

УДК 625.083

Компенсация гармонических возмущений момента нагрузки в следящих электромеханических системах и элементы структурной оптимизации регуляторов

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Особенностью электромеханических систем является полигармонический состав момента нагрузки. Флуктуации момента нагрузки и, следовательно, скорости исполнительного механизма вызывают существенные изменения качественных показателей готовой продукции. В электромеханических системах традиционных структур значительное снижение уровня пульсаций скорости путем повышения коэффициента петлевого усиления следящей системы может приводить к существенному ухудшению качества отработки управляющего воздействия и сокращению размеров линейной зоны работы системы.

Материалы и методы: Одновременное обеспечение требований отработки управляющего воздействия и компенсации гармонического возмущения реализовано сочетанием принципа внутренней модели возмущения с другими принципами построения систем автоматического управления, такими как каскадное регулирование, подчиненное регулирование с последовательной коррекцией, регулирование состояния, полиномиальное регулирование по выходу, разделение темпов движения.

Результаты: Выполнена сравнительная оценка эффективности работы управляющих устройств, синтезированных сочетанием различных методов, по следующим факторам: качество отработки гармонических возмущений по моменту нагрузки, диапазон возможных вариаций момента инерции механической части, уровень пульсаций выходного сигнала скорости при наложении помехи в канале его измерения, максимальное значение времени задержки сигналов в силовом преобразователе, при котором система сохраняет устойчивость, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов.

Выводы: Полученные результаты позволяют наглядно показать, как перераспределяются акценты на определенные критерии качества, наиболее важные для проектировщика, при использовании того или иного сочетания принципов построения систем. Это дает возможность делать обоснованный выбор наиболее эффективного структурного решения.

Ключевые слова: электромеханическая система, компенсация возмущений, принцип внутренней модели, структурная оптимизация регуляторов, селективная инвариантность.

Compensation of Load Torque Harmonic Disturbances in Following Electromechanical Systems and Elements of Control Structural Optimization

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

Abstract

Background: Polyharmonic load torque is a main feature of electromechanical systems. Load torque fluctuations and, hence, executive device speed fluctuations cause significant changes of the finished product quality measures. In electromechanical systems, which have conventional structures, considerable decrease in speed pulsations level by increasing the loop gain of the follow-up system can cause significant deterioration of control response quality and reduction of linear range of system operation.

Materials and methods: Simultaneous requirements satisfaction of control response and harmonic disturbance compensation are implemented by combining the principle of disturbance internal model with other principles of automatic control system design. These principles are cascade control, subordinate control with series correction, state control, polynomial output control, motion rates separation.

Results: Comparative assessment of operating efficiency of control devices, synthesized by the combination of listed methods, is implemented. Assessment factors are response quality of load torque harmonic disturbances, acceptable variations range of inertia moment of system mechanical part, pulsations level of output speed signal when the noise is on its measuring channel, maximum value of signals time delay in power converter when the system is stable and the total degree of regulator dynamic blocks as well.

Conclusions: The obtained results enable to demonstrate the way the appointed quality factors are underlined when designer uses the combination of different principles of the system design. It allows to make the proper choice of the most efficient control structure.

Key words: electromechanical system, disturbance compensation, internal model principle, control structural optimization, selective invariance.

Введение. Характерной особенностью роторных электромеханических систем (ЭМС) является полигармонический состав момента нагрузки электродвигателя (рис. 1), определяемый погрешностями изготовления, сборки и монтажа вращающихся механических элементов и выражающийся детерминированной функцией времени общего вида [1]

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

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

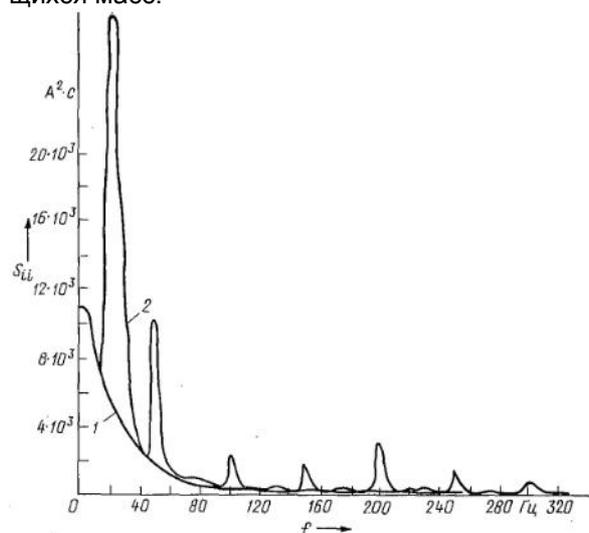


Рис. 1. Спектрограмма тока якоря в электроприводе: 1 – случайная составляющая; 2 – случайная и периодическая составляющие

В настоящее время одной из основных тенденций в машиностроении является применение индивидуальных приводных устройств технологических машин и существенное упрощение кинематических передач между электродвигателем и главным рабочим органом (РО). При этом РО, имеющий значительные габаритные размеры, становится основным элементом механической части ЭМС, а наличие погрешностей его изготовления, сборки и монтажа, а также конструктивные особенно-

сти становятся причиной появления доминирующих гармонических возмущений момента нагрузки с частотой, равной или кратной его частоте вращения.

