адаптации, усложняющих систему и повышающих ее чувствительность к вариациям внутренних параметров. Эта оценка снижалась на 1 балл за ухудшение качества процессов (повышение перерегулирования более чем на 20%) в диапазоне $\Omega_{\text{ном}} \dots 1.5\Omega_{\text{ном}}$, за установку дополнительных динамических блоков в канале адаптации УУ и еще на 1 балл за необходимость перестройки их параметров при вариациях скорости. Оценка снижалась на 2 балла за указанное ухудшение качества переходных процессов в диапазоне $0 \dots \Omega_{\text{ном}}$ и на 3 балла за потерю устойчивости системы в диапазоне $\Omega_{\text{ном}} \dots 1.5\Omega_{\text{ном}}$. Самая низкая оценка – 0 отражала потерю устойчивости (работоспособности) в основном скоростном диапазоне в пределах номинальной скорости $\Omega_{\text{ном}}$.

Результаты выполненных вычислительных экспериментов и анализа свойств различных вариантов адаптивных систем управления типовыми объектами по указанной шкале оценок приведены в табл. 3. Несмотря на упрощенную процедуру сравнительной оценки, полученные результаты достаточно наглядно отражают выявленные аналитически закономерности, придавая им определенную количественную интерпретацию.

Так минимальные (0 и 0) оценки качества, найденные при адаптации конкретной формы регулятора как по реальной скорости, так и по сигналу ее задания, а также очень низкие оценки (2 и 2) свидетельствуют о потере устойчивости СИ ЭМС “по вине” префильтра в соответствующем скоростном диапазоне. А анализ всего объема данных позволяет установить, что реализация внутриконтурной части адаптивного регулятора в КФУ всегда является более предпочтительной, чем в КФН, если сохраняется устойчивость префильтра. Становится также очевидным, что наименее эффективна реализация адаптивного регулятора в расширенной КФН, поскольку при управлении объектами низкого порядка ее возможности ограничиваются зоной устойчивости

