

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА КОНТУРА ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ В АСТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

КОПЫЛОВА Л.Г., асп., ТАРАРЫКИН С.В., д-р техн. наук

Проведен сравнительный анализ астатических систем управления электромеханическими объектами с жесткими и упругими связями в режимах ограничения тока. Выявлены особенности управления упругомассовыми системами, построенными на базе регуляторов состояния. Предложены способы повышения качества процессов управления такими системами в переходных режимах.

Ключевые слова: регуляторы состояния, системы электропривода, переходные процессы, интегратор, контур токовой отсечки.

SYNTHESIS FEATURES OF CURRENT CUTOFF CONTOUR IN ASTATIC ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

L.G. KOPYLOVA, Post Graduate Student, S.V. TARARYKIN, Doctor of Engineering

The article speaks about the comparative analysis of astatic systems to manage the electromechanical objects with hard and elastic bracings in current limiting. The authors elicit the mass-elastic system management features based on condition regulators. The article suggests the ways to increase the management quality of these systems in transitional regimes.

Key words: condition regulators, electrical drive system, transition, integrator, current cutoff contour.

В условиях интенсивного повышения технологических требований к динамическим и точностным показателям электромеханических систем (ЭМС) наблюдается снижение эффективности работы тех из них, которые построены по принципу подчиненного регулирования координат. Расширить возможности проектируемых динамических систем позволяет использование регуляторов состояния (РС) [1].

Поскольку ЭМС с РС можно отнести к структуре с суммирующим усилителем, то проблема ограничения координат может быть решена с помощью комбинированного управления, основанного на использовании задатчика интенсивности (ЗИ) и контура токовой отсечки (ТО) [2, 3].

Такое решение доказало свою эффективность при работе в статических ЭМС, как в системе электропривода (ЭП) с жесткой механической связью от двигателя к рабочему органу, так и в упругомассовой системе при условии частотной коррекции контура токоограничения последней в целях приближения ее свойств к свойствам «жесткой» системы [4, 5].

Однако существуют системы электропривода для механизмов, требующих очень высокой точности поддержания заданной величины регулируемого параметра при влиянии на систему возмущений (в ЭП это, прежде всего, изменение момента нагрузки на валу исполнительного органа). В подобных системах нередко используют астатическое управление.

Ценность полученных решений [4, 5] будет существенно повышена, если удастся их распространить на более сложные упругомассовые ЭМС с астатическим управлением выходными координатами. В таких системах интегрирующие элементы не только повышают порядок и степень сложности исходной системы, но и привно-

сят в ее работу специфические эффекты накопления и запоминания информации, которые существенно усложняют переходы из режима ограничений координат в основной режим работы системы.

Обращаясь к принципу детального сравнения динамики «жесткой» и «упругой» ЭМС [4, 5], сначала в качестве примера рассмотрим систему управления электроприводом постоянного тока, структурная схема которой приведена на рис. 1,а, где использованы следующие обозначения величин: Ω_3 – заданное значение скорости; U_y , U – управляющее и выходное напряжения силового преобразователя; I_a – ток якорной цепи ЭД; Ω – угловая скорость вращения рабочего органа, жестко связанного с валом ЭД; M_C – момент нагрузки. Для конкретности примем следующие значения параметров объекта: коэффициент передачи $K_{СП} = 22$ и постоянная времени $T_{СП} = 0,008$ с силового преобразователя напряжения; активное сопротивление $R_a = 0,177$ Ом и постоянная времени $T_a = 0,02$ с якорной цепи; конструктивная постоянная двигателя $C = 0,976$ Вб; суммарный момент инерции $J_{\Sigma} = 0,67$ кг·м² жесткой механической части; $k_{1,...,3}$ – коэффициенты обратных связей (ОС) по координатам состояния объекта, определяющие структуру регулятора.

Пусть требуется обеспечить время нарастания переходной характеристики системы в линейной зоне ее работы не более 0,2 с при отсутствии перерегулирования по скорости рабочего органа и отсутствии статической ошибки стабилизации скорости исполнительного элемента, а также обеспечить эффективное ограничение тока электродвигателя на уровне $I_{доп} = 60$ А в режимах его перегрузки.

Попытаемся применить для ограничения координат состояния ЭМС с жесткой кинематической связью между валом двигателя и исполнительным органом (рис. 1,а) комбинированное управление, сочетающее в себе задатчик интенсивности и контур токовой отсечки.

Астатический модальный регулятор состояния, обеспечивающий те же динамические требования, что и в статической «жесткой» системе, за счет распределения полюсов, соответствующего полиному Ньютона со среднегеометрическим корнем $\Omega = 66 \text{ с}^{-1}$, получается в виде

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3] = [0,024 \quad 1,4 \quad 31,7].$$

Рассмотрим взаимное расположение на комплексной плоскости АФЧХ $H_i(j\omega)$ линейной части контура токоограничения астатической «жесткой» системы и характеристики $H(a_i) = -\frac{1}{q(a_i)}$

нелинейного элемента при $K_{TO} = 200$ (рис. 1,б). Характеристики линейной и нелинейной частей системы не имеют точек пересечения. Согласно этому, в контуре ТО достаточно использования только безынерционного звена для обеспечения необходимой точности стабилизации тока при отсутствии колебаний.

Переходные процессы пуска ЭМС (рис. 1,а) с ЗИ первого порядка и нелинейным контуром ТО на скорость, равную половине номинальной, при наличии номинального момента на валу, последующем увеличении момента нагрузки до трехкратного номинального значения (в момент времени $t = 5 \text{ с}$) и дальнейшем уменьшении нагрузки (при $t = 7 \text{ с}$) до значения $I_a = 0,1 \cdot I_{\text{ном}}$ (режим малых токов), полученные моделированием средствами программного комплекса *MATLAB*, показаны на рис. 1,в.