Поэтому в первом приближении момент нагрузки индивидуального электропривода можно выразить формулой

$$M_i = M_0 + M_1 \sin(\Omega_1 t + \varphi_0),$$

где M_1 , φ_0 , Ω_1 – амплитуда колебаний момента, начальный угол и угловая скорость РО соответственно.

Флуктуации момента нагрузки и, как следствие, скорости РО могут существенно повлиять на качественные показатели готовой продукции: точность изготовления деталей, геометрические размеры изделий (диаметр волокна или провода, толщина пленки и различных покрытий), весовые параметры материалов (плотность бумаги, ткани и др.), светопропускание оптических световодов и т.п.

Это подтверждают результаты соответствующих исследований [1–4], выполненных на технологических машинах различных отраслей промышленности методом спектрального анализа координат в разных скоростных режимах. Так, на рис. 2 приведены характерные спектрограммы скоростей рабочих машин технологической линии для производства синтетических пленок, а также спектрограммы натяжений материала F1...4 по ходу его движения в линии [4]. Наличие свойства «памяти» транспортируемого вязкоупругого полотна и технологические воздействия приводят к накоплению и фиксации флуктуаций деформации, что формирует неровноту толщины готового материала на отрезках соответствующей длины и может стать причиной существенного ухудшения его потребительских свойств, а также перерасхода сырья.

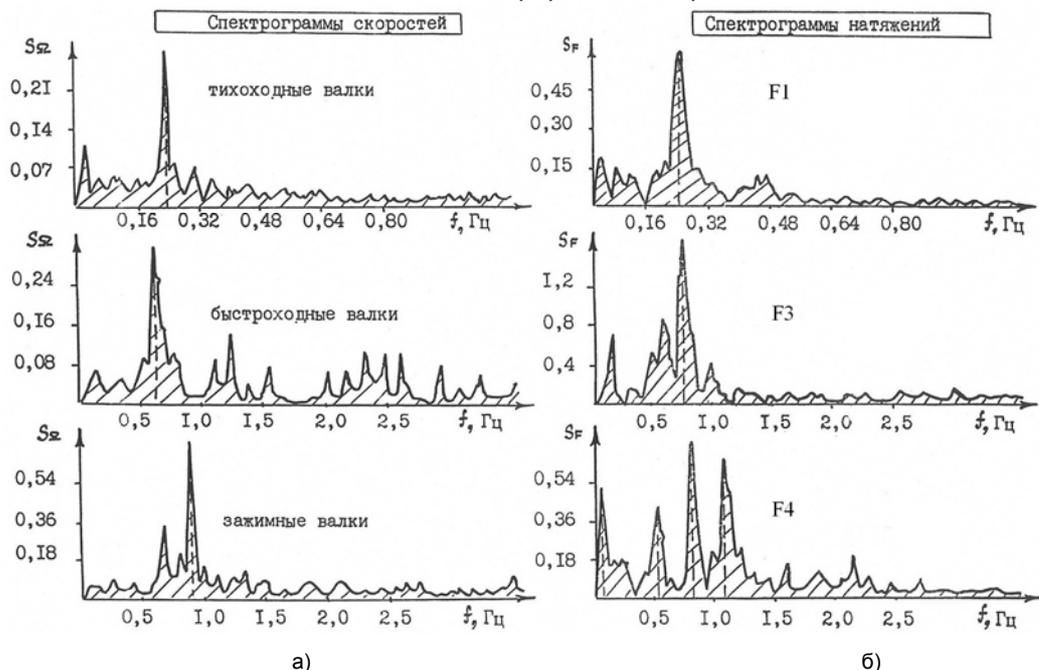


Рис. 2. Спектрограммы скоростей машин и натяжений пленки в зонах деформации поточной линии ПЭТФ-2400 на рабочей скорости 25 м/мин

Очевидно, что уменьшить влияние флуктуаций момента нагрузки можно путем повышения быстродействия (динамической точности) систем регулирования скорости, которые могут строиться как на принципах подчиненного регулирования координат [5], так и на основе использования безынерционных регуляторов состояния (РС) или динамических (полиномиальных) регуляторов (ПР) «входа-выхода» [6].

Однако значительное снижение уровня пульсаций скорости путем повышения коэффициента петлевого усиления следящей ЭМС может привести к существенному ухудшению качества отработки управляющего воздействия или повышению токовых форсировок и соответствующему сокращению размеров линейной зоны работы системы.

Проиллюстрируем это на примерах ЭМС постоянного тока, структурные схемы которых приведены на рис. 3, где использованы следующие обозначения величин: Ω_3 – заданное значение скорости; U_y, U – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя; I_a – ток якорной цепи электродвигателя; Ω – угловая скорость вала электродвигателя; M_H – момент нагрузки (статического сопротивления). Приняты также следующие обозначения параметров объекта: $K_{СП}$ и $T_{СП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя напряжения; R_a и T_a – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи; C – конструктивная постоянная двигателя; J – суммарный момент инерции ротора двигателя и рабочего органа; i – передаточное отношение редуктора; РТ и РСк – регуляторы тока и скорости соответственно. Для конкретности приняты следующие значения параметров объекта: $K_{СП} = 22$, $T_{СП} = 0,001$ с, $R_a = 0,177$ Ом, $T_a = 0,02$ с, $C = 1,37$ Вб, $J = 0,2$ кг·м², $i = 10$.

