

УДК 625.083

Анализ структурных реализаций селективно-инвариантных электромеханических систем¹

И.А. Тихомирова, Л.Г. Копылова, С.В. Тарарькин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: tsv@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Гармонические возмущения момента нагрузки электродвигателей электромеханических систем могут приводить к существенным пульсациям угловых скоростей электродвигателя и рабочего органа, оказывая негативное влияние на качество выпускаемой продукции. Применение систем регулирования скорости, построенных на основе использования безынерционных регуляторов состояния или динамических (полиномиальных) регуляторов «входа-выхода» полной размерности, приводит к чрезмерным форсировкам электродвигателя в процессах регулирования скорости. В связи с этим актуальным является применение принципа селективной инвариантности систем автоматического управления.

Материалы и методы: В качестве метода компенсации гармонических возмущений использован принцип сочетания внутренней модели гармонического возмущения, включенной в состав управляющего устройства электропривода, с другими принципами теории управления. Исследование выполнено методом цифрового моделирования синтезированных селективно-инвариантных электромеханических систем в частотных областях при гармонических воздействиях в широком диапазоне частот.

Результаты: Решена задача улучшения отработки гармонического возмущения момента нагрузки электродвигателя в широком диапазоне скоростей и обеспечения минимальной статической ошибки по скорости от действия постоянной составляющей момента нагрузки. На основе сравнительного анализа амплитудно-частотных характеристик синтезированных селективно-инвариантных электромеханических систем показаны преимущества структурных решений, обеспечивающих лучшую отработку полигармонических возмущений по моменту нагрузки.

Выводы: Полученные результаты позволяют наглядно показать высокую эффективность селективно-инвариантных систем с внутренней моделью гармонического возмущения при отработке сложных несинусоидальных возмущений момента нагрузки с широким спектральным составом гармоник, а также гармонического момента нагрузки электродвигателя в широком скоростном диапазоне.

Ключевые слова: электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, частотно-временной анализ, селективная инвариантность, структурная оптимизация регуляторов, разделение модели возмущения.

Analysis of structural implementations of selective-invariant electromechanical systems

I.A. Tikhomirova, L.G. Kopylova, S.V. Tararykin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tsv@ispu.ru

Abstract

Background: Harmonic disturbances of electric drive load torque in electromechanical systems can cause a significant ripple of angular velocity of the electric drive and the working member, thus having a negative impact on the quality of the finished product. Application of speed control systems based on the use of inertialess state controllers or dynamical (polynomial) «input-output» controllers of full dimension leads to excessive forcing of the motor in speed control processes. This fact makes it urgent to apply the method of selective invariability of automatic control systems.

Materials and methods: A combination of harmonic disturbance internal model included in the electric drive control unit and other control theory methods was used as the harmonic disturbance compensation method. The study was conducted by the method of numerical modeling of synthesized selective-invariant electromechanical systems in frequency domains under harmonic action in a wide frequency range.

Results: The study has solved the problem of harmonic disturbance response improvement of electric drive load torque in a wide range of frequencies and minimization of static velocity error caused by the load torque constant component. A comparative analysis of amplitude-frequency characteristics of synthesized selective-invariant electromechanical systems has revealed the advantages of the structural solutions that provide a better load torque polyharmonic disturbance response.

Conclusions: The obtained results enable us to demonstrate the high efficiency of selective-invariant systems with an internal model of harmonic disturbance in compensation of complex non-sinusoidal disturbances of load torque with a wide spectrum of harmonic components and harmonic electric drive load torque in a wide speed range.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части Госзадания и гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

Key words: electromechanical system, harmonic disturbance compensation, time-frequency analysis, selective invariance, control structural optimization, internal model division.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.047-054

Современное производство предъявляет все более высокие требования к показателям качества исполнительных электромеханических систем (ЭМС) – электроприводов. Однако наличие погрешностей в изготовлении их механической части становится причиной появления гармонических возмущений момента нагрузки на валу рабочего органа (РО), которые можно представить в виде [1]

$$M_H = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i \sin(\omega_i t) \approx M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где M_0 – постоянная составляющая; M_i – амплитуда колебаний момента нагрузки; ω_i – скорость вращения РО.

Снижение последствий подобных возмущений позволит существенно улучшить качественные показатели готовой продукции: точность изготовления, заданные геометрические размеры изделий (диаметра волокна, толщины пленки или различных покрытий), весовые параметры материалов. Это подтверждено результатами соответствующих исследований² [1–3].