Анализ полученных процессов указывает на то, что при снятии с вала исполнительного органа перегрузочного момента сопротивления ($t = 7 \text{ с}$) в системе наблюдается резкое увеличение скорости, достигающей значения, превышающего номинальную скорость. Подобное поведение системы при выходе из режима перегрузки объясняется тем, что за время работы контура ТО (интервал времени от $t = 5 \text{ с}$ до $t = 7 \text{ с}$) интегратор в главном контуре управления успевает накопить значительный по величине сигнал (в нашем случае достигающий $2,73 \cdot 10^3$ единиц) вследствие подавления контуром ТО на этом отрезке времени работы основного контура регулирования скорости. То есть, в режиме перегрузки снижение скорости приводит к уменьшению сигнала обратной связи, действующей на входе интегратора, и чем продолжительнее перегрузочный режим, тем большее значение выходного сигнала накапливает интегратор.

Следовательно, для правильной работы системы необходимо ограничить сигнал на выходе интегратора. Установим ограничение на уровне 320 единиц, достигаемом при пуске ЭМС на номи-

нальную скорость $\Omega_{\text{НОМ}} = 220 \text{ рад/с}$. При этом запуск ЭМС на номинальную скорость, выполненный в тех же условиях, что и ранее, показывает обеспечение высокого качества процессов управления, аналогично статической системе.

Однако попытка пуска рассматриваемой ЭМС на скорость, равную половине номинальной, при тех же границах «зоны насыщения» на выходе интегратора приводит к существенному ухудшению результата (рис. 1,г), что, впрочем, и следовало ожидать, так как каждый новый уровень скорости достигается за разное время с определенным значением накопленного на интеграторе сигнала. Следует заметить, что вернуть процессам управления желаемое качество при пуске на скорость ниже номинальной можно путем сужения границ «зоны насыщения» на выходе интегратора. В то же время выбор заниженного значения границ «зоны насыщения» в качестве основного (постоянного) приведет к уменьшению возможного диапазона скоростных режимов САУ. Из этого следует, что ограничение сигнала на выходе интегратора должно быть управляемым, соответствующим заданному уровню скорости, что порождает новую проблему реализации адаптивного управления.

Установлено, что активное накопление интегратором информации происходит в период действия контура ТО, когда главная обратная связь основного контура управления становится слабой. В связи с этим усовершенствовать закон регулирования можно путем принудительного прекращения интегрирования на интервалах работы контура ТО размыканием цепи на входе интегратора (рис. 2,а).

Графики процессов пуска ЭМС (рис. 2,а) с модифицированной структурой управляющего устройства на половину номинальной скорости приведены на рис. 2,б. Они подтверждают высокое качество работы системы независимо от заданного уровня скорости.

Попытаемся перенести предлагаемое решение на упругомассовую астатическую ЭМС (рис. 3,а). Значения параметров упругомассового объекта равны значениям одинаковых с ними параметров «жесткого» объекта (рис. 1,а), в добавлении к которым для конкретности примем следующие: моменты инерции $J_1 = 0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $J_2 = 0,56 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ротора двигателя и рабочего органа соответственно; приведенный коэффициент жесткости $C_{12} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ и коэффициент внутреннего вязкого трения $b = 0,22 \text{ Н}\cdot\text{м}$ кинематической передачи.

Векторно-матричное описание системы с упругой механической частью при $X^T = [I_a \quad \Omega_1 \quad \Delta\varphi \quad \Omega_2]$ (при $T_{\text{сп}} = 0$) будет иметь следующий вид:

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}U_y(s),$$

$$\Omega_2(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s),$$

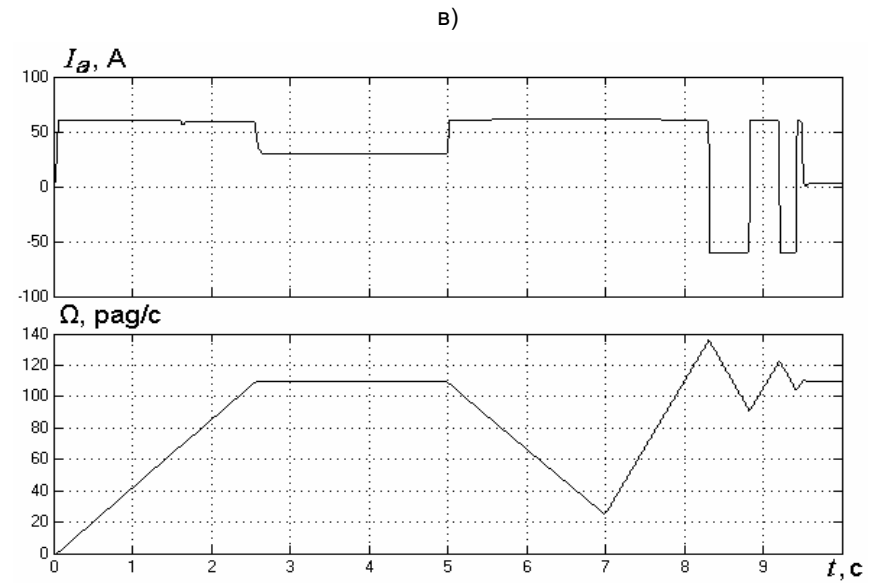
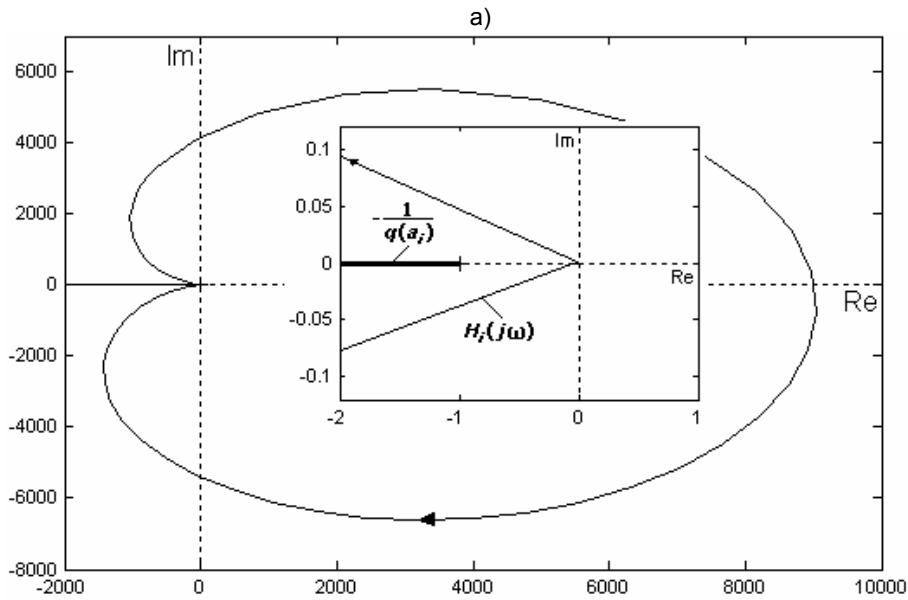
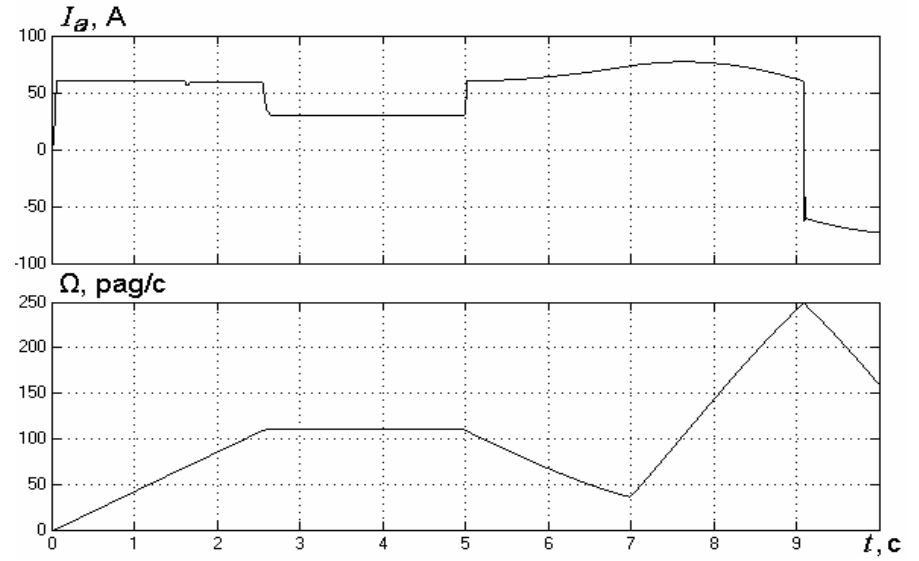
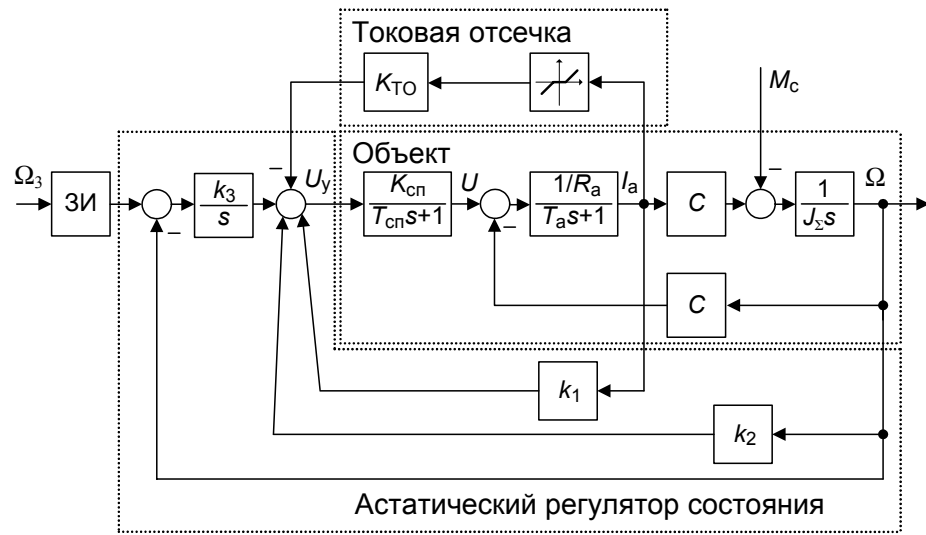


Рис. 1

а)

б)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_a} & -\frac{C}{T_a R_a} & 0 & 0 \\ \frac{C}{J_1} & -\frac{b}{J_1} & -\frac{C_{12}}{J_1} & \frac{b}{J_1} \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & \frac{b}{J_2} & \frac{C_{12}}{J_2} & -\frac{b}{J_2} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{сп}}}{T_a R_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

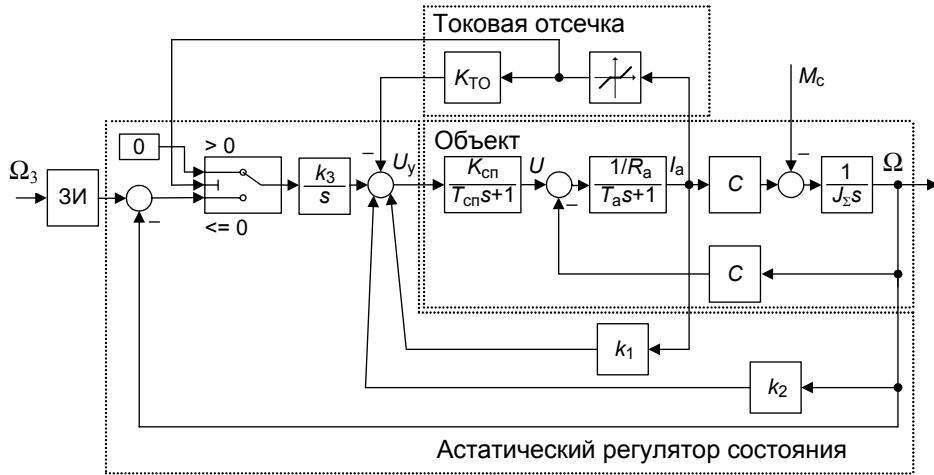
$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 1],$$

где **A**, **B** и **C** – матрицы состояния, входа и выхода; *s* – комплексная переменная преобразования Лапласа.