Пусть требуется обеспечить время нарастания переходной характеристики системы в линейной зоне ее работы не более 50 мс при отсутствии перерегулирования по скорости и эффективную компенсацию гармонической составляющей момента сопротивления вида

$$M_i = 8,22 \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{i} t\right).$$

Система подчиненного регулирования координат будет содержать внутренний контур тока и внешний контур скорости, настроенные соответственно на модульный и симметричный «оптимумы» регуляторами с передаточными функциями (ПФ) вида

$$H_{D0}(s) = 0,268 \frac{0,02s + 1}{0,02s};$$

$$H_{DН}(s) = 12.$$

Соответствующие переходные характеристики ЭМС в линейной зоне ее работы, полученные моделированием средствами программного комплекса MATLAB, приведены на рис. 4 (графики 1).

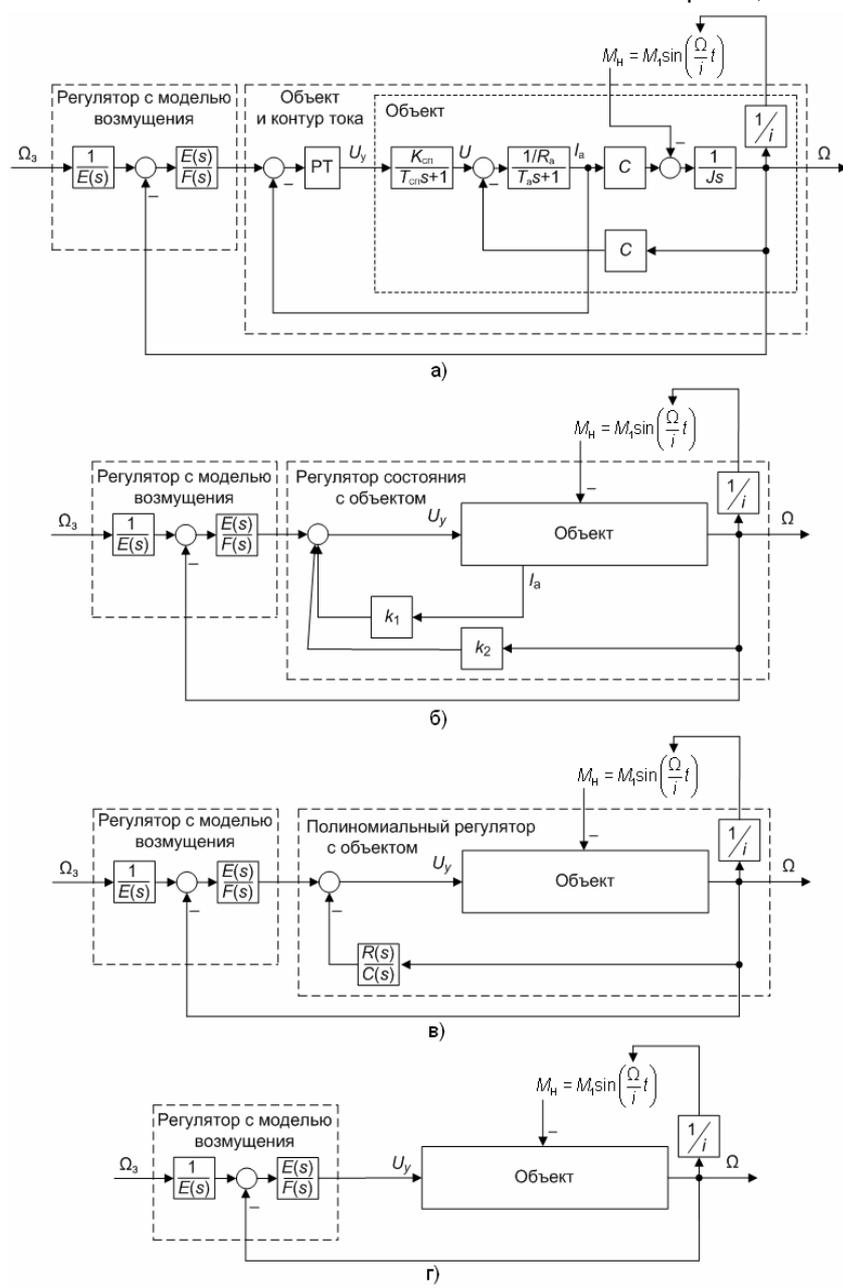


Рис. 3. Структурные схемы объекта управления и различных вариантов ЭМС: а – для случая использования каскадного регулятора (КР), реализующего подчиненное регулирование тока и скорости; б, в (в правой внутренней части) – для использования РС и ПР соответственно

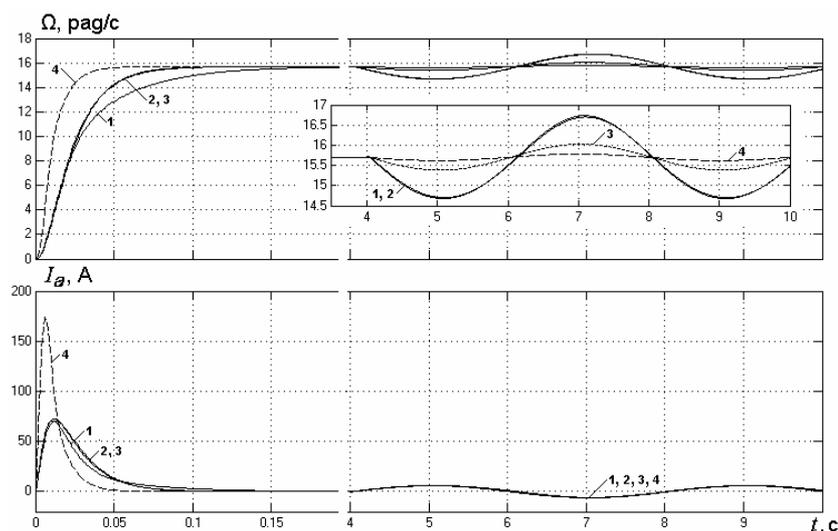


Рис. 4. Переходные процессы по скорости и току исходных вариантов ЭМС

Здесь и далее гармоническое возмущение момента нагрузки прикладывается к валу двигателя в момент $t = 4$ с.