Попытки компенсации гармонического возмущения момента нагрузки путем повышения быстродействия (динамической точности) ЭМС традиционных структур, построенных на основе использования безынерционных регуляторов состояния (РС) или динамических (полиномиальных) регуляторов «входа-выхода» (ПР) полной размерности [4], приводят к чрезмерным форсировкам электродвигателя (ЭД) в процессах регулирования скорости.

Более эффективным способом компенсации указанных воздействий является применение принципа селективной инвариантности систем автоматического управления (САУ),

го на использовании внутренней модели возмущения (МВ).

Проведем сравнительный анализ возможностей различных структурных реализаций селективно-инвариантных ЭМС [5, 6] при их работе в широком диапазоне скоростей и, как следствие, частот гармонического момента нагрузки (более 1000:1), а также при воздействии несинусоидальных периодических возмущений момента нагрузки ЭД с широким спектральным составом гармоник.

В качестве объекта исследований выбрана широко распространенная ЭМС постоянного тока [7], структурная схема которой представлена на рис. 1,а, где использованы следующие обозначения величин: U_y , U – управляющее и выходное напряжения силово-

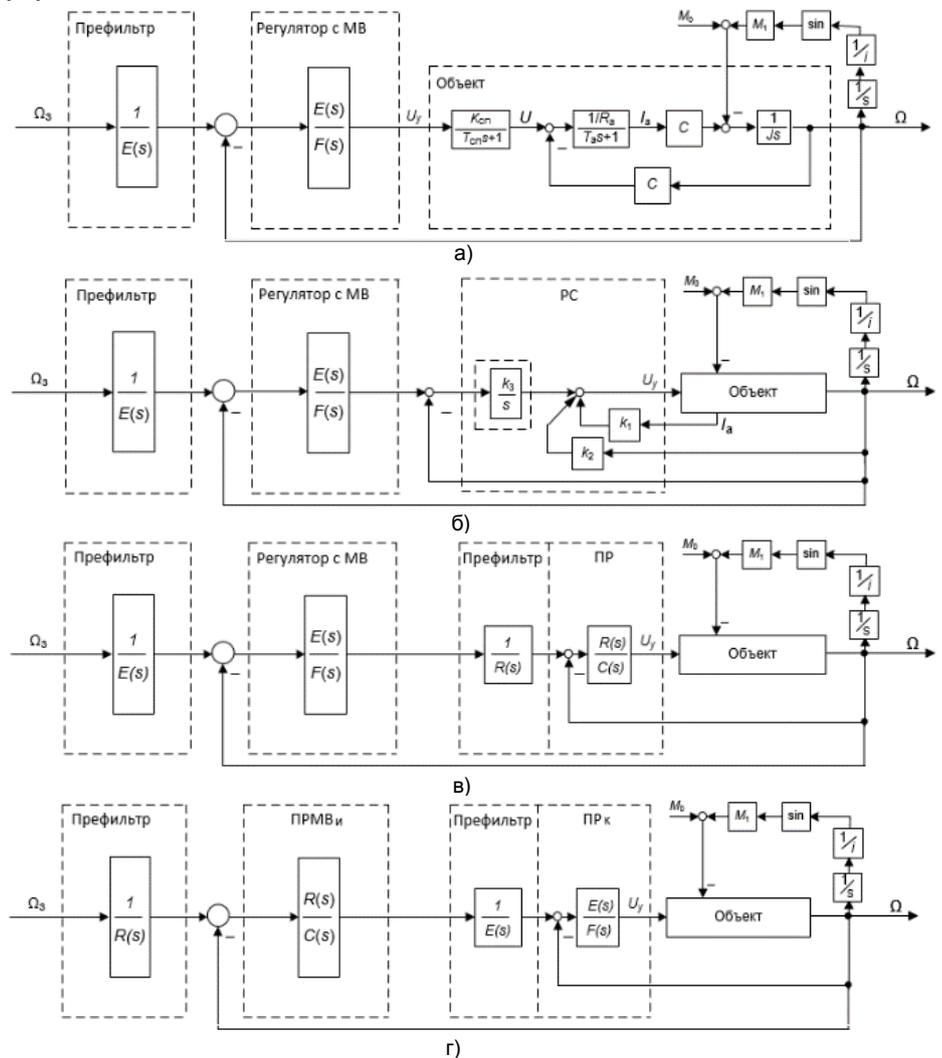


Рис. 1. Структурные схемы объекта управления и различных вариантов ЭМС

² Тарарыкин С.В. Принципы управляемой синхронизации машин в технологических агрегатах для производства ленточных и волоконных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13, 05.09.03. – Иваново, 1992.