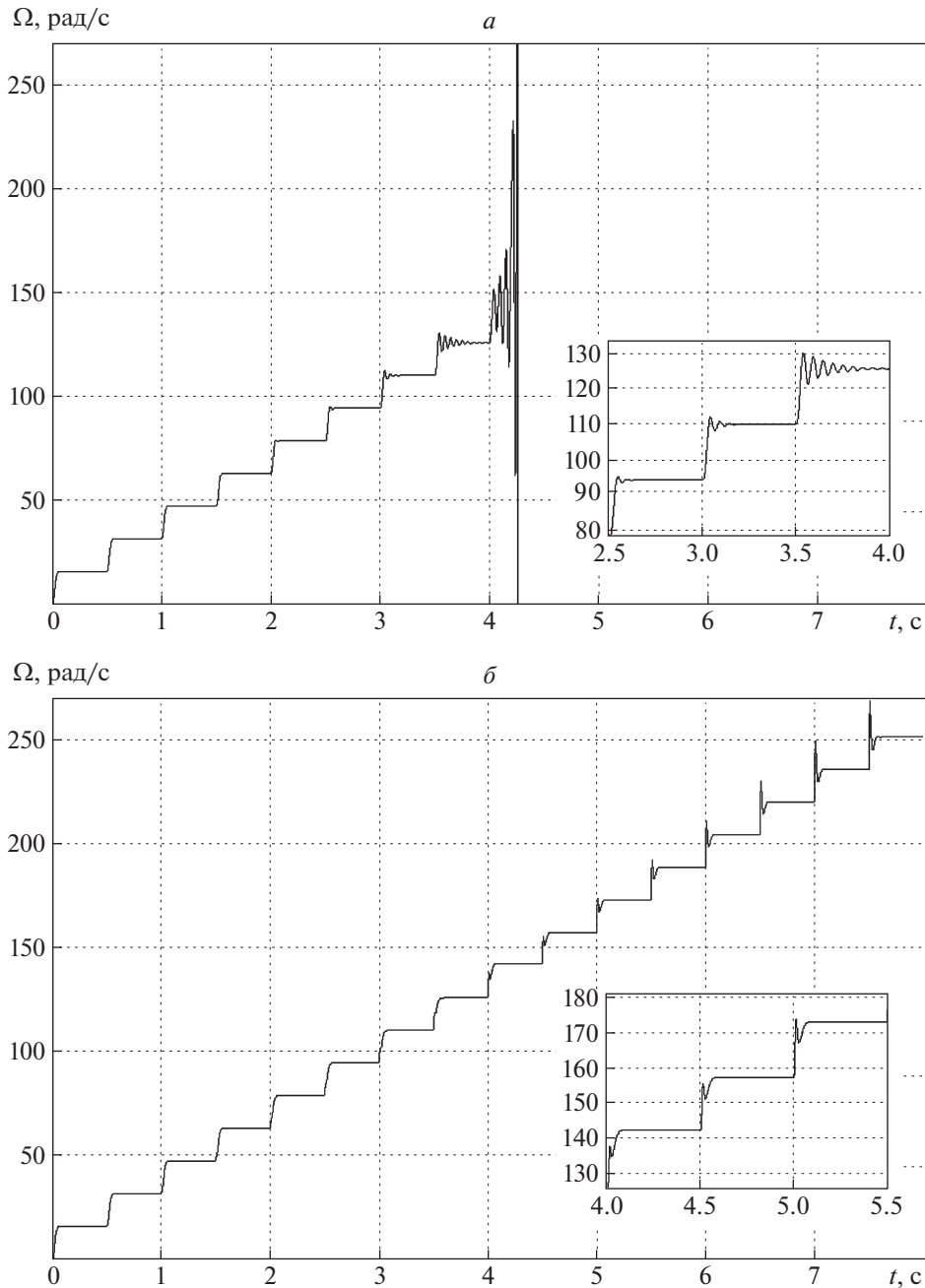


Рис. 5. Каскадные переходные характеристики адаптивной СИ ЭМС с объектом управления второго порядка и редуцированной МВ: *а* – адаптирующий сигнал Ω ; *б* – адаптирующий сигнал Ω_3

префильтра, а при управлении более сложными объектами – отсутствием необходимой форсировочной способности адаптирующего канала.

Поскольку применение методов модального синтеза УУ при одинаковых настройках систем в значительной степени нивелирует параметрические различия объектов управления, сохраняя различия их степени сложности (порядка), то полученные результаты приобретают свойство универсальности и могут использоваться для выбора рациональных структур систем управления объектами с другими сочетаниями параметров, а также для структурной оптимизации более сложных версий адаптивных СИ ЭМС.

3. Структурные реализации и исследования адаптивных версий модернизированных селективно-инвариантных ЭМС. Структурно-функциональные схемы модернизированных вариантов СИ

Таблица 3. Анализ свойств различных вариантов адаптивных систем управления

| Форма представления регулятора | Адаптирующий сигнал | Оценки синтезированных СИ ЭМС | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|------------------------------------------|-----|-----|----------------------------------|-----|-----|
| | | тип УУ ($N = h/l$) с редуцированной МВ | | | тип УУ ($N = h/l$) с полной МВ | | |
| | | 1/2 | 2/2 | 3/3 | 2/3 | 3/3 | 4/4 |
| КФУ | Ω | 0 | 0 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| | Ω_3 | 0 | 0 | 4 | 2 | 5 | 5 |
| КФН | Ω | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 |
| | Ω_3 | 0 | 0 | 3 | 2 | 4 | 3 |
| Объединенная КФН | Ω | 5 | 0 | 0 | 5 | 2 | 2 |
| | Ω_3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 |

ЭМС с объединенной и разделенной на колебательную и интегральную составляющие МВ [9, 10], дополненные каналами адаптации регуляторов, приведены соответственно на рис. 6, а, б.

