

УДК 621.79.01:681.51

doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-24-33

# Финитное управление приводами установок для ультраструйной обработки и диагностики материалов<sup>\*</sup>

**В.П. Казанцев, С.В. Бочкарев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## Finite Control of Actuators of Machines for Ultra-Jet Processing and Diagnostics of Materials

**V.P. Kazantsev, S.V. Bochkarev**

Perm National Research Polytechnic University

Рассмотрены вопросы синтеза квазиоптимальных по быстродействию и точности подсистем управления головкой ультраструйной обработки материалов с ограничением управляющего воздействия на допустимом уровне. Отмечено, что обеспечение быстродействия и точности формирования режимных параметров оказывает непосредственное влияние на достоверность оценки и интерпретацию показателей качества процесса ультраструйной обработки материалов и изделий, а также на их диагностику. Выполнен анализ известных подходов к синтезу оптимальных по ряду критериев качества систем управления приводами, базирующихся на расположении корней характеристического уравнения замкнутого контура, обеспечивающих предельные или квазиоптимальные по критерию быстродействия процессы. Показано, что синтез таких систем целесообразно осуществлять на основе применения дискретного финитного управления приводами установки с оптимально изменяемым периодом дискретизации и методологии модельного прогнозирующего управления. Предложен формальный критерий оптимальности и приведен пример структурного синтеза квазифинитной системы управления приводом перемещения ультраструйной головки с ограничением управляющего воздействия. Представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** ультраструйная обработка, диагностика материалов, синтез систем управления, управление приводами, финитное управление

This paper deals with the issues of synthesis of suboptimal systems with regard to speed and accuracy that control the ultra-jet processing head with an acceptable control level restriction. It is noted that the provision of speed and accuracy of the operating parameters directly effects the reliability of evaluation and interpretation of quality indicators of ultra-jet processing and diagnostics of materials and products. The authors conduct an analysis of existing approaches to synthesis of the optimal drive control system taking into account a number of quality criteria based on the location of the roots of the characteristic closed-loop equation, providing limit and suboptimal performance processes. It is shown that synthesis of such systems should be based on the application of discrete finite control of machine actuators with an optimal adjustable sampling period and the methodology of model predictive control. A formal optimality criterion is proposed, and an example of structural synthesis of a quasi-finite control system for the actuator of movement of the ultra-jet head

<sup>\*</sup> Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 18-29-18081.

with a control level restriction is given. The results of simulation that confirm the effectiveness of the proposed approach are provided.

**Keywords:** ultra-jet materials processing, diagnostics of materials, synthesis of control systems, drive control, finite control

Программно-техническое и технологическое обеспечение процессов ультраструйной обработки (УСО) материалов и изделий, выполненных из них, определяется прежде всего функциональным назначением установки УСО. Как показал анализ, область применения технологии УСО материалов весьма широка и продуцирует, в частности, решение задач оптимизации ультраструйного жидкостного или гидроабразивного резания, очистки поверхностей разного рода изделий [1, 2], а также ультраструйной диагностики (УСД) материалов и изделий [2–5].

К режимным параметрам процессов УСО (условиям эксперимента при диагностике), как правило, относят параметры струи жидкости и ее насыщение абразивными материалами, координаты позиционирования ультраструйной головки относительно координатного стола с изделием, значения абсолютных или относительных скоростей их движения [5, 6]. Большую часть режимных параметров определяют на стадии технологической подготовки производства и формулируют с учетом требований статической и динамической точности поддержания каждого из них в процессе отработки приводами установки УСО программы, заложенной в систему числового программного управления.

Вместе с тем при анализе эффективности процесса УСО и УСД, как правило, пренебрегают влиянием отклонений режимных параметров от заданных значений, полагая, что процессы отработки заданий приводами идеальны как в статике, так и в динамике. Однако функциональные и энергетические возможности обеспечивающих подсистем любой системы автоматического управления (САУ) ограничены, что приводит к погрешностям оценки качества УСО и УСД материалов и изделий и тем самым к неадекватным выводам.

Цель работы — оптимальный синтез электромеханических подсистем рассматриваемых установок, обеспечивающих повышенные показатели быстродействия и точности формирования режимных параметров движения ультраструйной головки при заданных ограничениях управляющих воздействий на приводы.