Пренебрегая величиной относительно малой постоянной времени $T_{сп}$ для исключения дестабилизирующей положительной обратной связи [7], синтезируем методом модального управления (МУ) регулятор состояния второго порядка (рис. 3,б) с матрицей коэффициентов обратных связей по току и скорости ЭД:

$$\mathbf{K} = [-0,0177 \quad -0,088].$$

Коэффициенты обратных связей обеспечивают кратное значение полюсов системы на уровне $\Omega_0 = 80 \text{ с}^{-1}$, соответствующих характеристическому полиному Ньютона и реализующих выполнение заданных требований к ее работе в линейной зоне.

Переходные процессы синтезированной ЭМС, полученные в описанных выше условиях, приведены на рис. 4 (графики 2).

Аналогичный по качеству отработки управляющего воздействия результат получаем путем синтеза методами МУ [7] дифференцирующего полиномиального регулятора минимального порядка (рис. 3,в) с полиномами вида

$$R(s) = 0,0026s + 0,088; \quad c(s) = 1,$$

являющимися решением основного уравнения синтеза

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s), \quad (1)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – соответственно характеристический полином и полином воздействия передаточной функции объекта управления (ОУ), в нашем случае

$$H_i \phi(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{42570,6}{s^2 + 50s + 2651}. \quad (2)$$

Для технической реализуемости управляющего устройства в знаменатель его ПФ добавляем полином 1-го порядка с малой постоянной времени. В этом случае передаточная функция ПР принимает вид

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0026s + 0,088}{0,0005s + 1}.$$

Соответствующие переходные процессы ЭМС с ПР показаны на рис. 4 (графики 3). В данном случае для ЭМС с ПР удается в большей степени уменьшить амплитуду колебаний скорости от синусоидальной составляющей момента нагрузки по сравнению с ЭМС на базе РС и КР.

Кроме того, за счет действия производных от скорости Ω удается дополнительно повысить петлевое усиление ЭМС и снизить пульсации выходной координаты (рис. 4, графики 4). Но токовые форсировки двигателя при этом существенно возрастают, и линейная зона работы системы соответственно сокращается. К тому же значительно снижается помехоустойчивость синтезированной системы автоматического управления (САУ).

Таким образом, в ЭМС традиционных структур попытки компенсации гармонического возмущения момента нагрузки приводят к потере других составляющих качества.

В настоящее время разработано много методов и подходов к решению задачи компенсации внешних возмущений [3, 8–11]. Наиболее рациональная (избирательная) компенсация гармонического воздействия определенной частоты в установившемся режиме работы ЭМС может быть обеспечена при использовании принципа внутренней модели [3, 9–11], согласно которому полином, формирующий математическую модель возмущения

$$F(s) = s^2 + \Omega_1^2,$$

где s – комплексная переменная Лапласа; $\Omega_1 = \Omega/i$ – угловая скорость РО, вводится множителем в знаменатель передаточной функции регулятора, а искажение передаточной функции ЭМС по управлению устраняется соответствующим внеконтурным формирователем. При этом выходной сигнал регулятора будет содержать гармоническую составляющую, которая благодаря действию отрицательной обрат-

ной связи обеспечит противофазную компенсацию возмущения.

Очевидно, что одновременное обеспечение требований отработки управляющего воздействия и компенсации гармонического возмущения, а также удовлетворение дополнительными критериями качества можно реализовать сочетанием различных принципов и приемов построения САУ.

Постановка задачи. Примем в качестве основных критериев качества следящих ЭМС отработку сигнала задания скорости и гармонического возмущения момента нагрузки и назовем дополнительными показателями качества чувствительность к вариациям параметров механической части, помехоустойчивость системы, а также предельную по условию устойчивости задержку сигнала силового преобразователя и степень сложности регулятора, определяемую общим порядком его динамических звеньев.

В этих условиях выполним синтез и дадим комплексную оценку различных структурных решений ЭМС, построенных на основе сочетания принципа внутренней модели возмущения (МВ) или селективной инвариантности с другими принципами построения САУ:

- каскадным регулированием (КР);
- подчиненным регулированием с последовательной коррекцией (П);
- регулированием состояния (РС);
- регулированием состояния по выходу или полиномиальным регулированием (ПР);
- разделением темпов движения (РД).

На основе полученных результатов предлагается выработать общие рекомендации по

структурной оптимизации ЭМС в соответствии с заданным комплексом технических требований.