Применение принципа локализации с настройкой темпа внутренней (“быстрой”) подсистемы в 5–7 раз выше темпа основного контура управления дает основание [9] аппроксимировать

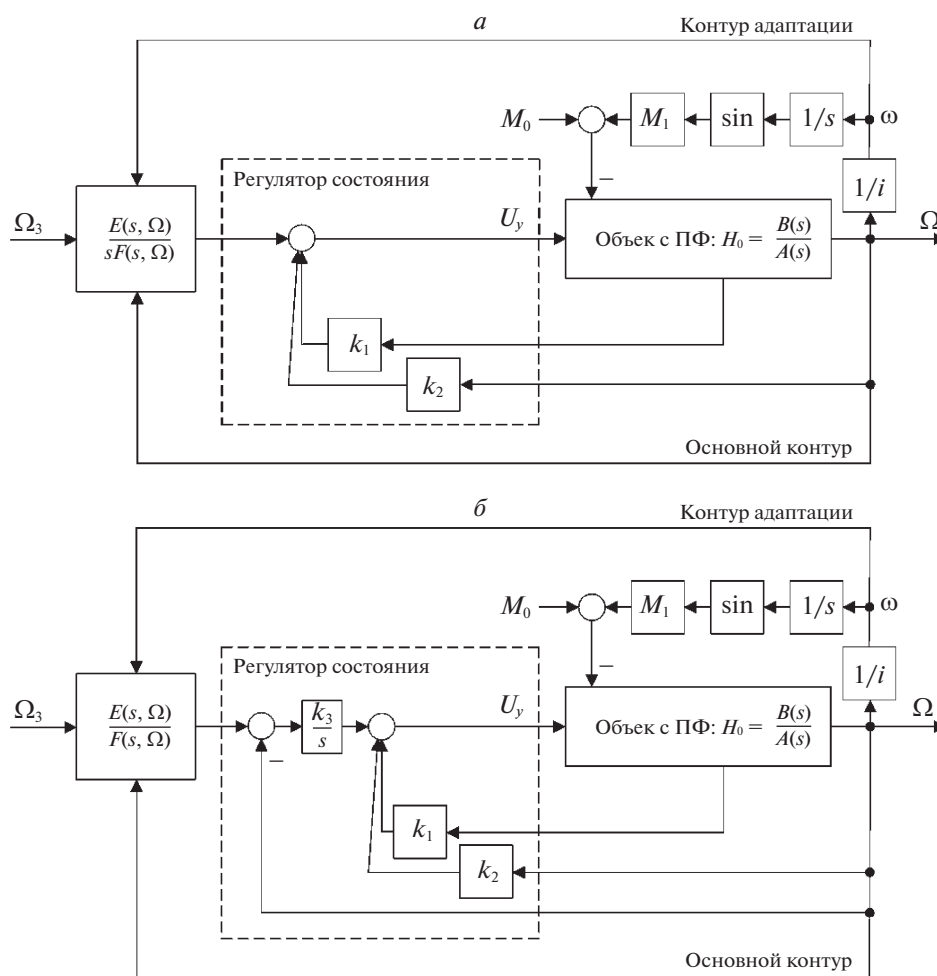


Рис. 6. Структурно-функциональные схемы модернизированных вариантов СИ ЭМС: а – с объединенной МВ; б – с разделенной МВ

ее безынерционным звеном и при выборе рациональной структуры адаптивного регулятора с объединенной МВ и показателем сложности $N = 2/3$ (табл. 2, 3) отдать предпочтение объединенной КФН (рис. 1, б), позволяющей достичь более высоких показателей качества, которые соответствуют рис. 3.

При ускорении внутренней подсистемы в 2–3 раза ее следует представлять [9] апериодическим звеном 1-го порядка и использовать адаптивный регулятор с показателем сложности $N = 3/3$ (табл. 2, 3). При этом реализация его канала адаптации в КФН (рис. 2, б, в), как это предложено для редукторной ЭМС в [13], приводит к существенному ухудшению динамики системы с ростом уровня скорости аналогично рис. 5. Для приближения переходных процессов к виду рис. 3 здесь будет целесообразно перевести структуру адаптивного регулятора в КФУ (рис. 2, а).

Соответствующие закономерности и рекомендации формируются также при использовании принципа разделения МВ с переносом интегральной составляющей в состав внутренней подсистемы (рис. 6, б): при максимальном темпе “быстрых” процессов для реализации адаптивного регулятора с показателем $N = 1/2$ (табл. 3) целесообразно применять объединенную КФН (рис. 2, в), а при среднем темпе этих процессов регулятор с показателем $N = 2/2$ следует выполнять в той же форме, но осуществлять его адаптацию в функции сигнала задания скорости.