го преобразователя (СП); I_a – ток якорной цепи; $K_{СП}$ и $T_{СП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени СП; R_a и T_a – активное сопротивление и постоянная времени силовой цепи; C – конструктивная постоянная ЭД; J – суммарный приведенный момент инерции ротора ЭД и РО; i – передаточное отношение редуктора; s – комплексная переменная Лапласа.

Для конкретности приняты следующие значения параметров системы: $K_{СП} = 22$; $T_a = 0,02$ с; $C = 1,37$ Вб; $J = 0,2$ кг·м²; $i = 10$; $M_1 = 8,22$ Н·м; $T_{СП} = 0,003$ с; $R_a = 0,177$ Ом.

Согласно принципу селективной инвариантности, полином, формирующий математическую модель возмущения (1) и вводимый в знаменатель передаточной функции (ПФ) регулятора, определяется в виде

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

а искажение ПФ по управляющему воздействию устраняется соответствующим внеконтурным префильтром. Выходной сигнал такого регулятора будет содержать гармоническую составляющую, которая при содействии отрицательной обратной связи по управляемой координате обеспечит противофазную компенсацию возмущения в установившемся режиме работы на частоте настройки системы.

Для обеспечения нулевой статической ошибки по скорости от действия постоянной составляющей момента нагрузки в модель возмущения (2) вводится интегральная составляющая, которая обеспечивает астатизм 1-го порядка.

Наиболее простым структурным решением поставленной задачи, требующим измерения только выходной координаты объекта управления (ОУ), является система управления ЭП, обозначенная как О(ПРМВ) и представленная на рис. 1,а. Она имеет один контур управления с объединенным ПР, содержащим в своем составе МВ.

Существенно упростить регулятор можно в системах, обозначаемых как ПРМВ-(РС)б (ПРМВ_к-(РС_и)б), структурная схема которых представлена на рис. 1,б. Здесь по отношению к внешнему контуру с ПР, содержащим МВ, организуется внутренняя подсистема регулирования скорости на базе безынерционного РС с быстродействием, значительно превышающим заданные динамические требования.

Принцип разделения движения (РД) может быть использован в системе управления ЭП при измерении лишь выходной координаты (рис. 1,в). В этом случае «быстрая» внутренняя подсистема регулирования скорости строится на основе ПР (системы ПРМВ-(ПР)б, ПРМВ_к-(ПР_и)б).

В целях повышения устойчивости разрабатываемой ЭМС к воздействию помех в измерительных каналах необходимо при синтезе внутренней подсистемы регулирования скорости с РС или ПР (рис. 1,б,в) обеспечить ее более «медленную» настройку. При этом доста-

точно умеренно (в 2–2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется аperiодическим звеном первого порядка, после чего осуществляется синтез внешнего ПР, содержащего МВ. Полученные выражения и параметры полиномов систем, обозначенных как П(ПРМВ-РС) и П(ПРМВ-ПР) и системы П(ПРМВ_к-РС_и), приведены соответственно в табл. 1, 2.

Аппроксимация внутренних подсистем звеньями низкого порядка может привести к ухудшениям заданных показателей качества ЭМС, например повысить чувствительность к вариациям внутренних параметров.

Снизить погрешности аппроксимации позволяет представление внутренней подсистемы аperiодическим звеном 2-го порядка. Полученные значения коэффициентов ОС, выражения и параметры полиномов ПФ регуляторов для данной ЭМС, обозначенной как П₂(ПРМВ_к-РС_и), приведены в табл. 2.

Определенный компромисс между чувствительностью к помехам и вариациями внутренних параметров могут представлять системы, построенные по такому же каскадному принципу (рис. 1,б,в), но без понижения порядка и аппроксимации внутренних подсистем регулирования скорости (К(ПРМВ-РС), К(ПРМВ-ПР), К(ПРМВ_к-РС_и)).

Полная информация о регуляторах всех типов синтезированных систем управления ЭП приведена в табл. 1, 2. В строках табл. 1 с нечетным цифровым обозначением САУ, представлены выражения регуляторов статических систем, а с четным – систем с интегральной составляющей, включенной в регулятор с МВ.

В целях обеспечения улучшения качества отработки постоянной составляющей момента нагрузки ЭД и снижения (в той или иной мере) порядка полиномиального регулятора внешнего контура, содержащего колебательную часть МВ, было предложено переместить интегральную составляющую МВ в «быстрый», внутренний контур управления ЭМС.