Построение ЭМС на основе сочетания принципа внутренней модели возмущения с другими принципами синтеза САУ. Одним из возможных решений, способных удовлетворить основным требованиям к управлению, является объединенная структура (рис. 3,а), совмещающая каскадный регулятор КР с моделью возмущения МВ и обозначаемая далее как О(КРМВ). При этом МВ включается в состав регулятора скорости (РСк) аналогично введению интегрирующего элемента для компенсации влияния постоянного по величине нагрузочного момента. Настройка замкнутого контура тока сохраняется, размерность его передаточной функции (ПФ) сокращается до 1-го порядка, и с учетом инерции механической части для такого объекта с ПФ

$$H_{\text{Д.Н.Э}}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{11416,7}{s^2 + 166,67s}$$

по правилам полиномиального модального управления и уравнению

$$A(s)F(s) + B(s)E(s) = D(s), \quad (3)$$

при $\Omega_0 = 180 \text{ с}^{-1}$ для ХП Ньютона формируется структура и определяются параметры РСк, приведенные в табл. 1. Внеконтурная часть регулятора (рис. 3,а, пунктир) обеспечивает компенсацию влияния нуля ПФ РСк.

Такая ЭМС при значительном усложнении регулятора может обеспечить достаточно высокие значения как основных, так и дополнительных критериев качества в случае жесткой (одномассовой) механической части, но будет терять свою эффективность при увеличении упругости кинематических передач между двигателем и РО.

Таблица 1

№ САУ	Тип САУ	Используемые принципы управления	Структура и параметры регулятора
1	О(КРМВ)	КР, МВ	$H_{\text{ДО}}(s) = 0,268 \frac{0,02s + 1}{0,02s}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{17,7s^3 + 5108s^2 + 459721s + 16550912}{(s^2 + 2,465)(s + 733)}$
2	ПРМВ-(РС)б	РС, РД, ПР, МВ	$K = [-0,177 \quad -7,7]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{10,2s + 407,5}{s^2 + 2,465}$
3	ПРМВ-(ПР)б	ПР, РД, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0258s + 7,7}{0,00005s + 1}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{10,2s + 407,5}{s^2 + 2,465}$
4	П(ПРМВ-РС)	П, РС, ПР, МВ	$K = [-0,056 \quad -0,88]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,143s^2 + 24,76s + 990,4}{s^2 + 2,465}$
5	П(ПРМВ-ПР)	П, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0082s + 0,877}{0,00005s + 1}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,143s^2 + 24,76s + 990,4}{s^2 + 2,465}$
6	К(ПРМВ-РС)	КР, РС, ПР, МВ	$K = [-0,089 \quad -2,05]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,057s^2 + 317,086s + 11886,8}{s^2 + 2,465}$
7	К(ПРМВ-ПР)	КР, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0129s + 2,052}{0,00005s + 1}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,057s^2 + 317,086s + 11886,8}{s^2 + 2,465}$
8	О(ПРМВ)	ПР, МВ	$\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{6,55^3 + 1317s^2 + 123293,7s + 4438538,5}{(s^2 + 2,465)(s + 850)}$

В этом отношении гораздо большими возможностями обладают структуры, реализующие принципы регулирования состояния ОУ.

Вариант структуры ЭМС (рис. 3,б), обозначаемый далее как ПРМВ-(РС)б, содержит внутренний безынерционный РС, настраиваемый на высокое быстродействие, значительно (в 3–5 раз) превосходящее заданные динамические требования к САУ. В данном случае это разделение темпов движения обеспечивается выбором значения $\Omega_0 = 575 \text{ с}^{-1}$ для внутренней подсистемы, что позволяет считать ее безынерционным ОУ (для нашего случая $A(s) = 1$, $B(s) = 15,7$) при синтезе по уравнению (3) внешнего ПР с моделью возмущения, общая размерность которого (с учетом внеконтурной части) снижается до уровня 3 (табл. 1).

Такая структура, использующая четыре из указанных выше принципов управления, способна обеспечить достаточно полное удовлетворение основным требованиям при невысокой сложности динамической части регулятора. Но она, очевидно, будет обладать повышенной чувствительностью к неидеальностям элементов быстрой подсистемы, в частности к неучтенному при синтезе запаздыванию сигналов в силовом преобразователе (СП).

При затруднениях в измерении всех координат состояния ОУ принцип РД может быть реализован быстродействующим внутренним (ПР)б «входа-выхода» (рис. 3,в), синтезированным по уравнению (1) при $\Omega_0 = 575 \text{ с}^{-1}$, и внешним ПР, совмещенным с моделью возмущения, синтезируемым по уравнению (3) в предположении безынерционного характера быстрой подсистемы как объекта управления ($A(s) = 1$, $B(s) = 15,7$).

Очевидно, что «платой» за использование высших производных скорости в такой ЭМС, обозначаемой далее как ПРМВ-(ПР)б (табл. 1), будет снижение помехоустойчивости системы и усложнение динамической части регулятора.

Снижение чувствительности ЭМС к воздействию помех в измерительных каналах можно обеспечить за счет более «медленной» настройки внутренней подсистемы регулирования скорости с РС и ПР (рис. 3,б,в) и использования принципа последовательной коррекции. При этом умеренно (в 2–2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется аperiodическим звеном 1-го порядка, после чего осуществляется формирование внешнего ПР, содержащего модель возмущения. В данном случае для синтеза внутренней подсистемы на базе РС или ПР принималось значение $\Omega_0 = 80 \text{ с}^{-1}$, что при решении уравнения (3) позволяло представлять ее передаточной функцией

$$H_{\text{НДН}}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{15,7}{0,009s + 1}.$$

Полученные выражения и параметры полиномов регуляторов обоих вариантов ЭМС, обозначенных соответственно как П(ПРМВ-РС) и П(ПРМВ-ПР), приведены в табл. 1.

