

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.3.078 : 681.511.4

Николай Александрович Курносов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант, Россия, Иваново, e-mail: amplds239@yandex.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: tarsv56@mail.ru

Управление следящими мехатронными системами с жесткими кинематическими звеньями при ограничениях основных координат состояния¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Следящие мехатронные системы должны обеспечивать высокое качество управления рабочими машинами в широком диапазоне скоростей при значительных изменениях управляющих и возмущающих воздействий, максимальное ускорение переходных процессов в условиях ограничений координат состояния, а также плавные переходы из линейной зоны малых в нелинейную зону больших отклонений координат и обратно. При высокой жесткости кинематики системы строят по принципу подчиненного регулирования основных координат состояния (тока, скорости, положения) с использованием типовых регуляторов, а ограничения координат реализуют путем ограничений выходных сигналов регуляторов. Однако наличие нелинейных элементов типа «насыщение» («ограничение») может вызывать опасные автоколебания и приводить к потере работоспособности систем даже при большом запасе устойчивости «в малом» всех контуров регулирования. В наибольшей степени проблема обостряется с увеличением степени астатизма следящих систем и количества интегрирующих элементов в контурах управления. В связи с этим актуальным является детализированное исследование динамики следящих МС при значительных изменениях режимов функционирования, связанных с переходами из линейной зоны малых в нелинейную зону больших отклонений координат состояния, обусловленных ограниченными возможностями силовых исполнительных элементов, и разработка более эффективных методов управления системами в этих условиях.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием операторных методов структурного представления объектов и систем в соотношениях «вход-выход», а также метода гармонического баланса, основанного на гармонической линеаризации нелинейностей. Параметрический синтез регуляторов и настройка контуров управления выполнены методами подчиненного (каскадного) регулирования координат с последовательной коррекцией контуров обратных связей. Оценка эффективности полученных результатов проведена методами детализированного цифрового моделирования.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 075-03-2026-402 (1/26).

The study is conducted within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-03-2026-402 (1/26).

Результаты. Синтезированы и исследованы 3 варианта следящих мехатронных систем постоянного тока с различной степенью астатизма по управляющему воздействию. Получены выражения передаточных функций их линейных частей и выполнено наглядное представление характеристик линейных и нелинейных блоков на комплексной плоскости при ограничениях тока, скорости двигателя и его питающего напряжения. На основе их анализа разработан метод изменения структуры каждого регулятора с интегрирующими элементами при ограничении соответствующей координаты и принудительного насыщения всех интегрирующих элементов регулятора положения при ограничении любой из контролируемых координат состояния, дополняемый при необходимости безынерционной коррекцией петлевого усиления в контуре положения.

Выводы. Применение известных технических решений в виде установки статических элементов «насыщение» на выходах регуляторов положения и скорости, а также использование механизмов локального «противонакопления» сигналов интегрирующих элементов регуляторов сохраняет возможность появления автоколебаний и потери работоспособности исследованных систем. Разработанный метод управления оказывается более эффективным, повышая качество работы следящих мехатронных систем и исключая возможность возникновения аварийных ситуаций в различных режимах их функционирования.

Ключевые слова: следящая мехатронная система, жесткая кинематика, синтез регуляторов, степень астатизма, ограничение координат состояния

Nikolay Alexandrovich Kurnosov

Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student, Russia, Ivanovo, e-mail: amplds239@yandex.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electronics and Microprocessor Systems Development, Russia, Ivanovo, e-mail: tarsv56@mail.ru

Control of tracking mechatronic systems with rigid kinematic links under constraints on the main state coordinates

Abstract

Background. Tracking mechatronic systems must ensure high-quality control of operating machines across a wide speed range under significant variations in control and disturbance inputs, achieve maximum acceleration of transient modes under state coordinate constraints, and provide smooth transitions from the linear zone of small deviations to the nonlinear zone of large coordinate deviations and vice versa. In cases of high kinematic rigidity, systems are designed based on the principle of cascaded control of the main state coordinates (current, speed, position) using standard regulators. State coordinate constraints are implemented by limiting the output signals of the regulators. However, the presence of nonlinear elements of the “saturation” (“constraints”) type can cause dangerous self-oscillations and lead to system failure, even when all control loops have a large stability margin in the small. The problem becomes most acute with an increase in the degree of astaticism of tracking systems and the number of integrating elements in the control loops. Thus, a detailed study of the dynamics of tracking MS with significant changes in operating modes associated with transitions from the linear zone of small to the nonlinear zone of large deviations of state coordinates caused by the limited capabilities of the power actuators, and the development of more effective methods to control systems under these conditions, is relevant.

Materials and methods. The study has been conducted using operator methods for structural representation of objects and systems in input-output relationships, as well as the harmonic balance method based on harmonic linearization of nonlinearities. The parametric synthesis of regulators and tuning of control loops have been performed using methods of cascaded (subordinate) coordinate control with sequential correction of feedback loop circuits. The effectiveness of the obtained results has been evaluated using detailed digital simulation methods.

Results. Three variants of DC tracking mechatronic systems with varying degrees of astaticism with respect to the control input have been synthesized and studied. Expressions of the transfer functions of their linear parts have been derived. A visual representation of the characteristics of linear and nonlinear parts in the complex plane has been provided, subject to constraints on current, motor speed, and supply voltage. Based on the analysis of these results, a method has been developed to modify the structure of each regulator with integrating elements when the corresponding coordinate is constrained. This also includes forced saturation of all integrating elements in the position regulator whenever any of the monitored state coordinates is limited, supplemented, if necessary, by inertia-free correction of the loop gain in the position control loop.

Conclusions. The application of known technical solution such as installing static “constraints” elements at the outputs of position and speed regulators, as well as using mechanisms for local “anti-windup” of the integrating elements in the regulators still retains the possibility of self-oscillations and system failure in the studied systems. The developed control method proves to be more effective; it improves operational quality and eliminates the possibility of emergency situations across various operating modes of tracking mechatronic systems.

Key words: tracking mechatronic system, rigid kinematics, regulator synthesis, degree of astaticism, state coordinates constraints

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.064-075

Введение. Следящие мехатронные системы (МС) находят широкое применение для решения самых разнообразных задач управления металлорежущими станками и обрабатывающими центрами, роботами и манипуляторами, прокатными станами и поточными линиями, телескопами и антеннами, механизмами авиационно-космической техники и других высокотехнологичных и наукоемких областей, объектами вооружения [1–8].

Они должны обеспечивать высокое качество управления рабочими органами машин в широком диапазоне скоростей при значительных изменениях управляющих и возмущающих воздействий, а также максимальное использование возможностей применяемых силовых элементов для ускорения переходных режимов. В пределах заданных ограничений координат, т. е. в линейной зоне работы, следящие МС реализуют необходимые показатели точности и быстродействия позиционирования, а также отслеживания изменений задающего воздействия при вариациях нагрузочного момента, а в области больших изменений координат состояния формируют режимы их ограничения для надежного сохранения работоспособности как отдельных элементов силовой части (преобразователя, электродвигателя, механических передач и др.), так и всей системы в целом. Кроме того, в системах должны реализовываться плавные (бесконфликтные) переходы из линейной зоны малых отклонений координат в нелинейную область больших отклонений (с ограничениями) и обратно при изменениях режимов работы технологического оборудования.