Следует также отметить, что результаты адаптивного управления объектами 2-го порядка с полной и редуцированной МВ, реализуемого регуляторами с соответствующими показателями $N = 3/3$ и $N = 4/4$ (табл. 3), могут использоваться для реализации традиционных структур СИ ЭМС [9, 10] с малоинерционными силовыми преобразователями, быстродействующими контурами тока или момента и жесткими кинематическими передачами. В этих случаях гораздо более высокие показатели качества достигаются при реализации адаптивных регуляторов в КФУ.

С помощью возможностей программного комплекса MATLAB в среде Simulink было проведено цифровое моделирование и выполнен весь комплекс сравнительных исследований традиционных и модернизированных версий адаптивных СИ ЭМС с параметрами из [9, 10] в том же объеме, что и для систем с типовыми объектами управления. Полученные результаты в полной мере подтвердили все выявленные выше закономерности и аналогии в работе различных вариантов систем, а также эффективность использования разработанных рекомендаций при их структурно-параметрическом синтезе.

Важно указать, что при высоком качестве работы контуров адаптации УУ (рис. 3) все варианты адаптивных СИ ЭМС в соответствующем скоростном диапазоне обеспечивают эффективную отработку гармонических возмущений момента нагрузки, свойственную неадаптивным версиям систем на расчетном уровне скорости.

4. Практическая реализация адаптивных СИ ЭМС и экспериментальная проверка теоретических результатов. Разработанные варианты адаптивных управляющих устройств программно встраивались в систему векторного управления асинхронным электроприводом главного движения токарно-фрезерного станка 16A20Ф3 (производитель системы – ООО “Мехатроника” г. Иваново).

Силовая часть ЭП содержит асинхронный электродвигатель АИР 132М4, 220/380 В, 50 Гц, 11 кВт, 1450 об/мин и преобразователь частоты MTDrive-11D. Информационно-управляющая часть выполнена на базе контроллера движения (КД) MNC-410, совместимого со средой разработки PWIN32PRO фирмы DeltaTau, и инкрементального датчика угловых перемещений E40S6-2500-6-L-5 с разрешением 2500 меток на оборот (с возможностью увеличения эффективного разрешения до 10000 импульсов на оборот). Вычислительным ядром КД является 24-рядный цифровой сигнальный процессор Motorola DSP56303 с тактовой частотой 80 МГц.

Высокое быстродействие контура момента позволило пренебречь электромагнитной инерцией ЭП и в отсутствие упругих кинематических передач аппроксимировать объект управления апериодическим звеном первого порядка с электромеханической постоянной времени. В этом случае при использовании полной модели гармонического возмущения вида (0.2) различные варианты адаптивных СИ ЭМС синтезировались на базе регулятора 3-го порядка с показателем $N = 3/3$, выражения полиномов которого приведены в табл. 1.

Системы синтезировались по требованию быстродействия в 120 мс, для чего СГК Ω_0 желаемого ХП $D(s)$ принимался равным 30 с^{-1} . Соответствующие разностные уравнения различных вариантов адаптивных регуляторов формировалась неявным методом Эйлера при значении такта квантования 0.4 мс.

В режиме адаптации по скорости параметру ω на каждой итерации сервоцикла КД присваивалось текущее значение скорости вращения РО Ω , а в режиме адаптации по заданию – текущее значение сигнала Ω_3 , после чего выполнялся пересчет параметров регуляторов по выражениям их полиномов из табл. 1.