Своеобразной «платой» за повышение помехоустойчивости этих систем будет, очевидно, увеличение их чувствительности к вариациям внутренних параметров, вызванное погрешностями аппроксимации внутренних подсистем звеньями более низкого порядка.

Определенный компромисс между чувствительностью к помехам и параметрическим возмущениям при сохранении степени сложности регуляторов могут обеспечить аналогичные структуры, обозначенные как К(ПРМВ-РС) и К(ПРМВ-ПР), строящиеся по тому же каскадному принципу (рис. 3,б,в), но без аппроксимации и понижения порядка внутренней подсистемы регулирования скорости.

При этом синтез проводится в два этапа в направлении от внешнего контура к внутреннему. На первом этапе составляется уравнение (3), в правую часть которого записывается желаемый полином со значением $\Omega_0 = 150 \text{ с}^{-1}$, соответствующим заданному быстродействию системы в 50 мс. Полином $B(s)$ – это числитель исходной ПФ (2) ОУ. Определению подлежит полином $E(s)$ регулятора с моделью возмущения, а также величина СГК полинома $A(s)$, выступающего в данном случае в качестве желаемого полинома (с распределением корней по Ньютону) внутренней системы регулирования скорости, быстродействие которой будет оптимальным образом соответствовать быстродействию внешнего контура при их каскадном включении. Для рассматриваемой системы получаем уравнение

$$(s + \Omega_0)^2 (s^2 + 2,465) + 42570,6(e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 150)^4,$$

откуда одновременно находим коэффициенты полинома $E(s)$ (табл. 1) и значение СГК ХП внутренней подсистемы $\Omega_0 = 300 \text{ с}^{-1}$. Следует отметить, что при этом быстродействие внутренней подсистемы оказывается ниже, чем у таковой в ЭМС ПРМВ-(РС)б и ПРМВ-(ПР)б, но выше, чем у таковой в ЭМС П(ПРМВ-РС) и П(ПРМВ-ПР).

На втором этапе синтеза по известному желаемому полиному внутренней системы регулирования скорости рассчитываются коэффициенты безынерционного регулятора состояния (табл. 1) для структуры рис. 3,б или полиномиальный регулятор «входа-выхода», если речь идет о схеме рис. 3,в.

Применительно к структуре К(ПРМВ-ПР), например, следует составить уравнение синтеза (1), где $B(s)$ и $A(s)$ – числитель и знаменатель исходной ПФ (2) ОУ, а $D(s)$ – желаемый ХП с вычисленным значением СГК $\Omega_0 = 300 \text{ с}^{-1}$. Затем определяются полиномы $R(s)$ и $C(s)$ внутреннего ПР (табл. 1).

Наиболее простым структурным решением поставленной задачи, требующим измерения лишь выходной координаты ОУ, является ЭМС, представленная на схеме рис. 3,г, имеющая только один регулятор, объединяющий ПР и МВ, и обозначаемая, соответственно, как О(ПРМВ). В

ней отсутствуют внутренние подсистемы, а синтез объединенного регулятора осуществляется непосредственно по уравнению (3) с использованием ПФ (2) исходного объекта, что обеспечивает более полный учет его особенностей и способствует повышению помехоустойчивости и параметрической грубости системы.

Информация о структуре и параметрах регуляторов каждого из перечисленных типов ЭМС с указанием принципов, заложенных в основу их построения, представлена в табл. 1.

Очевидно, что каждый из синтезированных вариантов ЭМС будет обладать своими отличительными особенностями, обусловленными не только конкретикой управления определенным объектом, но и общими закономерностями применения тех или иных принципов управления электромеханическими объектами.

Сравнительный анализ показателей качества управления синтезированными ЭМС. Анализ выполнялся путем проведения детализи-

рованных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных ЭМС средствами программного комплекса *MATLAB*.

Была принята следующая методика исследований.

На 1-м этапе рассчитывались переходные характеристики всех вариантов ЭМС и оценивались переходные процессы при обработке гармонических возмущений по моменту нагрузки. При этом одинаковый характер переходных характеристик и их соответствие полученным ранее графикам (рис. 1) свидетельствовали об отсутствии ошибок в процессе синтеза регуляторов, а полная компенсация возмущения (фактор $M \sim$) с заданным темпом (50 мс) подтверждала достижение селективной инвариантности за счет реализации принципа внутренней модели возмущения. Наиболее характерные графики компенсации возмущений приведены на рис. 5, где номер кривой соответствует порядковому номеру ЭМС в табл. 1.