При высокой жесткости кинематических передач современные следящие МС обычно строят по принципу подчиненного регулирования основных координат состояния – тока (момента), скорости и положения – с использованием типовых регуляторов пропорционального и интегрального типа в соответствующих контурах управления, а необходимые ограничения координат реализуют путем ограничений выходных сигналов этих регуляторов, т.е. задающих воздействий внутренних контуров [3–5, 7, 9].

Важно отметить, что процедуры расчета параметров регуляторов, формирующих желаемое качество работы МС в линейной зоне малых отклонений координат, являются хорошо отработанными и подробно описанными в технической литературе. Однако вопросам формирования управления в нелинейной области больших отклонений с ограничениями координат уделяется гораздо меньше внимания. Между тем, как отмечается в [4] и других источниках, наличие нелинейных элементов насыщения сигналов может вызывать опасные автоколебания низкой частоты и высокой амплитуды, что делает МС полностью неработоспособной, даже при большом запасе устойчивости «в малом» каждого из

контуров регулирования. В наибольшей степени эта проблема обостряется с увеличением степени астатизма следящих МС, т. е. при соответствующем возрастании числа интегрирующих элементов в главном контуре управления.

Предлагаемая рядом исследователей [3, 5, 7, 10] установка статических нелинейных элементов типа «ограничение» («насыщение») на выходах регуляторов положения и скорости может использоваться только при их пропорциональном характере. При наличии интегрирующих элементов они будут продолжать накопление паразитного информационного сигнала в режимах ограничений координат, что существенно ухудшит процесс возвращения МС в линейную зону работы по завершении режима ограничений.

Определенные меры «противонакопления» сигналов интегрирующих регуляторов на основе использования их естественного (по напряжению питания) или принудительного насыщения во время ограничения координат [4, 6, 11, 12] позволяют существенно улучшить динамику нелинейной МС. Однако при этом сохраняется неизменной структура интегрального регулятора тока в расчете на естественное ограничение выходного напряжения силового преобразователя и не в полной мере учитываются особенности взаимного влияния ограничителей координат состояния на работу единой МС.

В результате возможность существенного снижения качества управления и даже потери работоспособности астатических следящих МС с разрушением их силовых элементов сохраняется, что снижает надежность и эффективность их функционирования.

С учетом выше изложенного целью данной работы является детализированное исследование динамики следящих МС при значительных изменениях режимов функционирования, связанных с переходами из линейной зоны малых в нелинейную зону больших отклонений координат состояния, обусловленных ограниченными возможностями силовых исполнительных элементов, и разработка более эффективных методов управления системами в этих условиях.

Принимая во внимание однозначный характер используемых нелинейностей, за основу аналитических исследований примем наиболее просто реализуемый и наглядный метод гармонической линеаризации (гармонического баланса, описывающей функции), а детализированные проверочные расчеты будем выполнять методом цифрового моделирования в среде Simulink программного комплекса MATLAB.

Определение объекта исследования. В качестве объекта управления (ОУ) примем одноканальный электропривод (ЭП) постоянного тока, структурная схема которого после приведения механических параметров и величин к валу электродвигателя (ЭД) представлена на рис. 1,а.

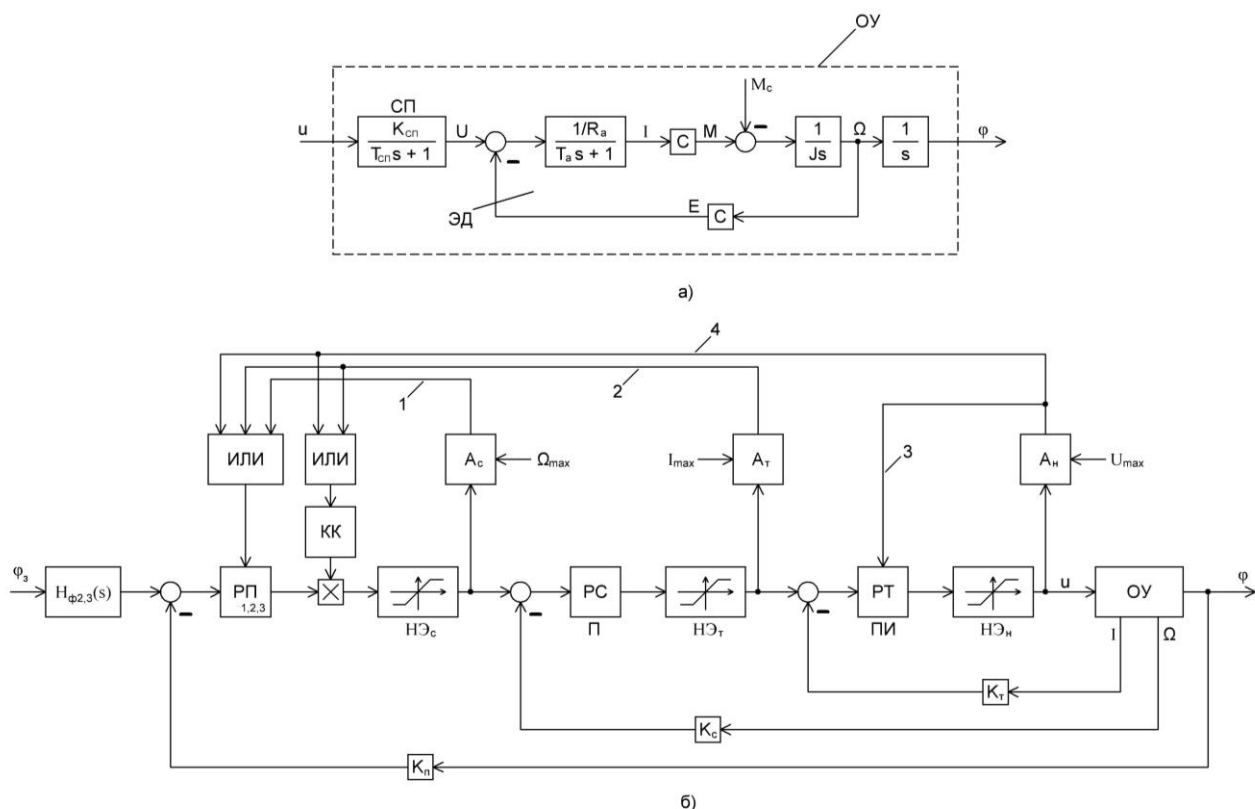


Рис. 1. Структурные схемы объекта (а) и системы управления (б): СП – силовой преобразователь; u и U – управляющее и выходное напряжение СП; I – ток якорной цепи ЭД; M – электромагнитный момент; M_c – момент статического сопротивления (момент нагрузки); Ω – угловая скорость; C – конструктивный параметр ЭД; T_a , R_a – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; J – суммарный момент инерции; $K_{сп}$, $T_{сп}$ – коэффициент усиления и постоянная времени СП; φ – угловое положение вала ЭД; s – комплексная переменная Лапласа

Следует отметить, что по своим свойствам такая электромеханическая система будет во многом аналогична ЭП переменного тока на базе асинхронных двигателей с векторным управлением координатами, а также на базе синхронных машин с управлением по схеме вентильного двигателя.