При этом режимные параметры обеспечивающих подсистем могут быть локализованы в

классе достаточно простых систем стабилизации, например, стабилизации скорости перемещения ультраструйной головки в направлении одной из ортогональных осей, связанных с некоторой инерциальной системой координат.

Однако при сложном плоском или пространственном движении ультраструйной головки или обрабатываемого изделия реализуют обычно программное или программно-следящее взаимосвязанное управление по нескольким координатным осям. При относительно больших приращениях задания позиции или скорости перемещения ультраструйной головки по каждой из осей неизбежно происходит ограничение фазовых переменных механического движения — скорости, ускорения и рывка.

Далее, абстрагируясь от функционального назначения установки УСО, будем оперировать общепринятым в теории управления обобщенным понятием «САУ».

Требования ограничения переменных САУ (и прежде всего, управляющего воздействия) формулируют ко всем системам независимо от характера решаемых задач — стабилизации, программно-временного, следящего или позиционно-траекторного управления [7–9]. Все эти режимы работы допускают возможность выхода управления на режим ограничения, что приводит к нелинейности модели САУ и, соответственно, к проблемам синтеза управления.

Вопросы отрицательного влияния ограничения энергии управления на устойчивость и качество САУ достаточно хорошо изучены [7, 8]. Существуют работы [10], посвященные исследованию ухудшения качества САУ вследствие накопления ошибки регулирования при наличии интегральной компоненты управления.

Для кардинального решения проблемы влияния ограничения координаты управления на качество и устойчивость САУ разработчики используют, как правило, типовые и структурно-параметрические методы синтеза систем подчиненного каскадного регулирования с возможностями параметрирования типовых ПИ-, ПИД-регуляторов класса «вход–выход» [7–10].

Однако многоконтурность САУ ведет к существенному снижению быстродействия и увеличению динамической ошибки формирования

выходной переменной в любом из перечисленных режимов работы. Вопросы синтеза оптимальных по состоянию систем с ограничением управления, в частности модальных САУ [7, 8], к настоящему времени не получили должного решения в приводных системах, что во многом сдерживает наращивание их качественных показателей.

Вместе с тем фундаментальные исследования в области САУ и функциональные возможности микропроцессорных средств автоматизации за последние два десятилетия достигли колоссального уровня [8, 11–14]. Это позволяет реализовать значительно более эффективные алгоритмы оптимального по быстродействию и точности нелинейного управления САУ с ограничением управления в режиме реального времени, существенно снизить погрешности формирования режимных параметров и, как следствие, повысить достоверность оценки их влияния на качество обработки или диагностики материалов и изделий.

**Постановка задачи синтеза САУ с ограничением управления.** В теории управления параметрами механического движения общеприняты допущения о линейности моделей функциональных элементов объекта управления (ОУ), а задачу синтеза по критерию быстродействия и точности функционирования САУ формулируют с учетом наложенных ограничений. Причем при решении задач программно-следящего управления задают также требования обеспечения инвариантности САУ к внешним воздействиям [8, 15].

Методы оптимального синтеза в классе линейной теории SISO-управления (Single Input Single Output) [7, 8] базируются на задании прямых оценок качества замкнутого контура регулирования в функции времени или параметра характеристического полинома передаточной функции, являющегося функцией времени. В частности, в теории электромеханических систем управления [15–17] применяют

понятие «эквивалентная малая постоянная времени контура регулирования  $T_\mu$ ». Характеристические полиномы замкнутых контуров регулирования объектами первого–четвертого порядка представляют соответственно в виде

$$T_\mu s + 1 = 0; \quad (1)$$

$$4T_\mu s^2 + 4T_\mu s + 1 = 0; \quad (2)$$

$$2T_\mu s^2 + 2T_\mu s + 1 = 0; \quad (3)$$

$$8T_\mu^3 s^3 + 8T_\mu^2 s^2 + 4T_\mu s + 1 = 0, \quad (4)$$

где  $s$  — оператор Лапласа.

При этом оперируют понятиями настроек контуров регулирования, в частности, настройками на апериодический оптимум первого (1) или второго (2) порядка, на технический (3), симметричный (4) оптимумы и т. п. Следовательно, качество настроек контуров определяется числовыми наборами настроечных параметров и величиной  $T_\mu$ , однозначно характеризующей быстродействие контуров регулирования.