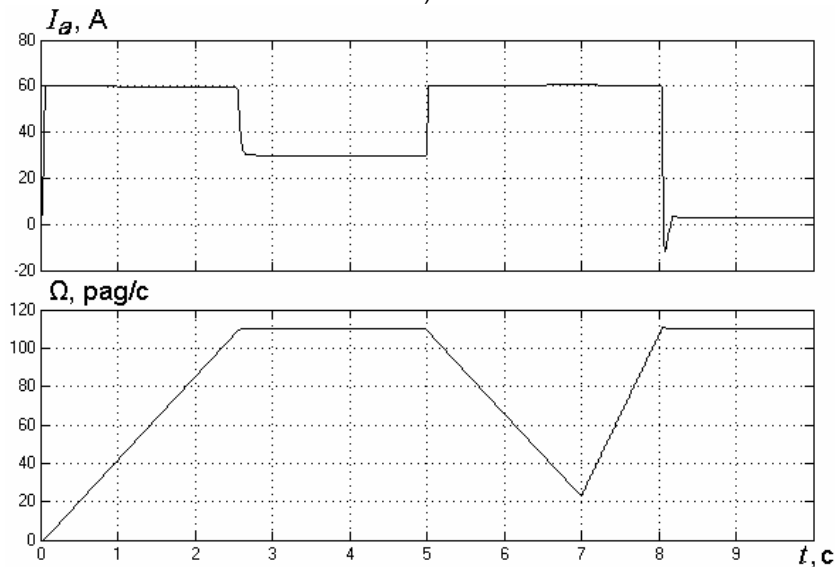
Динамические требования в линейной зоне обеспечиваются регулятором состояния за счет выбора в качестве желаемого полинома Ньютона со среднегеометрическим корнем $\Omega = 73 \text{ с}^{-1}$. При этом матрица коэффициентов ОС по координатам состояния объекта получается в виде

$$K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5] = [-0,05 \ -0,9 \ -38,3 \ -78,4 \ -1504].$$

Годограф Найквиста линейной части контура токоограничения астатической ЭМС (рис. 3,а), представленный на рис. 3,б, последовательно проходит следующие квадранты комплексной плоскости: II→III→IV→III→II→I→IV→III. Сопрягающие частоты в точках пересечения годографа с осями координат соответственно равны: в точке А – $\omega = 11,1 \text{ рад/с}$; Б – $\omega = 14,2 \text{ рад/с}$; В – $\omega = 21 \text{ рад/с}$; Г – $\omega = 52,1 \text{ рад/с}$; Д – $\omega = 104 \text{ рад/с}$; Е – $\omega = 205 \text{ рад/с}$; Ж – $\omega = 317 \text{ рад/с}$. По сравнению с годографом Найквиста контура ТО статической двухмассовой системы [5] годограф Найквиста рассматриваемой системы (рис. 3,б) имеет более сложную форму. Кроме того, увеличилась площадь взаимного перекрытия низкочастотной и высокочастотной частей АФЧХ системы. Если ранее это был один (III) квадрант комплексной плоскости, то сейчас два (III и IV) квадранта.

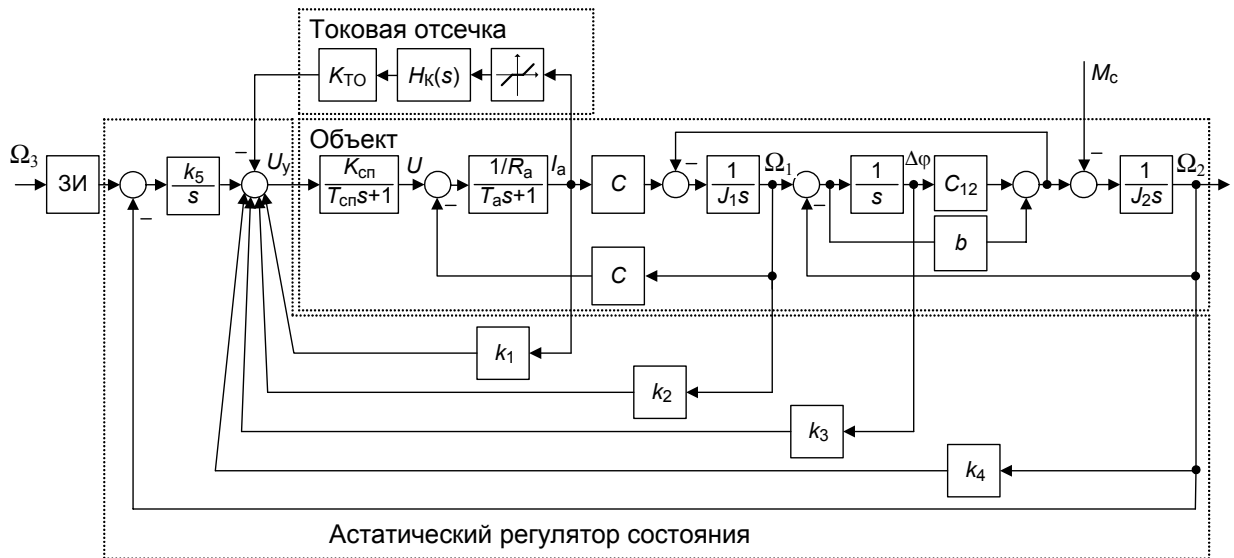


а)