Перемещение колебательной составляющей МВ во внутренний («быстрый») контур управления ЭМС (рис. 1, г) призвано обеспечить улучшение качества отработки переменной составляющей момента нагрузки (1) ЭД и снижение порядка регулятора внешнего контура, содержащего интегральную часть МВ, при соответствующем упрощении внеконтурного префильтра. Для реализации принципа селективной инвариантности в ЭМС, обозначенной как ПР_и-(ПРМВ_к)б, во внешнем и внутреннем контурах управления используются только полиномиальные регуляторы «входа-выхода».

Параметры полученных регуляторов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Тип САУ	Цифровое обозначение САУ	Структура и параметры регулятора
О(ПРМВ) (рис. 1, а)	1	$\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{6,55s^3 + 1317s^2 + 123294s + 4438539}{(s^2 + 1,57^2)(s + 850)}$
	2	$\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{14,06s^4 + 4275,5s^3 + 685262s^2 + 57562090s + 2014679638}{s(s^2 + 1,57^2)(s + 1210)}$
ПРМВ-(РС)б (рис. 1, б)	3	$K = [-0,177 \quad -7,7]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{10,2s + 407,5}{s^2 + 1,57^2}$
	4	$K = [-0,177 \quad -7,7]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881s + 12320100}{s(s^2 + 1,57^2)}$
ПРМВ-(ПР)б (рис. 1, в)	5	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0258s + 7,7}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{10,2s + 407,5}{s^2 + 1,57^2}$
	6	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0258s + 7,7}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881s + 12320100}{s(s^2 + 1,57^2)}$
П(ПРМВ-РС) (рис. 1, б)	7	$K = [-0,056 \quad -0,88]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,143s^2 + 24,76s + 990,4}{s^2 + 1,57^2}$
	8	$K = [-0,084 \quad -1,59]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{5,33s^3 + 1574,97s^2 + 157496s + 5906250}{s^2 + 1,57^2}$
П(ПРМВ-ПР) (рис. 1, в)	9	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0082s + 0,877}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,143s^2 + 24,76s + 990,4}{s^2 + 1,57^2}$
	10	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0123s + 0,593}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{5,33s^3 + 1574,97s^2 + 157496s + 5906250}{s^2 + 1,57^2}$
К(ПРМВ-РС) (рис. 1, б)	11	$K = [-0,089 \quad -2,05]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,057s^2 + 317,086s + 11887}{s^2 + 1,57^2}$
	12	$K = [-0,14 \quad -4,64]; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{2,85s^3 + 1369,9s^2 + 123285s + 4438669}{s(s^2 + 1,57^2)}$
К(ПРМВ-ПР) (рис. 1, в)	13	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0129s + 2,052}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,057s^2 + 317,086s + 11887}{s^2 + 1,57^2}$
	14	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,021s + 4,64}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{2,85s^3 + 1369,9s^2 + 123285s + 4438669}{s(s^2 + 1,57^2)}$

Соответствующие методики расчета регуляторов различного типа САУ и сравнительная оценка различных вариантов систем по комплексу показателей качества (чувствительность к вариациям параметров механической части, помехоустойчивость системы, предельная по условию устойчивости задержка сигнала силового преобразователя и степень сложности регулятора, определяемая общим порядком его динамических звеньев), выполненная методами математического моделирования, приведены в [6].

Однако сравнительной оценки возможностей синтезированных САУ по основному показателю качества (отработке гармонического возмущения в виде момента нагрузки ЭД в

широком скоростном диапазоне) не производилось.

Исследования САУ по отработке более сложных возмущений момента нагрузки в виде полигармонических колебаний с богатым спектральным составом не выполнялись.

Ниже в целях исключения указанных пробелов проведены вычислительные эксперименты и сравнительный анализ частотных характеристик синтезированных систем ЭП, а также соответствующих временных характеристик при отработке сложных полигармонических возмущений при работе систем ЭП в составе технологических агрегатов для производства ленточно-волоконных материалов [8].