Для конкретности примем следующие значения параметров ОУ: $K_{сп} = 22$; $T_{сп} = 0,002$ с; $R_a = 1,47$ Ом; $L_a = 0,064$ Гн; $T_a = 0,0435$ с; $C = 2,068$ Вб; $J = 0,09$ кг·м²; максимальные значения тока ЭД и задающего напряжения СП $I_{max} = 27$ А и $u_{max} = 12$ В; максимальная (номинальная) угловая скорость ЭД – $\Omega_{max} = 100$ рад/с.

Управление ЭП будем строить по принципу подчиненного (каскадного) регулирования тока, скорости и положения с типовыми регуляторами соответственно РТ, РС и РП (рис. 1,б). При этом ограничения тока и скорости реализуются соответствующими ограничениями выходных сигналов регуляторов скорости и положения нелинейными элементами НЭ_т и НЭ_с, а ограничение напряжения СП обеспечивается ограничением выходного сигнала регулятора тока нелинейным элементом НЭ_н.

Формирование процессов управления в линейной зоне работы системы. Будем синтезировать и исследовать 3 варианта сле-

дящих МС, содержащие: ПИ-регуляторы тока; П-регуляторы скорости; различные регуляторы положения РП_{1,2,3} П, ПИ и ПИ² типов соответственно. Значения коэффициентов обратных связей по току K_t , скорости K_c и положению K_n принимаются единичными.

Контуры тока и скорости настраиваются на «модульный (технический) оптимум» с быстроедействием соответственно 15 мс и 30 мс. Передаточные функции (ПФ) регуляторов тока и скорости имеют вид:

$$H_T(s) = 0,727 \frac{0,0435 \cdot s + 1}{0,0435 \cdot s},$$

$$H_C(s) = 5,44.$$

Контуры положения, обеспечивающие первую, вторую и третью степень астатизма по управляющему воздействию и, соответственно, нулевую, первую и вторую степень астатизма по возмущению в виде момента нагрузки, имеют быстроедействие 80, 180 и 400 мс при отсутствии перерегулирования в режиме позиционирования вала ЭД. Выражения ПФ_{1,2,3} синтезированных по рекомендациям [13] регуляторов положения принимают вид:

$$H_{П1}(s) = 38,793;$$

$$H_{П2}(s) = 38,793 \frac{0,083s + 1}{0,083s};$$

$$H_{П3}(s) = 38,793 \frac{(0,083s + 1)^2}{0,00689 \cdot s^2}.$$

Соответствующие графики позиционирования с последующим воздействием момента нагрузки, превышающего номинальное значение, а также графики слежения за линейно и параболически нарастающими сигналами задания положения приведены на рис. 2, а, б, в, где цифрами 1, 2, 3 обозначается принадлежность определенному варианту МС (и РП).

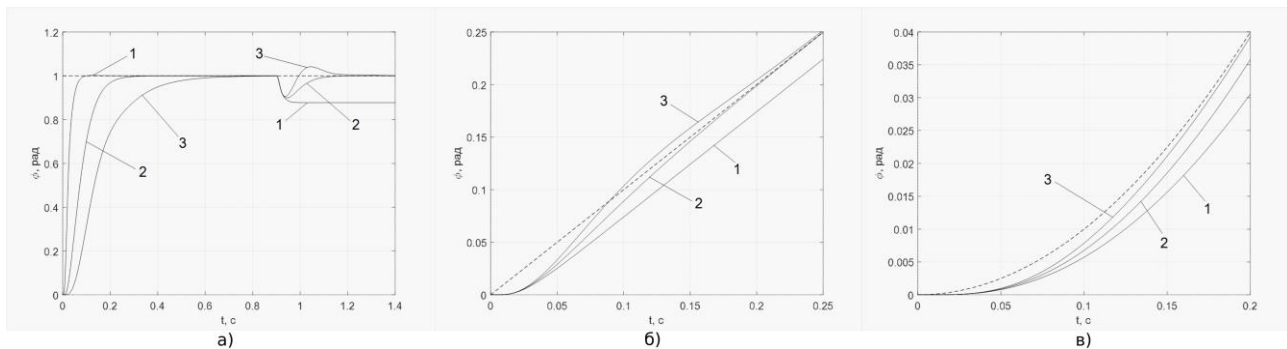


Рис. 2. Графики позиционирования и слежения различных вариантов МС в линейных зонах работы

Приведенные результаты иллюстрируют высокое качество работы синтезированных вариантов МС в линейных зонах при изменениях значений координат состояния в пределах имеющихся ограничений. Однако этого может оказаться недостаточно для их эффективной работы в нелинейной области больших отклонений координат, что требует дополнительных исследований и учета особенностей МС в этих условиях функционирования.

Формирование процессов управления МС при ограничениях основных координат состояния. Для ограничения координат состояния будем использовать статические нелинейные элементы (НЭ) типа «насыщение» (рис. 1, б) с единичным значением тангенса угла наклона линейного участка характеристики и предельным значением b сигнала на выходе, равным максимальной скорости $\Omega_{\max}$ (для НЭс), максимальному току $I_{\max}$ (для НЭт) и максимальному напряжению $U_{\max}$ (для НЭн).

Выражение коэффициента гармонической линеаризации НЭ в этом случае принимает вид

$$q(a, x_0) = \frac{k}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{b-x_0}{a}\right) + \arcsin\left(\frac{b+x_0}{a}\right) + \frac{b-x_0}{a} \sqrt{1 - \frac{(b-x_0)^2}{a^2}} + \frac{b+x_0}{a} \sqrt{1 - \frac{(b+x_0)^2}{a^2}} \right),$$

где a , x_0 – соответственно амплитуда и смещение предполагаемых автоколебаний на входе нелинейности.

В режимах позиционирования на входах контуров положения МС дополнительно включаются префильтры с ПФ:

$$H_{Ф2}(s) = \frac{1}{0,083s + 1};$$

$$H_{Ф3}(s) = \frac{1}{(0,083s + 1)^2},$$

компенсирующие влияние нулей соответствующих регуляторов РП_{2,3} при позиционировании.

Поскольку следящие МС могут работать в широком диапазоне изменений нагрузки (тока ЭД), скоростей слежения и напряжений СП, а смещение x_0 предполагаемых автоколебаний определяется установившимися значениями координат состояния в соответствующем режиме работы, то в дальнейших исследованиях будем исходить из наихудших условий функционирования с наибольшей вероятностью возникновения автоколебаний при $x_0 = 0$. В этом случае выражение коэффициента гармонической линеаризации НЭ приводится к более простому виду:

$$q(a) = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \right),$$

а характеристика НЭ, определяемая как $-1/q(a)$, занимает весь участок отрицательной полуоси комплексной плоскости слева от точки Найквиста с координатами $(-1; j0)$, как это показано на всех фрагментах рис. 3.

Для использования метода гармонического баланса средствами MATLAB были предварительно вычислены ПФ линейных частей (ЛЧ) всех исследуемых вариантов МС с различными типами регуляторов относительно выхода-входа каждого нелинейного элемента при условии его единственного присутствия в системе для ограничения соответствующей («своей») координаты состояния.