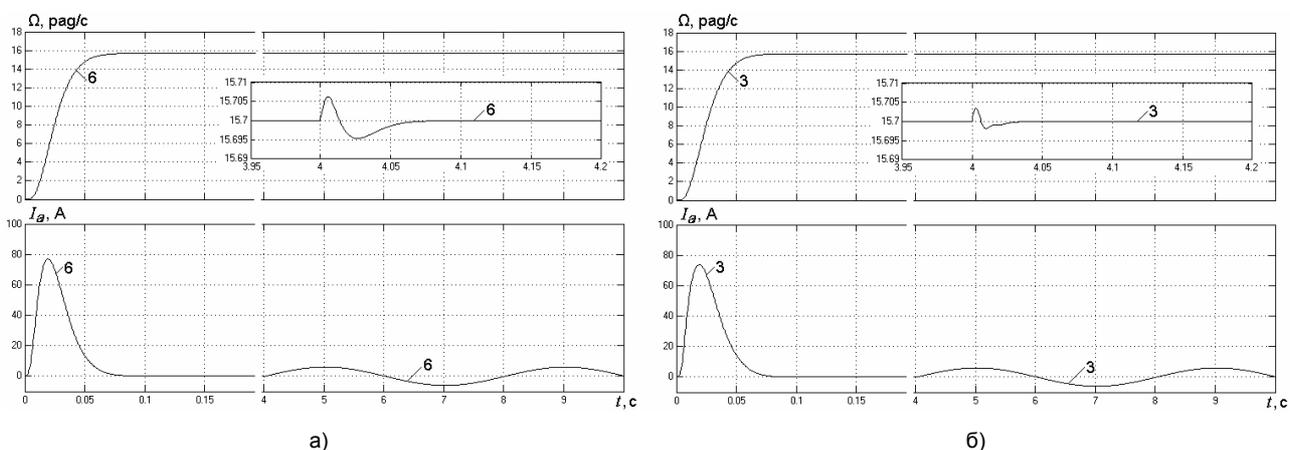


Рис. 5. Обработка гармонического момента нагрузки: оценка качества процессов: а – 1 балл; б – 5 баллов

На 2-м этапе исследований выполнялась оценка степени удовлетворения дополнительным критериям качества.

Оценивался уровень пульсаций выходного сигнала скорости при наложении аддитивной по-

мехи в виде «белого шума» с мощностью $N = 0,00001 \text{ Вт/м}^2$ в канале ее измерения. Наиболее характерные графики скоростей различных типов ЭМС в соответствии с принятой нумерацией приведены на рис. 6.

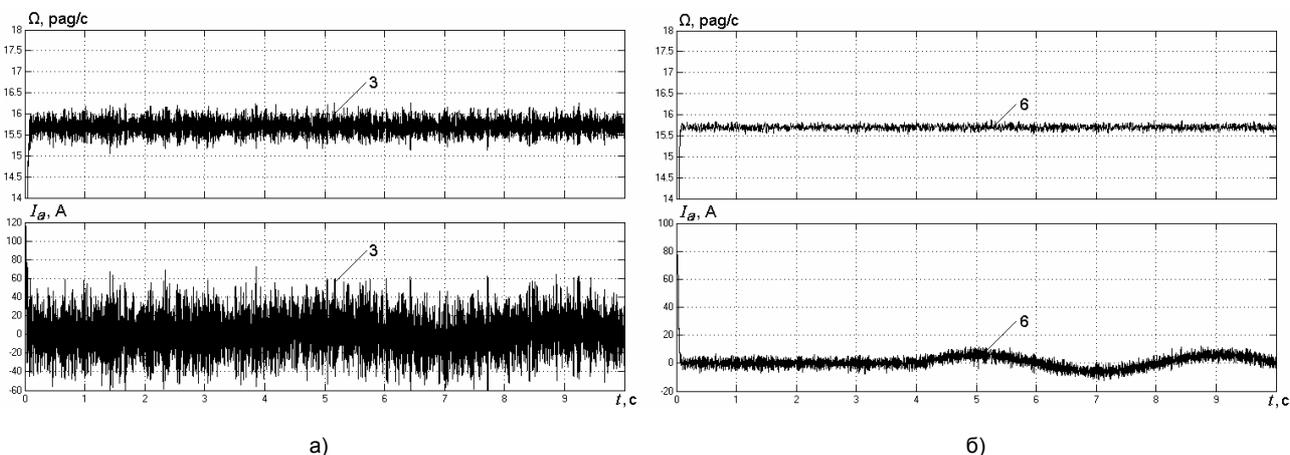


Рис. 6. Реакция системы на введение помехи в цепи измерителя скорости: оценка качества процессов: а – 1 балл; б – 5 баллов

Затем путем проведения многократных вычислительных экспериментов с моделями ЭМС оценивались диапазоны возможных вариаций момента инерции механической части (фактор $J = \text{var}$) и максимальное значение времени задержки сигналов (τ_{max}) в СП, представляемым звеном «чистого» запаздывания (фактор $e^{-\tau s}$), при которых система сохраняет устойчивость. Полученные значения указанных факторов, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) синтезированных ЭМС приведены в табл. 2.

Результаты исследований в виде графиков переходных процессов и числовых значений указанных факторов оценивались по традиционной 5-балльной шкале экспертным методом и сводились в итоговую таблицу (табл. 3). Там же вычислялась суммарная оценка качества каждой ЭМС (Q_{Σ}) при условии одинаковой значимости дополнительных факторов (критериев) и двукратного повышения значимости основного фактора ($M\sim$).

Следует отметить, что в работе не проводился сравнительный анализ вариантов ЭМС в широком диапазоне изменения скоростей и частот гармонического возмущения момента, а также при отклонениях его формы от синусоидальной, поскольку принята единая настройка ВМ

предполагала сходную реакцию всех систем на действие указанных факторов.

Полученные в ходе исследования числовые значения основных, дополнительных и суммарного критериев (табл. 3) позволяют проектировщикам делать обоснованный выбор того структурного решения ЭМС, которое в наиболее полной мере соответствует комплексу требований исходного технического задания на создание системы.