Таблица 2

Тип САУ	Цифровое обозначение САУ	Структура и параметры регулятора
ПРМВ _к -(РС _и)б (рис. 1, б)	15	$K = [-0,4 \quad -48 \quad -13424]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,5}{s^2 + 1,57^2}$
ПРМВ _к -(ПР _и)б (рис. 1, в)	16	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{75,753s^2 + 39456s + 7432506}{s(s + 2950)}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,5}{s^2 + 1,57^2}$
П(ПРМВ _к -РС _и) (рис. 1, б)	17	$K = [-0,18 \quad -10,53 \quad -1377,68]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,106s^2 + 246,387s + 9607,2}{s^2 + 1,57^2}$
П ₂ (ПРМВ _к -РС _и) (рис. 1, б)	18	$K = [-0,18 \quad -10,53 \quad -1377,68]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0001s^3 + 0,56s^2 + 156,04s + 5849,8}{(s^2 + 1,57^2)(0,0005s + 1)}$
К(ПРМВ _к -РС _и) (рис. 1, б)	19	$K = [-0,14 \quad -6,21 \quad -627,07]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,00199s^3 + 1,1599s^2 + 194,375s + 6995,9}{(s^2 + 1,57^2)(0,0005s + 1)}$
ПР _и -(ПРМВ _к)б (рис. 1, г)	20	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{55483119207}{s}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{184,98s^3 + 170968s^2 + 77060212s + 13870839757}{(s^2 + 1,57^2)(s + 4450)}$

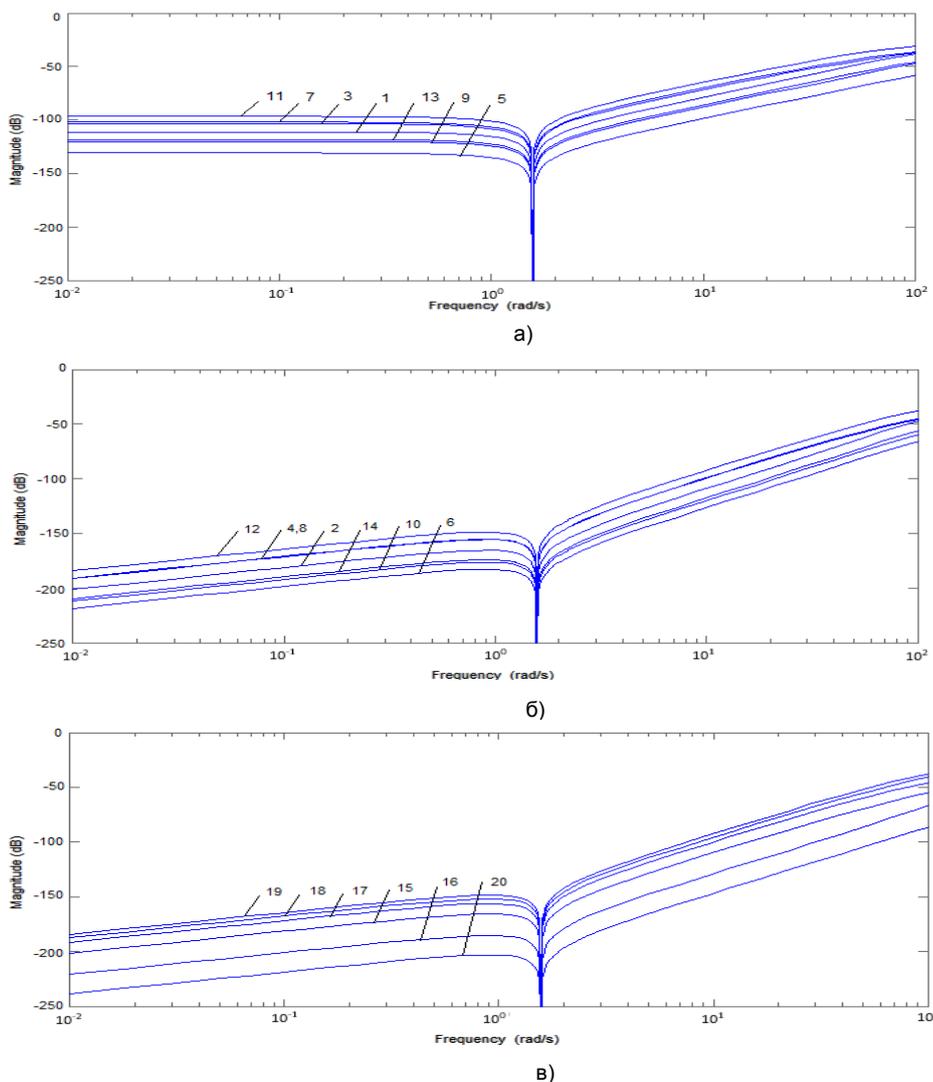


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики по возмущающему воздействию для ЭМС: а – статических; б – астатических с единой МВ; в – астатических с разделенной МВ

Следует отметить, что при моделировании не учитывались нелинейности силовых преобразователей и зазоры кинематических передач ЭМС. Рассмотренные системы работают под воздействием реактивного момента нагрузки, однако режимы перегрузок и реверса при этом не исследуются, что позволяет использовать упрощенную модель активного нагрузочного момента.