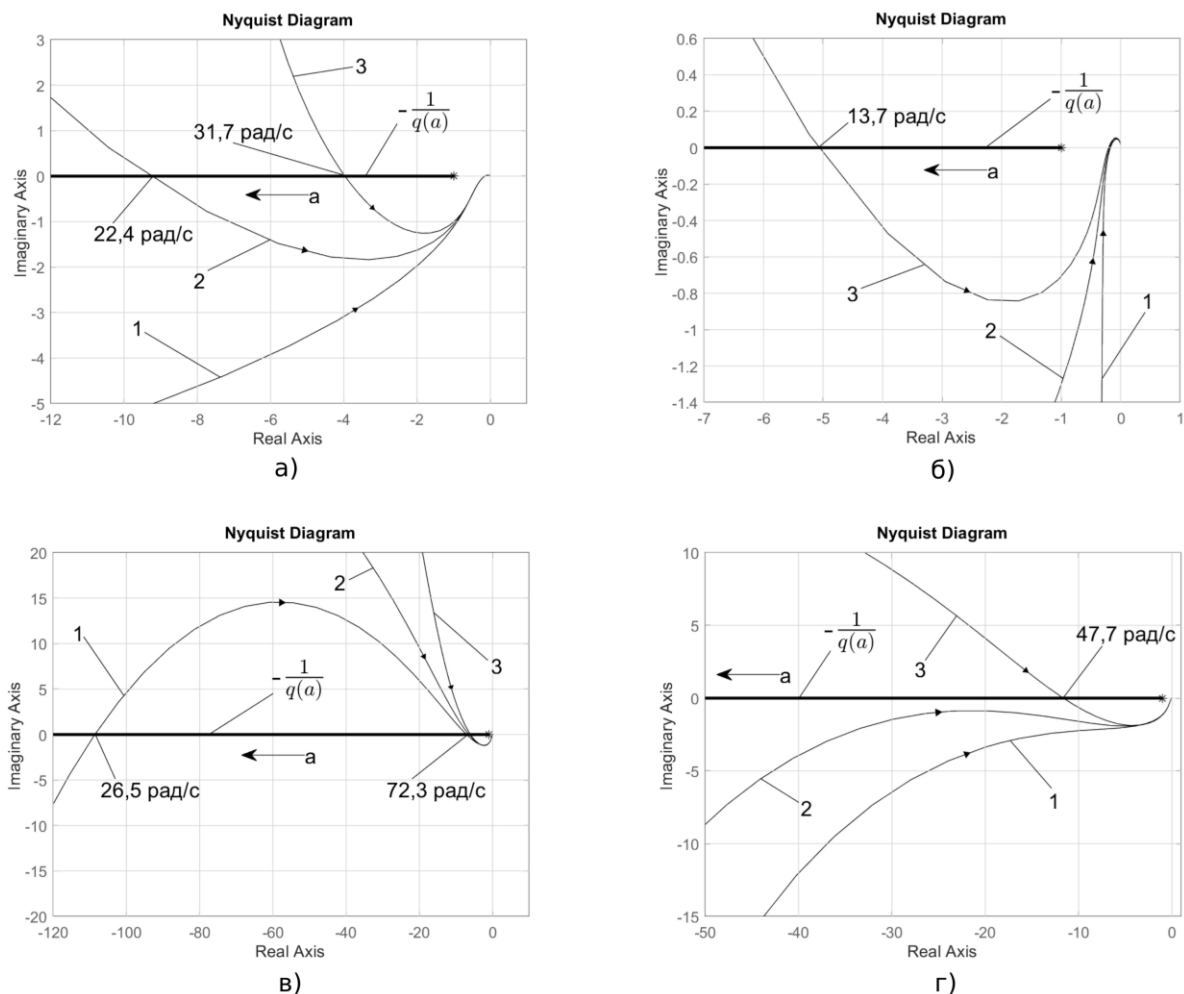


Рис. 3. Частотные характеристики линейных частей МС_{1,2,3} и нелинейных элементов при раздельном ограничении координат состояния: а – тока; б – скорости; в, г – напряжения

Полученные выражения ПФ приведены в таблице, где степени z младших членов их характеристических полиномов отражают количество интеграторов, не охваченных обратными связями, в разомкнутом контуре ЛЧ, т. е. фиксируют номер квадранта комплексной плоскости (при отсчете по часовой стрелке), из которого исходит амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) соответствующей ЛЧ при нулевой частоте.

Наглядное графическое представление взаимных расположений характеристик НЭ и ЛЧ на комплексной плоскости при раздельном ограничении основных координат состояния различных вариантов МС дают соответствующие фрагменты на рис. 3,а-г, где наличие точек пересечения характеристик указывает на возможность появления неблагоприятных автоколебаний.

Совокупный анализ полученных графических зависимостей, данных таблицы и структурного представления вариантов МС на рис. 1,б позволяет сделать важные наблюдения и выводы, которые целесообразно использовать для формирования требуемых процессов управления в условиях влияния как раздельно,

так и совместно действующих ограничителей координат состояния.

1. Возрастание количества интеграторов, включая естественный интегратор между скоростью и положением вала ЭД, способствует созданию условий для возникновения автоколебаний во всех вариантах исследуемых МС при раздельном ограничении каждой из основных координат состояния.

При этом наиболее неблагоприятным оказывается влияние ограничения напряжения при сохранении интегрирующего характера РТ (рис. 3,в), из-за чего может утрачиваться работоспособность даже статической версии МС₁.

Наименьшее дестабилизирующее влияние на работу следящих систем оказывает ограничение скорости ЭД (рис. 3,б), однако даже в этом случае в астатической версии МС₃ могут возникать опасные автоколебания.

2. Введение механизмов независимого (локального) «противонакопления» интеграторов в структурах РП и РТ соответственно при ограничениях скорости и напряжения (рис. 3,б,в) приводит к значительному снижению отрицательного фазового сдвига АФЧХ на всех частотах (на 180 и 90 град) и полностью исключает по-

явление автоколебаний при ограничениях скорости во всех вариантах МС, однако сохраняет возможность их возникновения при ограничениях напряжения в астатической МС₃ (рис. 3,г).

Кроме того, указанные решения не способны оказать положительное влияние на режимы ограничения тока (рис. 3,а), при наступлении которых варианты астатических МС_{2,3} также могут терять работоспособность.

3. Во всех режимах независимых ограничений координат состояния и локального «противонакопления» интегральных регулято-

ров можно гарантировать отсутствие автоколебаний и сохранение работоспособности только статического варианта МС₁ с пропорциональным РП.

4. При взаимодействии всех ограничителей координат в едином переходном процессе динамика нелинейных МС будет существенно зависеть от того, какое из ограничений наступит раньше. Наиболее благоприятной будет ситуация, когда прежде других наступает ограничение скорости, сопровождаемое «противонакоплением» всех интегральных элементов РП.