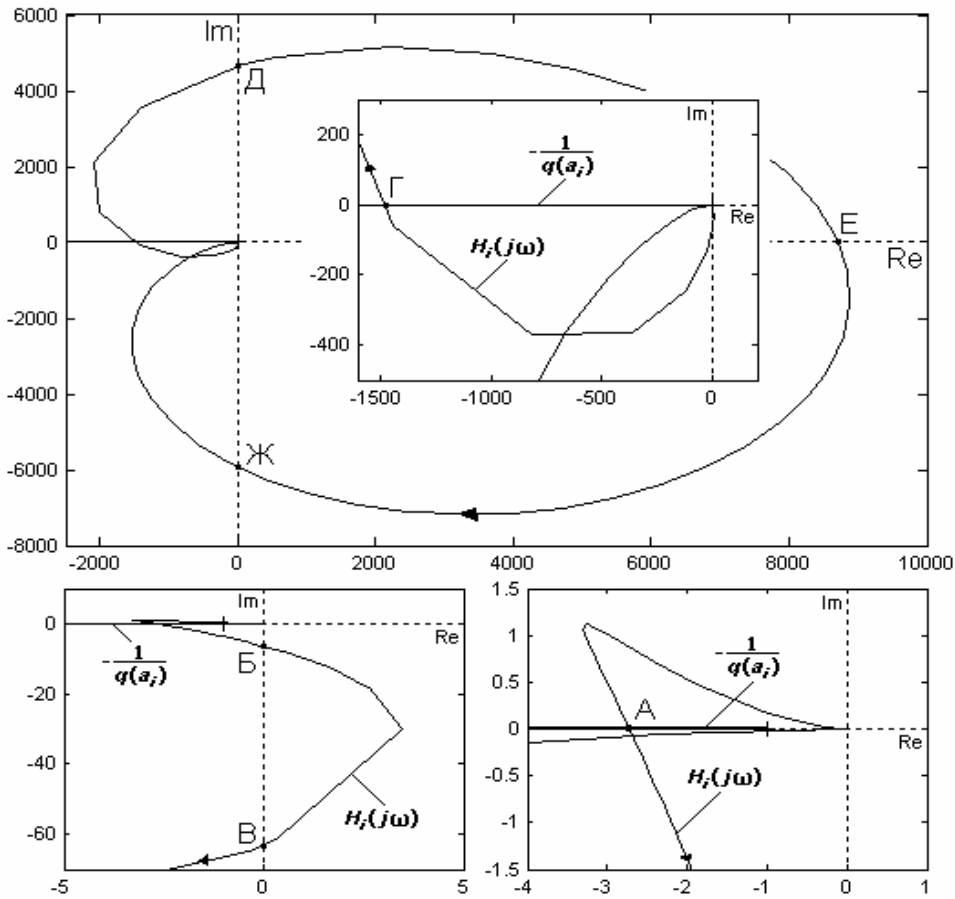


б)

Рис. 2



а)



б)

Рис. 3

В связи с этим отделение низкочастотной части АФЧХ от ее высокочастотной части требует использования корректирующего устройства большего порядка. При формировании желаемого вида АФЧХ необходим сдвиг характеристики в области низких частот уже на минус 180°. Этого можно достичь с помощью корректирующего зве-

на второго порядка в контуре ТО. Могут быть предложены следующие варианты регуляторов: комбинация ПИ- и ИД-звеньев, два ПИ- или два ИД-звена. В любом случае будут отсутствовать точки пересечения сформированной характеристики с характеристикой нелинейного элемента.

В первую очередь остановимся на использовании двух ИД-звеньев в контуре токовой отсечки. Такой вариант решения задачи подобен «жесткой» системе: интегральная составляющая сохраняется только в главном контуре управления. Поэтому логично предположить схожесть возникающих на этом пути трудностей и способов их устранения.

Передаточная функция (ПФ) корректирующего звена может быть принята в следующем виде:

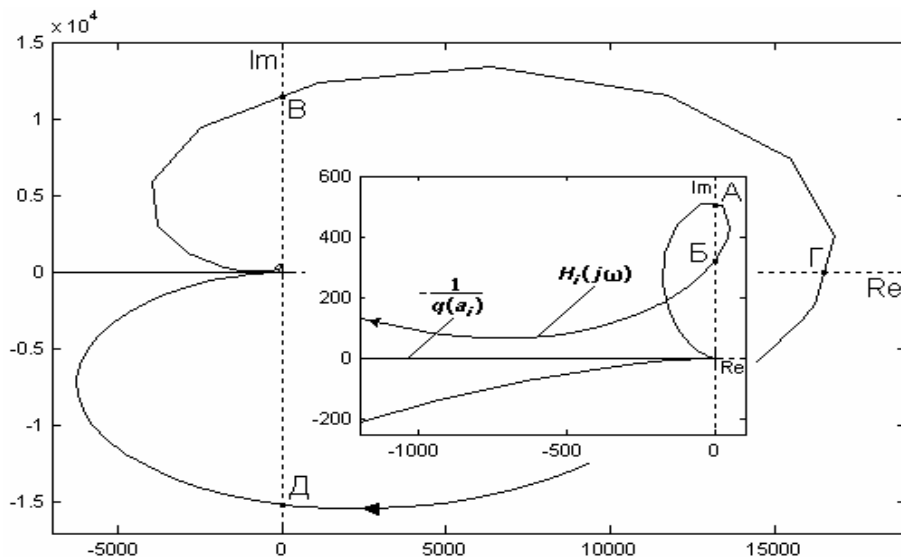
$$H_K(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)^2}{(\tau_2 s + 1)^2}, \quad (1)$$

где τ_1, τ_2 – постоянные времени корректирующего звена.