Для оценки возможностей синтезированных селективно-инвариантных ЭМС были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики всех рассмотренных вариантов систем по возмущающему воздействию. Соответствующие графики для статических систем, астатических с единой МВ, астатических с разделенной моделью возмущения приведены на рис. 2, а, б, в в логарифмических масштабах величин (номера графиков соответствуют номерам систем в табл. 1, 2).

Полученные характеристики наглядно показывают преимущество селективно-инвариантных САУ в отработке возмущений по моменту нагрузки. Системы, содержащие кроме колебательной интегральную составляющую, обеспечивают полную компенсацию гармоника нулевой частоты (постоянной составляющей момента нагрузки), причем разделение модели возмущения на колебательную и интегральную составляющие существенно улучшает отработку момента возмущения по сравнению со статическими системами. Наиболее высокая эффективность достигается при настройке систем на частоту возмущений в нижней части скоростного диапазона.

Селективно-инвариантные САУ эффективно обрабатывают не только синусоидальные, но и несинусоидальные периодические возмущения момента нагрузки ЭД с широким спектральным составом гармоник.

Для наглядности продемонстрируем это на примере изменения величины натяжения транспортируемого материала в двухканальной ЭМС.

На рис. 3,а приведена локальная зона технологического агрегата, в котором происходит процесс деформации материала, связь локальных приводных устройств осуществляется через транспортируемый материал.

Структурная схема двухдвигательной ЭМС с зоной деформации приведена на рис. 3,б, где использованы следующие обозначения: L – длина материала в зоне деформации; E – приведенный к ширине модуль упругости материала; $\Omega_{1,2}$ – угловые скорости ЭД; ρ – радиус приведения.

Для анализа отработки сложного возмущения момента нагрузки, подаваемого на ведомый двигатель (ЭМС 1), в схеме на рис. 3,б выбраны следующие системы регулирования скорости, структурные схемы которых представлены на рис. 1, с параметрами из табл. 1, 2: ПРМВ-(ПР)б (табл. 1, строка 5) – статическая ЭМС с единой МВ; ПРМВ-(ПР)б (табл. 1, строка 6) – астатическая ЭМС с единой МВ; ПР_и-(ПРМВ_к)б (табл. 2, строка 20) – астатическая ЭМС с разделенной моделью возмущения.

На рис. 4 приведены графики и спектры сложного возмущения момента нагрузки, а также величины натяжения в двухканальных ЭМС. Полученные результаты наглядно показывают, что селективно-инвариантные САУ существенно повышают качество отработки возмущений по моменту нагрузки как синусоидального, так и несинусоидального периодического характера (рис. 4). Введение интегральной составляющей в МВ позволяет полностью подавить действие гармоника нулевой частоты (постоянной составляющей момента нагрузки).