Передаточные функции ЛЧ различных вариантов МС

Тип регулятора положения	Передаточная функция
Ограничение тока	
П	$\frac{3,126 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s + 2,788 \cdot 10^{10}}{s^5 + 1023 \cdot s^4 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 6,493 \cdot 10^6 \cdot s^2}$
ПИ	$\frac{3,126 \cdot 10^7 \cdot s^3 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s^2 + 4,249 \cdot 10^{10} \cdot s + 3,359 \cdot 10^{11}}{s^6 + 1023 \cdot s^5 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^4 + 6,493 \cdot 10^6 \cdot s^3}$
ПИ ²	$\frac{3,126 \cdot 10^7 \cdot s^4 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s^3 + 5,711 \cdot 10^{10} \cdot s^2 + 8,479 \cdot 10^{11} \cdot s + 4,047 \cdot 10^{12}}{s^7 + 1023 \cdot s^6 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^5 + 6,493 \cdot 10^6 \cdot s^4}$
Ограничение скорости	
П	$\frac{1,213 \cdot 10^9 \cdot s + 2,788 \cdot 10^{10}}{s^5 + 1023 \cdot s^4 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 3,776 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 7,187 \cdot 10^8 \cdot s}$
ПИ	$\frac{1,213 \cdot 10^9 \cdot s^2 + 4,249 \cdot 10^{10} \cdot s + 3,359 \cdot 10^{11}}{s^6 + 1023 \cdot s^5 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^4 + 3,776 \cdot 10^7 \cdot s^3 + 7,187 \cdot 10^8 \cdot s^2}$
ПИ ²	$\frac{1,213 \cdot 10^9 \cdot s^3 + 5,711 \cdot 10^{10} \cdot s^2 + 8,479 \cdot 10^{11} \cdot s + 4,047 \cdot 10^{12}}{s^7 + 1023 \cdot s^6 + 2,739 \cdot 10^5 \cdot s^5 + 3,776 \cdot 10^7 \cdot s^4 + 7,187 \cdot 10^8 \cdot s^3}$
Ограничение напряжения (регулятор тока ПИ-типа)	
П	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 3,7 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s + 2,788 \cdot 10^{10}}{s^5 + 1023 \cdot s^4 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s^2}$
ПИ	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^4 + 3,7 \cdot 10^7 \cdot s^3 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s^2 + 4,249 \cdot 10^{10} \cdot s + 3,359 \cdot 10^{11}}{s^6 + 1023 \cdot s^5 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^4 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s^3}$
ПИ ²	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^5 + 3,7 \cdot 10^7 \cdot s^4 + 1,9 \cdot 10^9 \cdot s^3 + 5,711 \cdot 10^{10} \cdot s^2 + 8,479 \cdot 10^{11} \cdot s + 4,047 \cdot 10^{12}}{s^7 + 1023 \cdot s^6 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^5 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s^4}$
Ограничение напряжения (регулятор тока П-типа)	
П	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 3,126 \cdot 10^7 \cdot s + 1,213 \cdot 10^9}{s^4 + 1023 \cdot s^3 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s}$
ПИ	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 3,126 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 1,213 \cdot 10^9 \cdot s + 1,461 \cdot 10^{10}}{s^5 + 1023 \cdot s^4 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s^2}$
ПИ ²	$\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot s^4 + 3,126 \cdot 10^7 \cdot s^3 + 1,213 \cdot 10^9 \cdot s^2 + 2,923 \cdot 10^{10} \cdot s + 1,761 \cdot 10^{11}}{s^6 + 1023 \cdot s^5 + 2,373 \cdot 10^4 \cdot s^4 + 7,431 \cdot 10^5 \cdot s^3}$

Полученные результаты были подтверждены детализированным компьютерным моделированием рассмотренных вариантов следящих МС в указанных режимах функционирования.

Таким образом, можно констатировать, что известные технические решения не снимают всех проблем астатического следящего

управления МС в условиях ограничений основных координат состояния, что требует продолжения исследований в этом направлении.

Тем не менее полученные результаты анализа нелинейных систем могут быть использованы в качестве ориентиров при формировании более эффективных и универсальных алгоритмов управления «в большом» для всех

вариантов следящих МС в различных режимах ограничений координат состояния.

Ограничение тока (момента) и скорости ЭД. Как было отмечено выше, применение механизма локального «противонакопления» РП в режимах ограничения скорости способствует улучшению динамики астатических следящих МС_{2,3}. Как показано на рис. 1,б, анализатор скорости A_c , фиксируя достижение максимального уровня $\Omega_{\max}$, формирует управляющее воздействие на изменение структуры РП по каналу 1. При этом происходит отсоединение и обнуление входа каждого интегратора при сохранении имеющихся связей их выходов, как это выполнено, например, в [12, 14–16]. Регулятор переводится в пропорциональный режим, но интеграторы фиксируют накопленные ранее значения выходных сигналов, что облегчает обратный переход в линейную область работы после снижения скорости.

Указанные изменения структуры регуляторов легко реализуются как аппаратным, так и программным путем, а для компьютерного моделирования удобно использование готовых макроблоков «ПИ-регулятор с ограничением» (блок PID Controller с соответствующими настройками) программного комплекса MATLAB.

Однако в режимах ограничений тока, которые могут наступать независимо от уровня скорости из-за возмущений нагрузочного момента, а также возникать в начальных стадиях позиционирования и слежения, перестройка структуры РП с исключением интегрирующих элементов не происходит. Как было показано выше, это может привести к опасным автоколебаниям в астатических системах и потере их работоспособности. В качестве иллюстрации на рис. 4,а приведены результаты моделирования варианта МС₂ в режимах позиционирования и отработки возмущений нагрузки при ограничении уровня тока и относительно малых измене-

ниях скорости, которые подтверждают указанное опасение. Аналогичное моделирование, проведенное для системы МС₃, дает еще более неблагоприятные результаты.

Для решения выявленной проблемы предлагается включить в действие механизм «противонакопления» интеграторов РП не только при наступлении ограничений скорости, но и в режимах ограничения тока. В этом случае анализатор тока A_t (рис. 1,б), фиксируя достижения максимального значения $I_{\max}$, по схеме двойного логического ИЛИ, так же как анализатор A_c при ограничении скорости, инициирует изменение структуры РП по каналу 2, снижая число интегрирующих элементов в главном контуре управления положением.

Это позволяет обеспечить требуемую динамику нелинейных астатических МС при любой последовательности ограничений тока и скорости, что иллюстрируют соответствующие результаты сравнительного моделирования, приведенные на рис. 4,б.

Ограничение тока, скорости и напряжения ЭД. Являясь эффективным при ограничениях тока и скорости, предложенное выше техническое решение, как было показано, не позволяет исключить возникновение автоколебаний в астатических системах МС_{2,3}, если этим ограничениям будут предшествовать ограничения напряжения ЭД (рис. 3,в). Включение механизма локального «противонакопления» РП анализатором напряжения A_n по каналу 3 при достижении уставки $U_{\max}$ (рис. 1,б) решает проблему только для варианта МС₂, сохраняя возможность потери работоспособности для системы МС₃.

Соответствующие результаты моделирования этой системы при снижении уровня ограничения напряжения до $U_{\max} = 110$ В и повышении уровня ограничения тока до $I_{\max} = 180$ А приведены на рис. 5,а.