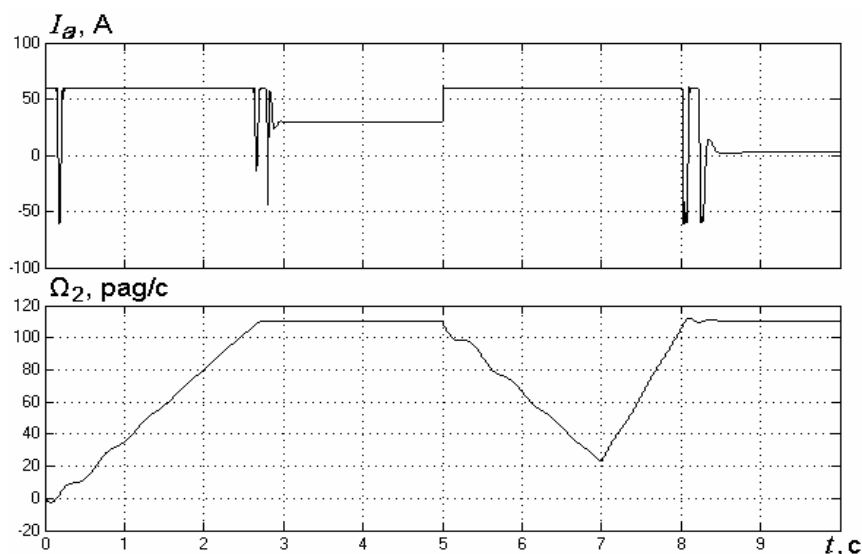
Следуя инструкциям по выбору параметров управляющего устройства (УУ) [6] для ПИ- и ИД-звеньев контура ТО статической упругомассовой ЭМС, применительно к рассматриваемой САУ

принимая постоянные времени $\tau_1 = 0,007$ с и $\tau_2 = 0,01$ с. Скорректированная АФЧХ (рис. 4,а) будет проходить следующую последовательность квадрантов комплексной плоскости: II→I→II→I→IV→III. При этом будут отсутствовать нежелательные переходы между II и III четвертями, ведущие к пересечению с характеристикой нелинейного элемента.

Если выполнить пуск ЭМС с синтезированным контуром ТО, то обнаружится аналогичная проблема накопления сигнала интегратором основного контура управления скоростью в режиме перегрузки, что наблюдалось и в «жесткой» астатической системе. Как было показано ранее, использование цепи принудительного прекращения интегрирования во время работы контура ТО позволяет решить возникшую проблему.



а)



б)

Рис. 4

Переходные процессы пуска ЭМС (рис. 3,а) с ЗИ второго порядка и контуром ТО, содержащим нелинейный элемент, корректирующее устройство (1) и безынерционное звено с коэффициентом усиления $K_{ТО} = 5 \cdot 10^4$, с усовершенствованным законом управления на половину номинальной скорости показаны на рис. 4,б. Они иллюстрируют удовлетворительное качество полученных процессов управления.

Однако следует отметить некоторое ухудшение качества переходных процессов относительно результата, полученного в тех же условиях для «жесткой» астатической ЭМС (рис. 2,а) с модифицированной структурой управления. В упругомассовой системе при выходе ее из режимов перегрузки ($t = 2,5$ с и $t = 8$ с (рис. 4,б)) появляются колебания, вероятно связанные с инерционностью контура токовой отсечки, сигнал обратной связи с которого, приходя на вход объекта, претерпевает некоторое запаздывание относительно сигнала, поступающего на элемент сравнения, вызывая рассогласование во времени при переключениях между главным и токоограничивающим контурами регулирования. При этом (рис. 4,б) наблюдается ухудшение качества управления по сравнению со статической упругомассовой ЭМС, содержащей корректирующее ИД-звено в контуре ТО [6]. Следовательно, такой вариант корректирующего устройства (1) не может быть принят за основной в астатических системах.

Как было отмечено, в контуре ТО, кроме звена с ПФ (1), допускается совместное использование ПИ- и ИД-звеньев. В этом случае передаточная функция корректирующего звена принимает вид

$$H_k(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)^2}{s(\tau_2 s + 1)}, \quad (2)$$

где τ_1, τ_2 – постоянные времени корректирующего звена.

При формировании желаемой АФЧХ линейной части контура ТО в области низких частот теперь фазовый сдвиг в минус 90° выполняется на нулевой частоте, затем на частоте, меньшей, чем частота в точке Б (ей соответствует постоянная времени τ_2), осуществляется дополнительный сдвиг на минус 90° , и наконец, ближе к высокочастотной области характеристику «возвращают обратно» с помощью положительного фазового сдвига в 180° . Сформированный годограф Найквиста (рис. 5,а) будет располагаться в I→II→I→IV→III четвертях фазовой плоскости, т. е. будут отсутствовать точки его пересечения с характеристикой нелинейного элемента.

Рассмотрим поведение системы, использующей звено с ПФ (2) в контуре ТО. Параметры УУ можно принять равными выбранным ранее значениям $\tau_1 = 0,007$ с, $\tau_2 = 0,1$ с. Процессы запуска указанной системы (рис. 3,а) в оговорен-