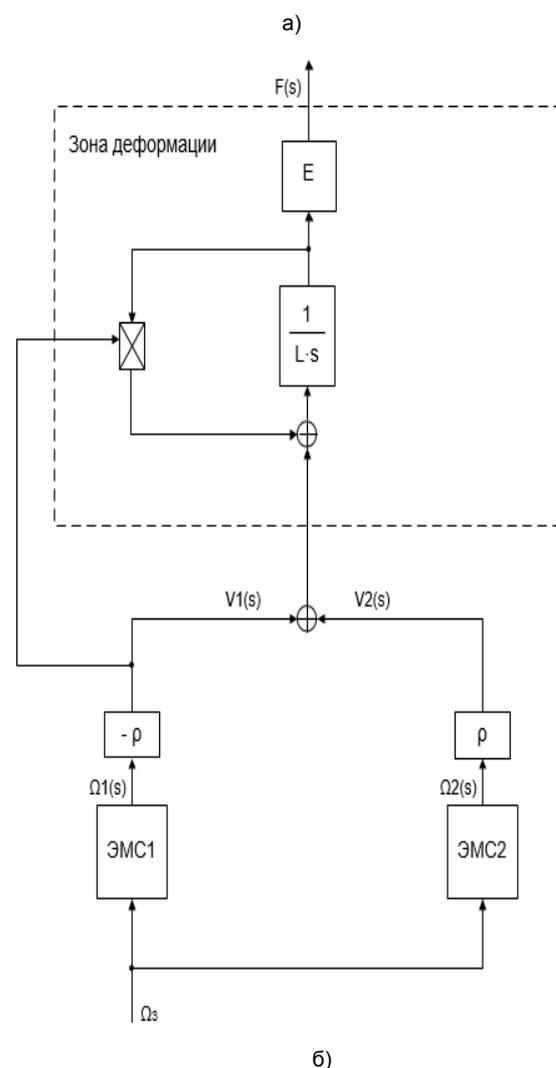
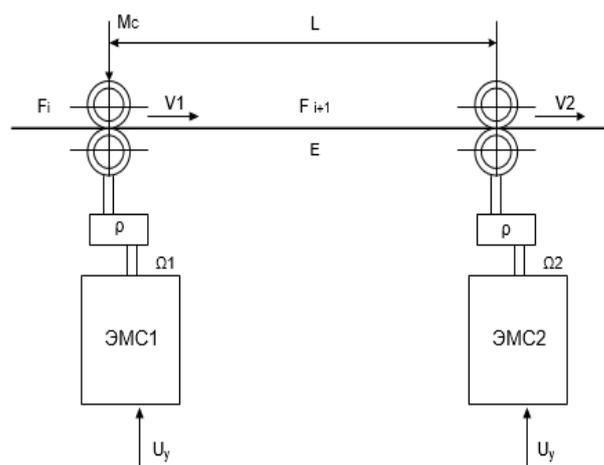


Рис. 3. Структурные схемы: а – локальной зоны технологического агрегата; б – двухдвигательной ЭМС с зоной деформации