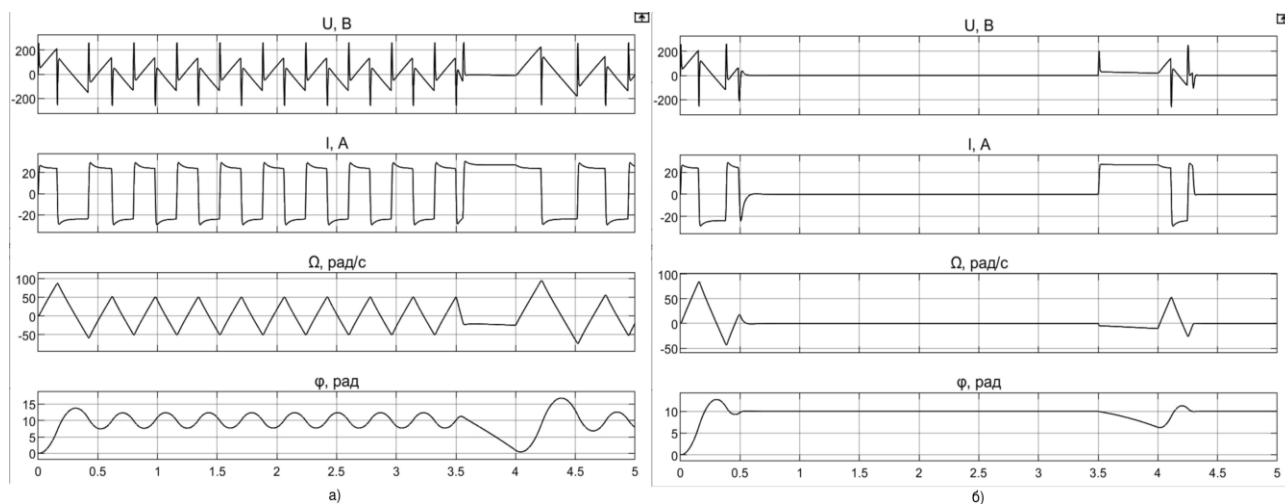


Рис. 4. Результаты моделирования МС₂ с независимым (а) и взаимосвязанным (б) «противонакоплением» РП

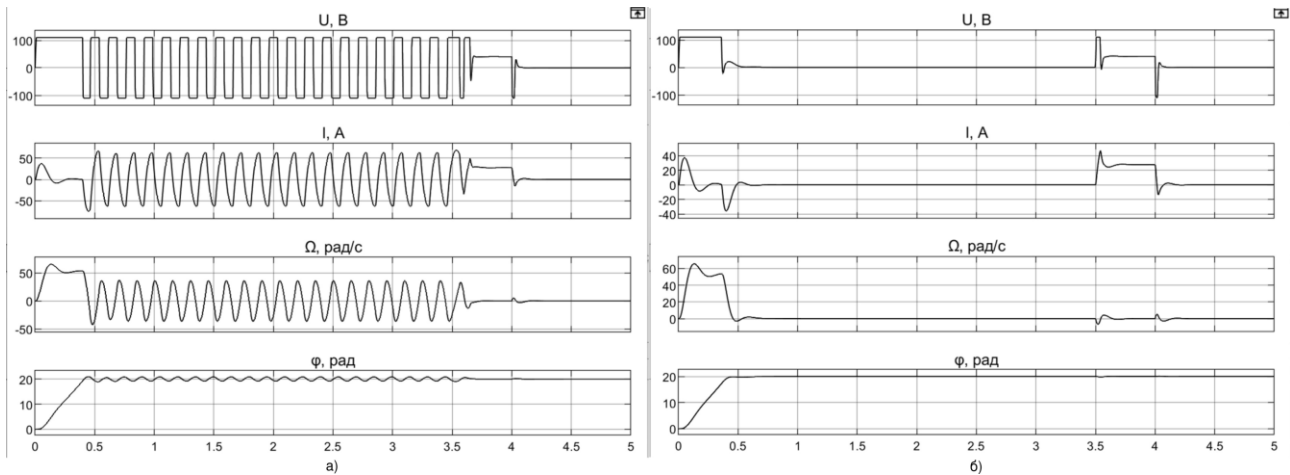


Рис. 5. Результаты моделирования МС₃ при отсутствии (а) и наличии (б) «противонакопления» РП в условиях ограничения напряжения

Безусловно, при правильном согласовании уровней ограничений координат в соответствии с уравнением ЭД

$$U_{\max} = C \Omega_{\max} + R_a I_{\max} + L_a \frac{dI}{dt},$$

где dI/dt – производная тока по времени t в режиме регулирования положения, можно исключить преждевременное срабатывание ограничения задающего и выходного напряжений СП и, как следствие, напряжения на двигателе.

Но стремление разработчиков обеспечить максимальные темпы слежения и позиционирования, а также возможные ошибочные действия настройщиков при вводе сложных систем в эксплуатацию вполне могут привести к нарушениям желаемой последовательности ограничений координат и возникновению тяжелых аварийных режимов низкочастотных автоколебаний координат большой амплитуды.

Для повышения надежности работы систем в непредвиденных ситуациях предлагается в дополнение к локальному «противонакоплению» и перестройке структуры РТ при ограничении напряжения одновременно включать механизм «противонакопления» интеграторов РП анализатором А_н по каналу 4 (рис. 1,б). Это предполагает изменение структуры РП по схеме тройного логического ИЛИ, т.е. ввода в состояние насыщения его интегральных элементов при возникновении ограничения любой из координат состояния – тока, скорости или напряжения.

Соответствующие результаты моделирования системы МС₃ с такой логикой управления при пониженной уставке напряжения и повышенной уставке тока до указанных выше значений, представленные на рис. 5,б, подтверждают надежное исключение автоколебаний в наиболее неблагоприятных условиях функционирования.

Важно отметить, что предложенные технические решения, демонстрирующие высокую

эффективность управления МС в широком диапазоне изменений координат состояния, могут быть достаточно просто реализованы программными средствами управляющих микропроцессорных контроллеров при небольших вычислительных затратах.

Имеющиеся аналогии структурного построения, функционирования, а также состава основных координат состояния МС указывают на возможность использования разработанных решений для эффективного позиционно-следящего управления ЭП как постоянного, так и переменного тока.

Особенности ограничений координат состояния при повышении быстродействия МС. Требование повышения быстродействия следящих МС может обеспечиваться снижением величины некомпенсированной постоянной времени контура тока (момента) выбором более динамичного силового преобразователя и последующей перенастройкой регуляторов других контуров управления. Так, снижение величины $T_{сп}$ до уровня 0,001 с при сохранении принятых ранее принципов настройки контуров управления позволяет получить следующие выражения передаточных функций используемых регуляторов:

$$H_T(s) = 1,455 \frac{0,0435 \cdot s + 1}{0,0435 \cdot s};$$

$$H_C(s) = 10,88;$$

$$H_{П1}(s) = 77,586;$$

$$H_{П2}(s) = 77,586 \frac{0,042 \cdot s + 1}{0,042 \cdot s};$$

$$H_{П3}(s) = 77,586 \frac{(0,042 \cdot s + 1)^2}{0,00176 \cdot s^2},$$

и обеспечить повышение быстродействия контуров тока и скорости до 6 и 13 мс, а контуров положения МС_{1,2,3} соответственно до 40, 90 и 200 мс.