Заключение

Принятая методика исследований и полученные результаты позволяют достаточно наглядно показать, как перераспределяются акценты на определенные критерии качества, наиболее важные для проектировщика, при использовании того или иного сочетания принципов построения САУ.

Они могут служить основой для реализации структурного оптимизационного подхода к синтезу следящих ЭМС высокой точности по той или иной схеме компромиссов, в наибольшей мере соответствующей требованиям ТЗ и обеспечивающей эффективную компенсацию гармонических возмущений момента нагрузки.

Таблица 2

№ САУ	Тип САУ	Факторы качества ЭМС		
		$J = \text{var}$, кг·м ²	$e^{-\tau s}$, $\tau = \text{var}$, мс	$N_{\text{рег}}$
1	О(КРМВ)	[0,058; 0,9]	2,1	7
2	ПРМВ-(РС)б	[0,064; 1,0]	1,2	3
3	ПРМВ-(ПР)б	[0,13; 0,9]	0,85	4
4	П(ПРМВ-РС)	[0,09; 0,95]	1,95	4
5	П(ПРМВ-ПР)	[0,047; 0,49]	1,6	5
6	К(ПРМВ-РС)	[0,051; 0,83]	2,15	4
7	К(ПРМВ-ПР)	[0,054; 0,98]	1,65	5
8	О(ПРМВ)	[0,053; 0,56]	2,2	6

Таблица 3

№ САУ	Тип САУ	Оценки факторов качества ЭМС					
		$M\sim$	$J = \text{var}$	$P\sim$	$e^{-\tau s}$	Сложность СУ	Q_{Σ}
1	О(КРМВ)	2	4	5	4	1	18
2	ПРМВ-(РС)б	4	5	4	2	5	23
3	ПРМВ-(ПР)б	5	1	1	1	4	17
4	П(ПРМВ-РС)	2	3	5	4	4	20
5	П(ПРМВ-ПР)	3	2	4	3	3	18
6	К(ПРМВ-РС)	1	4	5	5	4	20
7	К(ПРМВ-ПР)	4	5	4	3	3	23
8	О(ПРМВ)	1	3	5	5	2	17

Выполненное для конкретного ОУ исследование носит, тем не менее, общий характер, поскольку в значительной мере отражает и иллюстрирует общие закономерности синтеза следящих ЭМС по принципу селективной инвариантности, которые, очевидно, будут проявляться и при управлении более сложными упругомассовыми ЭМС.

Проблема усовершенствования структурных решений ЭМС в условиях значительных изменений уровней рабочих скоростей и несинусоидального характера пульсаций момента нагрузки требует отдельного самостоятельного рассмотрения.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ «Молодые российские ученые – кандидаты наук. Конкурс МК-2012. Область знаний – технические и инженерные науки» (МК – 4250.2012.8)

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. ст. / 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. 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.
5. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979.
6. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985.
7. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. – Иваново, 2000.
8. Зайцева М.В., Паршева Е.А. Робастное управление линейным объектом при наличии возмущений и помех // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 3.
9. 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.

Копылова Лариса Геннадьевна,

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

10. Гайдук А.Р. Основы теории систем автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Учебная литература, 2005.

11. 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 elektroprivody* [Automatic electric drives]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985.
2. Selezneva, V.V. *Vibrodiagnostika stankov po rezul'tatam obrabotki* [Vibration-based diagnostics of machines according to processing results]. *Nadezhnost' i diagnostirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya: sbornik statey*. INMASH ANSSSR [Reliability and diagnostics of manufacturing equipment: Collected articles]. 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. Tararykin, S.V. *Printsipy upravlyaemoy sinkhronizatsii mashin v tekhnologicheskikh agregatakh dlya proizvodstva lentochnykh i volokonnykh materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Principles of controlled machines synchronization in technological aggregates for tape and fiber materials production. Dr. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 1992.
5. Chilikin, M.G., Klyuchev, V.I., Sandler, A.S. *Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theory of automatic electric drives: Tutorial for institute of higher education]. Moscow, Energiya, 1979.
6. Voronov, A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh system* [Introduction on dynamics of complex controlled systems]. Moscow, Nauka, 1985.
7. Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Sistemy koordiniruyushchego upravleniya vzaimosvyazannymi elektroprivodami* [Systems of coordinated control for interconnected electric drives]. Ivanovo, 2000.
8. Zaytseva, M.V., Parsheva, E.A. *Robastnoe upravlenie lineynym ob'ektom pri nalichii vozmushcheniy i pomekh* [Robust control of linear object under disturbances and noises]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2011, no. 3.
9. Kulebakin, V.S. *Ob osnovnykh zadachakh i metodakh povysheniya kachestva avtomaticheskogo regulirovaniya system* [Main problems and methods of quality increasing automatic control systems]. *Trudy II Vsesoyuznogo soveshchaniya po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya* [Proceedings of II all-USSR meeting on automation control theory]. Moscow, Nauka, 1965, vol. II.
10. Gaiduk, A.R. *Osnovy teorii sistem avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Basics of automation control systems theory: tutorial]. Moscow: Uchebno-metodicheskiy i izdatel'skiy tsentr UCHEBNAYA LITERATURA, 2005.
11. Andrievskiy, B.R., Fradkov, A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automation control theory with examples on MATLAB language]. Saint-Petersburg, Nauka, 1999.