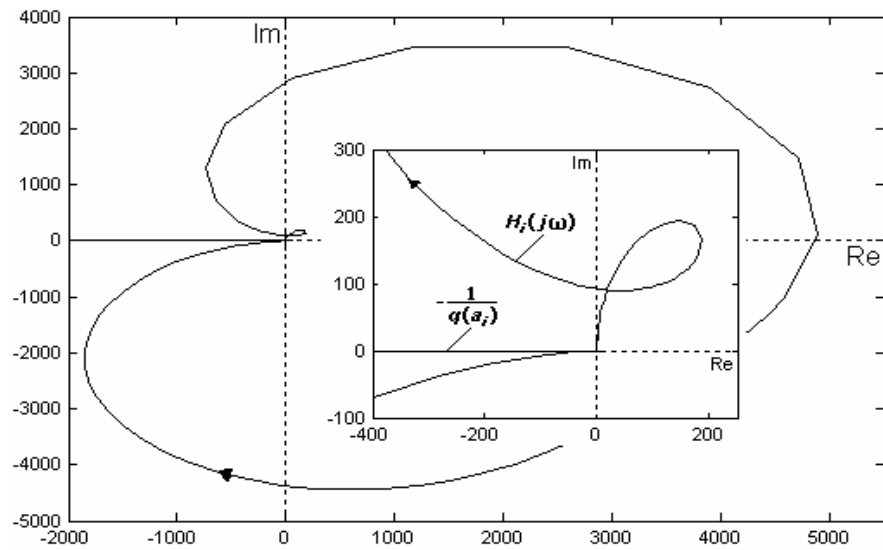
ных выше условиях с ЗИ второго порядка и контуром ТО, состоящим из нелинейности, корректирующего звена (2) и блока усиления $K_{ТО} = 1,5 \cdot 10^5$, на скорость, равную половине номинальной, изображены на рис. 5,б.

Следует особо подчеркнуть, что при организации задержанной обратной связи по току с применением корректирующего звена (2), несмотря на наличие в нем интегральной составляющей, не существует проблемы с поддержанием заданного скоростного режима после прекращения действия на вал исполнительного органа перегрузочного момента сопротивления. Это хорошо видно на интервале времени от $t = 7$ с до $t = 10$ с (рис. 5,б). Объяснение этого можно найти во взаимной компенсации действий интеграторов главного контура регулирования скорости и контура ТО.

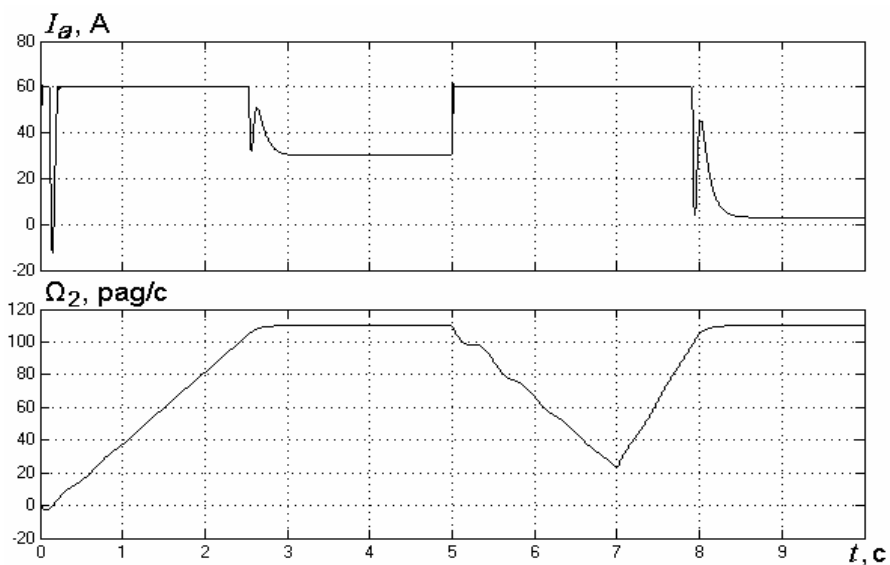
Кроме того, новый вариант корректирующего звена (2) в контуре ТО является универсальным, так как легко переносится на другие типы систем с суммирующим усилителем, такие как система с астатическим полиномиальным регулятором и система с астатическим регулятором состояния с наблюдателем.

С одной стороны, компенсация действия одного интегратора основного контура действием другого интегратора контура токоограничения в целом положительно влияет и на точность работы системы, и на качество получаемых процессов управления. Тем не менее, с другой стороны, накопленные интеграторами сигналы ничем не ограничиваются. Так, однократное срабатывание защиты двигателя от перегрузок приводит к запоминанию интегратором информации, достигающей значения $2,22 \cdot 10^5$ единиц. И чем чаще работает контур ограничения тока, тем больший сигнал накапливают интеграторы.

Избежать бесконечного интегрирования входной информации и в конечном счете переполнения элементов памяти, на которых реализуются интегрирующие части УУ, можно следующим способом (рис. 5,в). Следует осуществлять периодический сброс интегратора контура токоограничения с ПФ $H(s) = \frac{1}{\tau s}$ по достижении им какого-то определенного значения в ноль, а из сигнала, накопленного интегратором главного контура с ПФ $H(s) = \frac{k_5}{s}$, вычитать ту же самую величину. Число окончания интегрирования выбирается исходя из разрядности аппаратной части, на которой реализуется устройство управления. Подобные периодические сбросы никаким образом не отразятся на качестве работы системы.

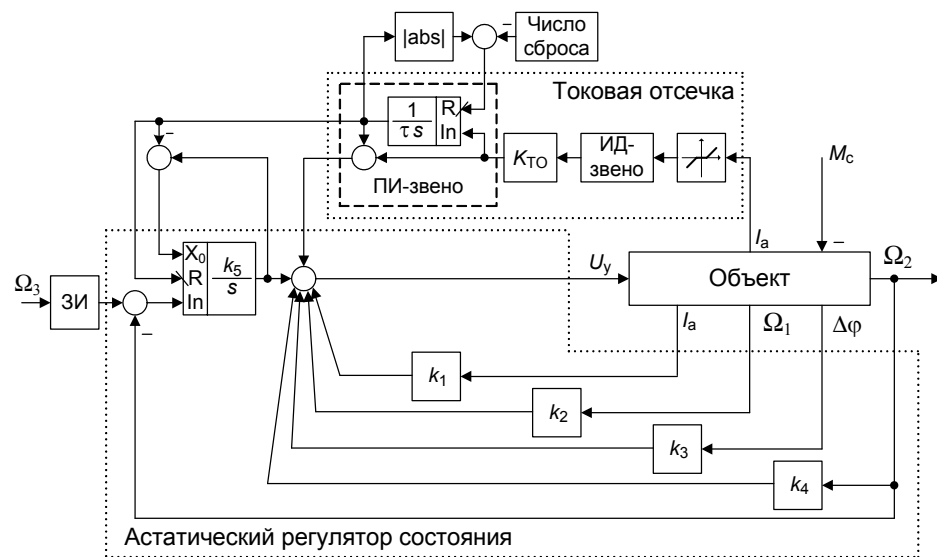


а)