Новые графики позиционирования и отработки момента нагрузки в линейной зоне работы всех вариантов систем при использовании префильтров с передаточными функциями (для позиционирования)

$$H_{\Phi 2}(s) = \frac{1}{0,042 \cdot s + 1},$$

$$H_{\Phi 3}(s) = \frac{1}{(0,042 \cdot s + 1)^2}$$

представлены на рис. 6. Они иллюстрируют повышение быстродействия всех вариантов МС при сохранении монотонного характера переходных процессов в области малых отклонений координат состояния.

Однако сравнительный анализ частотных характеристик новой версии МС₁ при ограничениях тока, скорости и напряжения (рис. 7, а, б, в, графики 1) с соответствующими характеристиками исходной МС₁ (рис. 3, а, б, г) показывает, что повышение быстродействия систем в линейной зоне работы сопровождается неблагоприятными деформациями частотных характеристик в направлениях роста колебательности при ограничениях тока и напряжения даже после исключения всех интегральных

элементов регуляторов из процессов формирования управления.

Это наглядно иллюстрируют временные характеристики на рис. 8, а, полученные при моделировании быстродействующей версии МС₃.

Для устранения указанного недостатка предлагается осуществлять дополнительную безынерционную ступенчатую коррекцию петлевого усиления контура положения в моменты срабатывания ограничений тока и напряжения (по схеме двойного логического ИЛИ) соответствующим корректирующим каналом (КК), как это показано на рис. 1, б. При этом появление безынерционного замкнутого контура («алгебраической петли») в системе управления исключается введением блока задержки сигнала на малый такт квантования времени в структуре КК.

Эффективность предложенного решения подтверждается частотными характеристиками быстродействующей МС₁ (рис. 7, а, в, графики 1*) и результатами моделирования быстродействующей МС₃ (рис. 8, б) с пятикратным снижением петлевого усиления контура положения в моменты действия ограничений тока и напряжения ЭД.

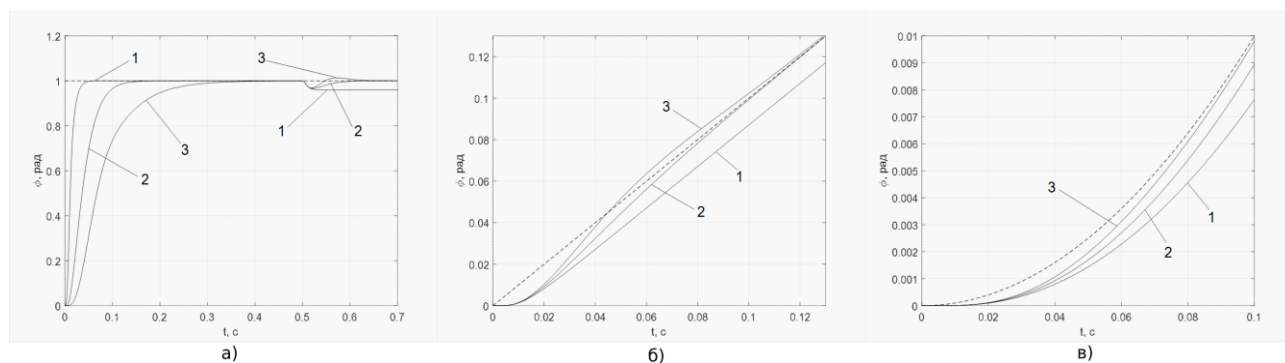


Рис. 6. Графики позиционирования и отработки возмущения быстродействующих МС

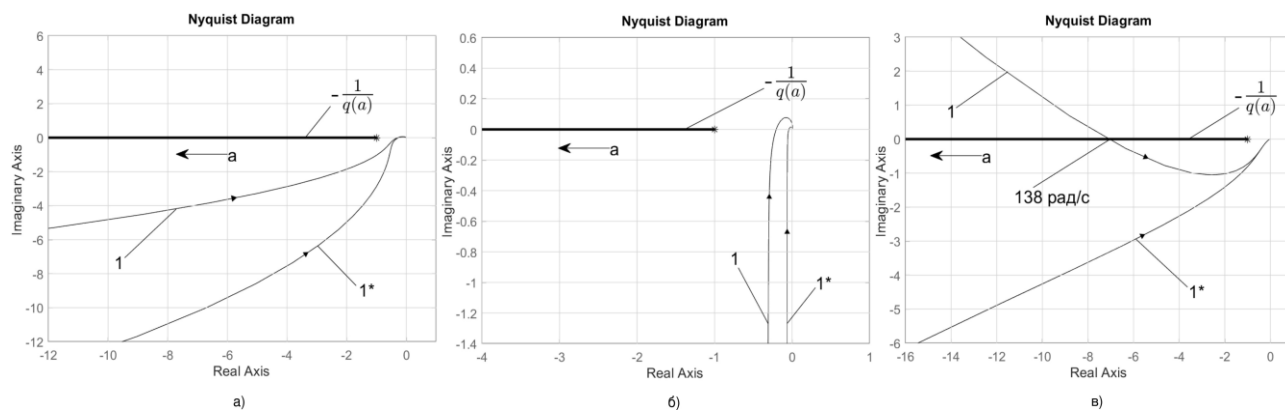


Рис. 7. Частотные характеристики быстродействующей МС₁ при ограничениях тока (а), скорости (б) и напряжения (в)

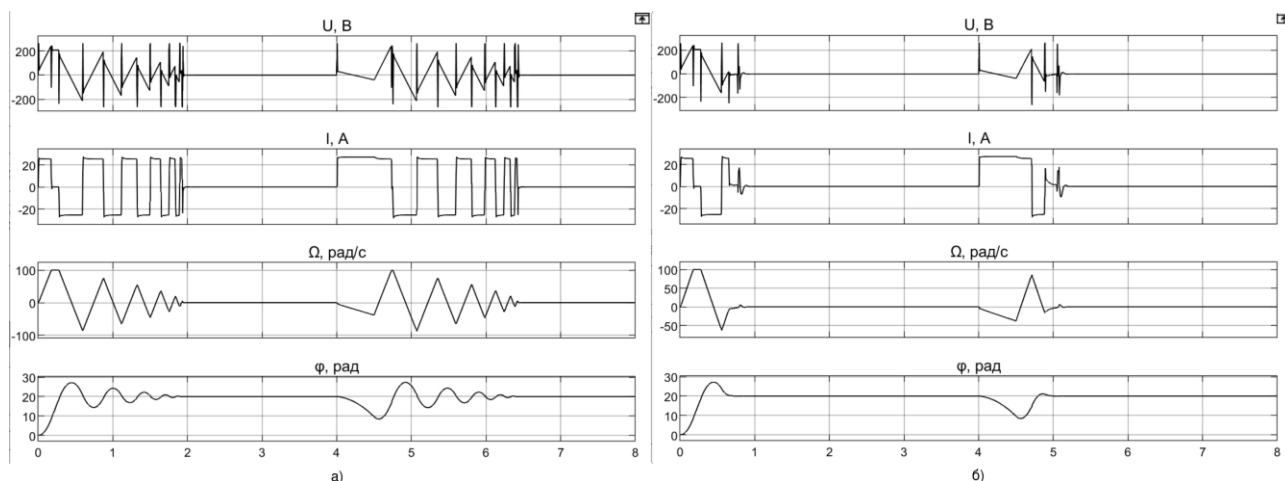


Рис. 8. Результаты моделирования быстродействующей МС₃ при отсутствии (а) и наличии (б) механизма коррекции петлевого усиления контура положения

Кроме того, быстродействующая версия МС₃ оказывается еще более уязвимой в случае использования только локального «противонакопления» РТ при достижении уставки $U_{\max}$. Опасные автоколебания в этом случае возникают при снижении уровня ограничения напряжения до $U_{\max} = 176$ В и повышении уровня ограничения тока до $I_{\max} = 47$ А.