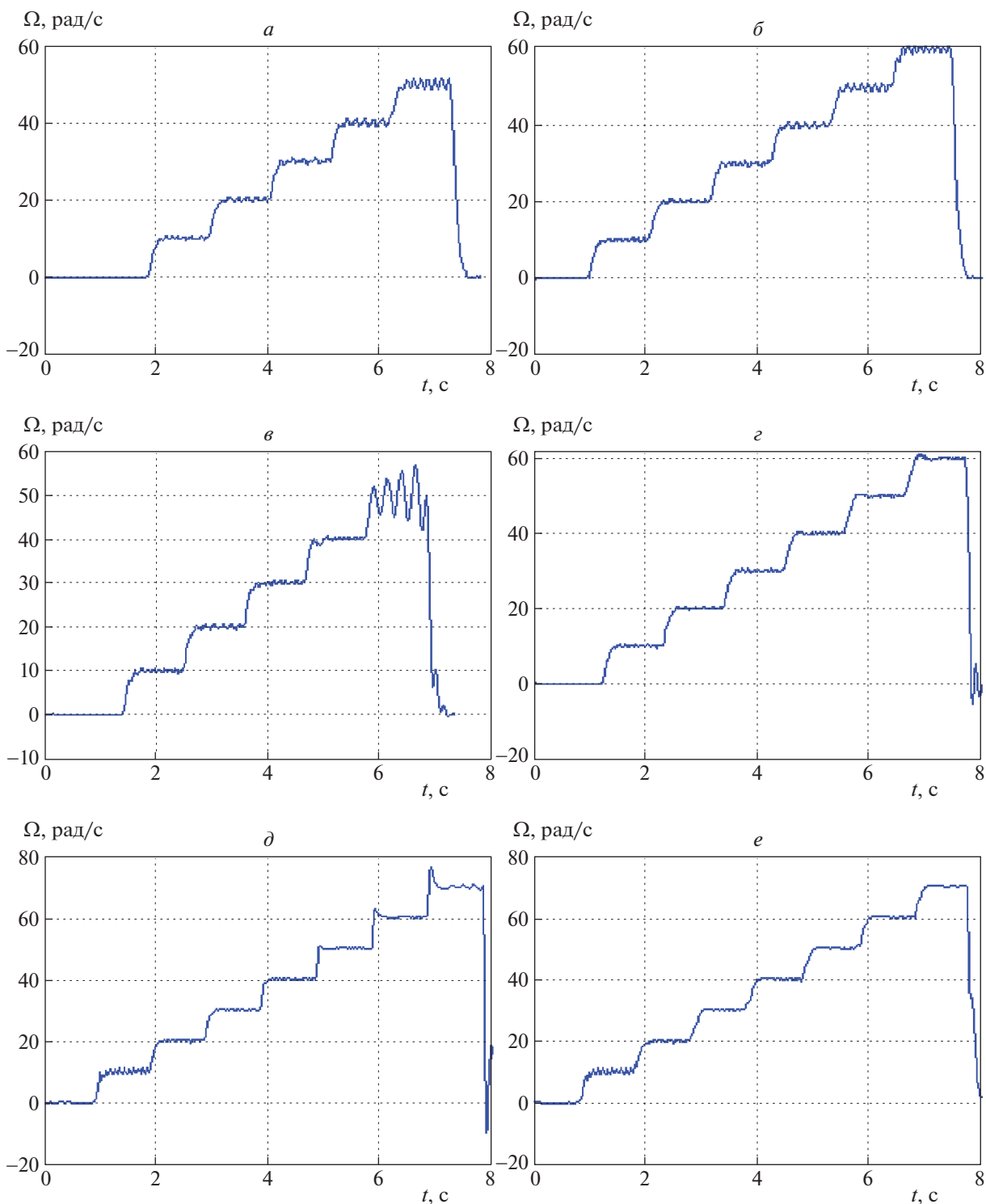


Рис. 7. Различные варианты экспериментальных каскадных переходных характеристик: *a, б* – неадаптивных СИ ЭМС с УУ, реализованным в объединенной КФН и КФУ соответственно; *в, г* – адаптивных СИ ЭМС с УУ, реализованным в объединенной КФН и КФУ с адаптацией по Ω ; *д, е* – адаптивных СИ ЭМС с УУ, реализованным в объединенной КФН и КФУ с адаптацией по Ω_3

Гармонические колебания момента нагрузки ЭД порождались неравномерным распределением массы обрабатываемой заготовки, закрепленной в шпинделе станка, и компенсировались исследуемыми вариантами СИ ЭМС с различной степенью эффективности при изменении скорости вращения рабочего органа.

Наиболее характерные результаты экспериментов в виде каскадных переходных характеристик исследуемых вариантов СИ ЭМС с регуляторами в КФУ и КФН в неадаптивных версиях, а также при организации каналов адаптации в функции реальной скорости и сигнала ее задания приведены на рис. 7.

Переходные характеристики на рис. 7, а, б наглядно показывают, что, эффективно подавляя гармонические возмущения расчетной частоты ($\omega = 10$ рад/с), неадаптивные версии СИ ЭМС в значительной мере теряют свои свойства при изменениях уровня рабочей скорости.