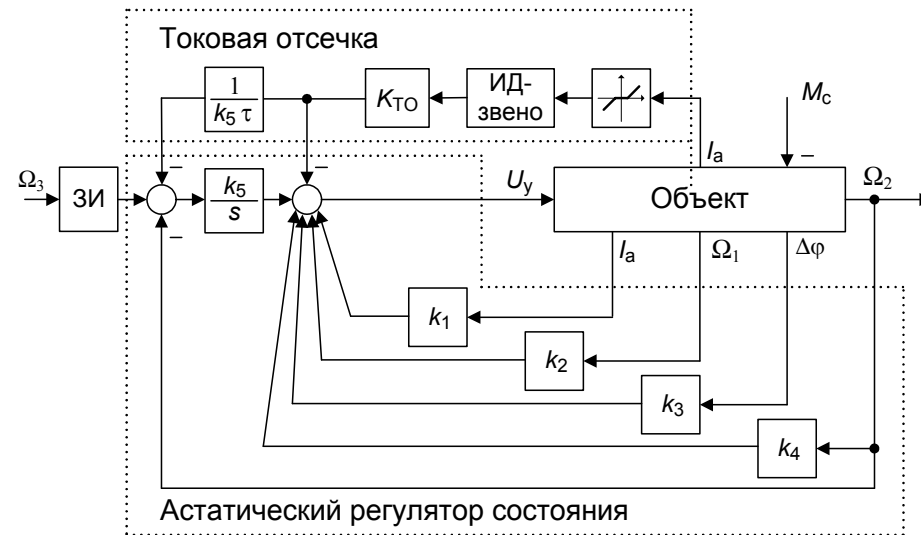


б)

Рис. 5



в)



г)

Может быть предложен и более простой в реализации способ предотвращения (предупреждения) неограниченного накопления сигналов на выходах интеграторов (рис. 5,г). Воспользовавшись правилами эквивалентных структурных преобразований, можно перенести задержанную обратную связь по току, содержащую интегрирующий элемент, со входа силового преобразователя объекта на вход астатической составляющей регулятора состояния, соответствующим образом (с учетом коэффициента усиления k_5) скорректировав коэффициент усиления этой параллельной ветви контура ТО. Указанное преобразование позволяет совместить в одном блоке интегральные части основного регулятора и регулятора контура токоограничения. При этом сохраняются характер и качество переходных процессов по рассматриваемым координатам состояния, и они оказываются аналогичными процессам управления (рис. 5,б) в системе без выполнения дополнительных структурных изменений. Однако теперь сигнал на выходе общего интегратора является ограниченным и по форме повторяет сигнал скорости $\Omega_2(t)$ исполнительного элемента.

Следует также отметить, что астатические ЭМС при использовании в них (для организации задержанной обратной связи по току на вход силового преобразователя) корректирующих звеньев с ПФ (2) обладают низкой параметрической чувствительностью.

Что касается оставшегося (третьего) варианта регулятора в контуре ТО астатической системы в виде последовательного соединения двух ПИ-звеньев, то использование подобного УУ приведет к возникновению той же проблемы с невозможностью вывода системы на желаемый уровень скорости при выходе из режима перегрузки, что и в статическом примере системы [6] с корректирующим ПИ-звеном в контуре токоограничения. Объясняется это тем, что только один интегратор контура ТО может быть объединен с регулятором основного контура регулирования скорости. В силу этого, указанное решение в виде двух ПИ-звеньев для случая астатической ЭМС первого порядка считаем неэффективным и исключаем из рассмотрения.

Но, с другой стороны, логично будет предположить, что введение дополнительного интегратора в контур токоограничения потребует при появлении астатизма второго по-

рядка в основном законе управления выходной координатой системы.

Таким образом, для улучшения качества переходных процессов астатических упруго-массовых ЭМС при наличии режимов токоограничения необходимо обеспечить повышение порядка корректирующих устройств каналов ТО в соответствии с заданной степенью астатизма и решать проблему паразитного накопления информации интегрирующими звеньями основного регулятора на интервалах токоограничения (проблему «противонакопления» интеграторов).

Возможными способами решения проблемы токоограничения статических ЭМС являются: применение логических переключающих устройств, блокирующих работу интеграторов основного регулятора на интервалах токоограничения; использование в основном регуляторе и корректирующем устройстве контура ТО интегрирующих звеньев с синхронным «сбросом» информации, а также реализация структурных изменений канала токоограничения путем объединения его интегрирующих элементов с интеграторами основного регулятора.

Универсальный характер предложенных технических решений подтверждается возможностью их использования в ЭМС с различными типами безынерционных и динамических регуляторов состояния.

Список литературы

1. **Воронов А.А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985.
2. **Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.** Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979.
3. **Терехов В.М.** Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
4. **Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.** Ограничение тока электродвигателя в электромеханических системах с регуляторами состояния // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3.
5. **Тарарыкин С.В., Копылова Л.Г., Тютиков В.В.** Особенности управления состоянием электромеханических систем при ограниченной мощности исполнительных устройств // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2007. – № 6.
6. **Тарарыкин С.В., Тютиков В.В., Копылова Л.Г.** Формирование переходных процессов электропривода путем частотной коррекции контура токоограничения // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 3.

Копылова Лариса Геннадьевна,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электроники и микропроцессорных систем,
terehov@eims.ispu.ru

Тарарыкин Сергей Вячеславович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электроники и микропроцессорных систем, ректор университета,
tsv@ispu.ru