Таким образом, стремление повысить быстродействие следящих МС в линейной зоне работы может привести к необходимости определенного усложнения алгоритма управления в области ограничений координат состояния для сохранения работоспособности и показателей качества систем при влиянии нелинейностей.

Выводы. Наличие нелинейных элементов ограничения координат состояния следящих МС может приводить к неблагоприятным автоколебаниям и потере работоспособности даже при высоком качестве управления в линейной области малых изменений сигналов. Проблема особенно обостряется при повышении степени астатизма систем и соответствующем возрастании количества интегрирующих элементов в контуре управления угловым положением ЭД.

Применение известных технических решений в виде установки статических элементов «ограничение» на выходах регуляторов положения и скорости в структуре подчиненного регулирования координат, а также использование механизмов локального «противонакопления» сигналов интегрирующих элементов этих регуляторов не в полной мере решает проблему, сохраняя возможность появления автоколебаний и потери работоспособности астатических версий следящих систем.

Детализированное исследование динамики различных вариантов МС, выполненное методом гармонической линеаризации нелинейностей, дает важные результаты для фор-

мирования требуемых процессов управления в условиях влияния как раздельного, так и совместного действия ограничений координат.

Для повышения качества работы и надежного исключения аварийных ситуаций в различных режимах функционирования следящих МС эффективными оказываются включение механизмов «противонакопления», т.е. изменение структуры каждого регулятора с интегрирующими элементами, при ограничении соответствующей координаты, а также принудительное насыщение всех интегрирующих элементов регулятора положения при наступлении режима ограничения любой из контролируемых координат состояния исполнительного ЭД – тока, скорости или напряжения. В системах повышенного быстродействия целесообразно применение дополнительной безынерционной коррекции петлевого усиления контура положения при возникновении ограничений тока и напряжения ЭД.

Список литературы

1. **Следящие** приводы: в 3 т. Т. 1: Теория и проектирование следящих приводов / Е.С. Блейз, А.В. Зимин, Е.С. Иванов и др.; под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 904 с.
2. **Справочник** по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
3. **Ключев В.И.** Теория электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
4. **Усынин Ю.С.** Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
5. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
6. **Электротехника:** учеб. пособие для вузов: в 3 кн. Кн. III. Электроприводы. Электроснабжение / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 639 с.

7. Масандилов Л.Б. (ред.). Машиностроение. Энциклопедия. Электроприводы. Т. IV-2. – М.: Машиностроение, 2012. – 520 с.

8. Проектирование систем сопровождения и приводов наведения и стабилизации комплексов вооружения: учеб. пособие / М.В. Грязев, И.В. Степанчев, Н.И. Хохлов и др. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 245 с.

9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

10. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 168 с.

11. Боровиков М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1980. – 290 с.

12. Калачев Ю.Н., Самохвалов Д.В. Основы регулируемого электропривода. – М.: ДМК Пресс, 2024. – 256 с.

13. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.

14. Johnson M.A., Moradi M.H. PID Control. New Identification and Design Methods. – London: Springer, 2005. – P. 543.

15. Hippe P. Windup in Control. It's Effects and Their Prevention. – London: Springer, 2006. – P. 315.

16. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Управление следящим электроприводом при наличии зазора в кинематической передаче высокой степени жесткости // Электротехника. – 2022. – № 1. – С. 17–27.

References

1. Chemodanov, B.K. (ed.) *Sledyashchie privody: v 3 t., t. 1. Teoriya i proektirovanie sledyashchikh privodov* [Tracking drives in 3 vols., vol. 1. Theory and design of tracking drives]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 1999. 904 p.

2. Eliseev, V.A., Shinyanskiy, A.V. (eds.) *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Reference book of automated electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 616 p.

3. Klyuchev, V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 2001. 704 p.

4. Usynin, Yu.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electronic drives]. Chelyabinsk: Izdatel'stvo YUUrGU, 2004. 328 p.

5. Terekhov, V.M., Osipov, O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electronic drives]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 304 p.

6. Butyrin, P.A., Gafiyatullin, R.Kh., Shestakov, A.L. (reds.) *Elektrotehnika v 3 kn., kn. III: Elektroprivody. Elektrosnabzhenie* [Electrical Engineering in 3 books, book III: Electric drives. Power supply]. Chelyabinsk: Izdatel'stvo YUUrGU, 2005. 639 p.

7. Masandilov, L.B. (ed.) *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Elektroprivody. T. IV-2* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Electric drives. Vol. IV-2]. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 520 p.

8. Gryazev, M.V., Stepanichev, I.V., Khokhlov, N.I., Ignatov, A.V., Fimushkin, V.S. *Proektirovanie sistem soprovozhdeniya i privodov navedeniya i stabilizatsii kompleksov vooruzheniya* [Design of tracking systems and guidance and stabilization drives for weapon systems]. Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2010. 245 p.

9. Basharin, A.V., Novikov, V.A., Sokolovskiy, G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Electric drive control]. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie, 1982. 392 p.

10. Kochergin, V.V. *Sledyashchie sistemy s dvigatelem postoyannogo toka* [Tracking systems with a DC motor]. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1988. 168 p.

11. Borovikov, M.A. *Raschet bystrodeystvuyushchikh sistem avtomatizirovannogo elektroprivoda i avtomatik* [Design of high-speed systems of automated electric drive and automation]. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 1980. 290 p.

12. Kalachev, Yu.N., Samokhvalov, D.V. *Osnovy reguliruemogo elektroprivoda* [Fundamentals of controlled electric drive]. Moscow: DMC Press, 2024. 256 p.

13. Krupovich, V.I., Barybin, Yu.G., Samo-ver, M.L. (eds.) *Spravochnik po proektirovaniyu avtomatizirovannogo elektroprivoda i sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Reference book of the design of automated electric drive and process control systems]. Moscow: Energoizdat, 1982. 416 p.

14. Johnson, M.A., Moradi, M.H. PID Control. New Identification and Design Methods. London: Springer, 2005, p. 543.

15. Hippe, P. Windup in Control. It's Effects and Their Prevention. London: Springer, 2006, p. 315

16. Tararykin, S.V., Apolonskiy, V.V. Upravlenie sledyashchim elektroprivodom pri nalichii zazora v kine-maticheskoy peredache vysokoy stepeni zhestkosti [Control of a tracking drive in the presence of backlash in a high-stiffness kinematic transmission]. *Elektrotehnika*, 2022, no. 1, pp. 17–27.