Добавление контура адаптации в структуру СИ ЭМС позволяет существенно улучшить качество компенсации гармонической составляющей момента нагрузки при изменениях ее частоты (рис. 7, в, г), однако это достигается только при выборе рациональной формы представления адаптивного регулятора. В данном случае, как это и прогнозировалось результатами теоретических исследований (табл. 3, столбец 5), такой формой является КФУ, несколько более сложная в практической реализации в сравнении с объединенной КФН.

Определенное улучшение качества управления при реализации адаптивного регулятора в объединенной КФН достигается путем самонастройки его параметров в функции заданного значения скорости (рис. 7, д), однако и в такой реализации адаптивного канала СИ ЭМС на базе КФУ сохраняет свои преимущества (рис. 7, е).

Важно отметить, что для указанного применения адаптивные СИ ЭМС на базе регуляторов в КФУ позволяют в полной мере решить поставленную задачу эффективного подавления гармонических возмущений и сохранения заданных показателей качества в широком диапазоне скоростей.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования в значительной мере подтвердили основные закономерности работы адаптивных версий СИ ЭМС, их сравнительные оценки и справедливость теоретически выработанных рекомендаций по их структурно-параметрической оптимизации.

Заключение. Применение методов модального управления и полиномиального синтеза регуляторов с внутренней МВ позволяет получить аналитические выражения полиномов, которые могут быть использованы для реализации УУ в различных канонических формах и построения контуров адаптации как в функции реальной, так и в зависимости от заданной скорости электро-механической системы.

Выбор наиболее целесообразной формы представления УУ селективно-инвариантных ЭМС и способа их адаптации к уровню скорости для эффективного подавления гармонических возмущений, а также сохранения заданных показателей качества следует осуществлять в зависимости от типа объекта управления и вида МВ. При этом для более простых объектов и моделей, а также при формировании в структурах “быстрых” внутренних подсистем лучшие показатели управления обеспечивает объединенная КФН, а при управлении объектами высокого порядка с помощью полной МВ в традиционных структурах СИ ЭМС более эффективным является представление регуляторов в КФУ.

Выявленные закономерности работы адаптивных СИ ЭМС и сформированные на этой основе рекомендации по их структурной оптимизации могут эффективно использоваться специалистами, занимающимися разработкой, практической реализацией и применением прецизионных ЭП, предназначенных для работы в широком диапазоне скоростей.

Высокие динамические показатели разработанных адаптивных СИ ЭМС, предназначенных для регулирования скорости в широком диапазоне, создают предпосылки для эффективного использования предложенных методов синтеза и полученных структур в системах контурно-позиционного и следящего управления угловыми перемещениями РО технологических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы / Пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. Л.: Энергоатомиздат. ЛО, 1985.
2. Canudas de Wit C., Praly L. Adaptive Eccentricity Compensation // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2000. V. 8. № 5.
3. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
4. Feng J., Wang Q., Liu K. High-Precision Speed Control Based on Multiple Phase-Shift Resonant Controllers for Gimbal System in MSCMG // Energies, An Open Access Journal, MDPI. Basel, Switzerland, 2018. V. 11 (1). P. 32.

5. *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.
6. *Francis B.A., Wonham W.M.* The Internal Model Principle of Control Theory // Automatica. 1976. V. 12.
7. *Costa-Castello R., Olm J.M., Vargas H., Ramos G.A.* An Educational Approach to the Internal Model Principle for Periodic Signals // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 2012. V. 8. № 8.
8. *Mandel Y., Weiss G.* Adaptive Internal Model Based Suppression of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives // Systems Science & Control Engineering. 2015. V. 3:1. P. 162–176.
9. *Тарарыкин С.В., Копылова Л.Г., Тихомирова И.А.* Структурно-параметрический синтез и оптимизация регуляторов селективно-инвариантных электромеханических систем с гармоническим моментом нагрузки // Электротехника. 2015. № 5. С. 62–70.
10. *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.
11. *Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.* Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. ФГБОУВПО “Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина”. Иваново, 2015.
12. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: Физматлит, 2012.
13. *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.
14. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2004.
15. *Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.