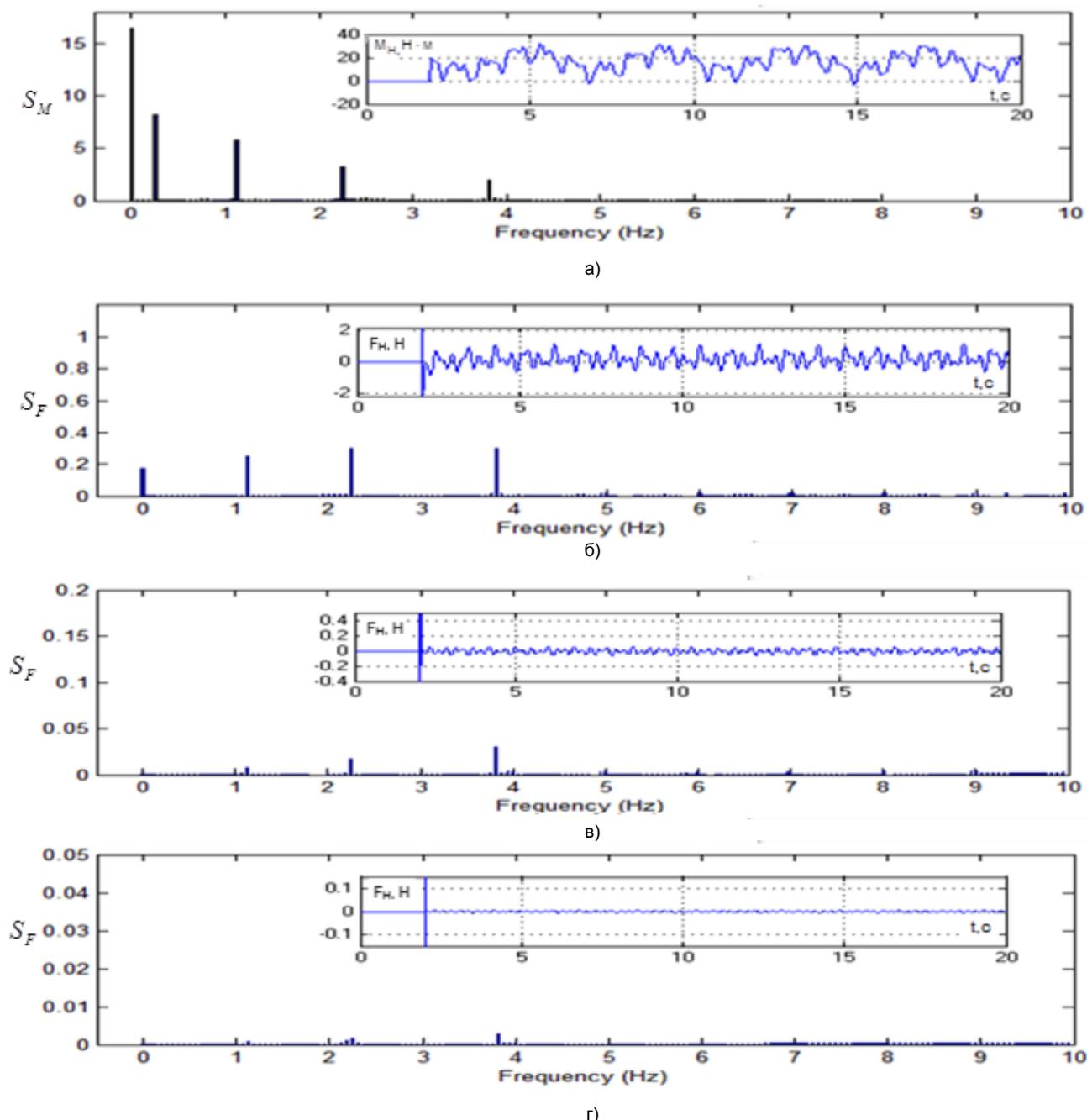


Рис. 4. Графики и спектры: а – сложного возмущения момента нагрузки; б – натяжения в ЭМС на базе статической системы ПРМВ-(ПР)б; в – астатической с единой моделью возмущения – ПРМВ-(ПР)б; г – астатической с разделенной МВ – ПР_и-(ПРМВ_к)б

Применение принципа разделения модели гармонического возмущения момента нагрузки ЭД на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в состав «быстрой» внутренней подсистемы создает новые возможности для улучшения показателей качества селективно-инвариантных ЭМС различных исполнений – удастся в значительной степени улучшить обработку возмущений несинусоидального периодического характера (рис. 4,г).

Следует отметить, что селективно-инвариантные ЭМС имеют дополнительные резервы повышения качества обработки возмущений по моменту нагрузки, которые могут

быть использованы при адаптивной перестройке параметров МВ в соответствии с изменениями рабочей скорости электропривода.

Список литературы

1. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Селезнева В.В. Вибродиагностика станков по результатам обработки // Надежность и диагностирование технологического оборудования: сб. статей / ИНМАШ АН СССР. – М.: Наука, 1987.
3. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.

4. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985.

5. Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В. Компенсация гармонических возмущений момента нагрузки в следящих электромеханических системах и элементы структурной оптимизации регуляторов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 44–51.

6. 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.

7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979.

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

References

1. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannye elektropriivody* [Automatic electric drives]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otделение, 1985.

2. Selezneva, V.V. *Vibrodiagnostika stankov po rezul'tatam obrabotki* [Vibration-based diagnostics of machines according to processing results]. *Sbornik statey «Nadezhnost' i diag-nostirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya»* [Col-

lected articles «Reliability and diagnostics of manufacturing equipment»]. Moscow, Nauka, 1987.

3. Gudvin, G.K., Grebe, S.F., Sal'gado, M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Control system design]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004.

4. Voronov, A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh system* [Introduction into dynamics of complex controlled systems]. Moscow, Nauka, 1985.

5. Kopylova, L.G., Tararykin, S.V. *Kompensatsiya gar-monicheskikh vozmushcheniy momenta nagruzki v sledyashchikh elektromekhanicheskikh sistemakh i elementy strukturalnoy optimizatsii regulyatorov* [Compensation of load torque harmonic disturbances in the follow-up electromechanical systems and elements of control structural optimization]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 44–51.

6. Tararykin, S.V., Kopylova, L.G., Tikhomirova, I.A. *Strukturalno-parametricheskii sintez i optimizatsiya regulyatorov selektivno-invariantnykh elektromekhanicheskikh sistem s garmonicheskim momentom nagruzki* [Structural-parametric synthesis and control devices optimization of selective-invariant electromechanical systems with harmonic load torque]. *Elektrotekhnika*, 2015, no. 5.

7. Chilikin, M.G., Klyuchev, V.I., Sandler, A.S. *Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Theory of automatic electric drive]. Moscow, Energiya, 1979.

8. 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 language]. Saint-Petersburg, Nauka, 1999.

Тихомирова Ирина Александровна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры электроники и микропроцессорных систем, e-mail: 3kitti4@gmail.com

Копылова Лариса Геннадьевна,

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

Тарарыкин Сергей Вячеславович,

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