В теории и практике синтеза SISO-управления широко распространено представление оптимальных характеристических полиномов замкнутых контуров регулирования по Баттерворту или по Ньютону [7, 8], к примеру, через радиус  $q$  расположения корней и относительное время переходных процессов  $t_{пq}$ , где  $t_{п}$  — желаемое время переходного процесса с зоной установления процессов, равной 5 % (см. таблицу).

При синтезе модальных систем управления обычно оперируют понятиями «распределение корней на комплексной плоскости» и «среднегеометрический корень  $\Omega$ », определяющими желаемое быстродействие и качество САУ [8]. В частности, полиномы замкнутых контуров регулирования для объектов первого–четвертого порядка с биномиальным распределением корней по Ньютону соответственно имеют вид

$$s + \Omega = 0; \quad (5)$$

$$s^2 + 2\Omega s + \Omega^2 = 0; \quad (6)$$

#### Характеристические полиномы оптимальных САУ

Характеристический полином по Баттерворту	$t_{пq}$	Характеристический полином по Ньютону	$t_{пq}$
$p + q$	3,0	$p + q$	3,00
$p^2 + 1,41qp + q^2$	4,8	$p^2 + 2qp + q^2$	4,50
$p^3 + 2qp^2 + 2q^2p + q^3$	6,0	$p^3 + 3qp^2 + 3q^2p + q^3$	6,25
$p^4 + 2,6qp^3 + 3,4q^2p^2 + 2,6q^3p + q^4$	7,8	$p^4 + 4qp^3 + 6q^2p^2 + 4q^3p + q^4$	7,00

$$s^3 + 3\Omega s^2 + 3\Omega^2 s + \Omega^3 = 0; \quad (7)$$

$$s^4 + 4\Omega s^3 + 6\Omega^2 s^2 + 4\Omega^3 s + \Omega^4 = 0, \quad (8)$$

где  $\Omega = 1/T$  — среднегеометрическая частота,  $s^{-1}$ , соответствующая вещественному корню  $s = -1/T$  ( $T$  — параметр времени (ПВ), обратно пропорциональный  $\Omega$ ).

В системах оптимального быстродействия [7, 8] ПВ  $t$  входит непосредственно в критерий оптимизации

$$J = \int_0^{\infty} dt \rightarrow t_{\min}, \quad (9)$$

где  $t_{\min}$  — минимальное время переходного процесса.

В дискретных системах финитного управления (ФУ) [8, 16] критерий (9) преобразуется к виду

$$J = \int_0^{\infty} dt \rightarrow nT_{\text{opt}}. \quad (10)$$

где  $n$  — порядок модели ОУ;  $T_{\text{opt}}$  — период дискретизации сигналов управления как ПВ, определяющий желаемое (оптимальное) быстродействие САУ.

Построим цепочку умозаключений в форме вербальных логических предикатов, позволяющих сформулировать задачу синтеза САУ приводами при ограничении управления:

- в выражениях (1)–(10) ПВ ( $T_{\mu}$ ,  $t_{\text{п}}$ ,  $\Omega$  и т. п.) характеризует быстродействие САУ, а значит, варьированием ПВ в настройках регуляторов САУ можно обеспечить требуемое быстродействие замкнутого контура регулирования;

- быстродействие САУ непосредственно связано с энергией управления, поэтому изменением ПВ можно влиять на ограничение управляющего воздействия в процессе его отработки системой, а следовательно, существует такое значение ПВ, принимаемое в дальнейшем за оптимальное, при котором в переходном процессе управление выходит на ограничение хотя бы в одной точке;

- возникновение режима работы САУ на ограничении зависит от начального состояния ОУ и величины аддитивных воздействий на объект, вследствие чего их необходимо учитывать при оптимизации ПВ;

- существование ограниченных множеств начальных состояний ОУ и внешних воздействий продуцирует ограниченное множество значений ПВ, позволяющее его использовать

при выработке оптимального управляющего воздействия с ограничением;

- в силу того что ФУ обеспечивает квази-оптимальное (близкое к предельному) быстродействие при произвольных начальных условиях, по крайней мере, в зоне малых отклонений переменных объекта, в дальнейшем будем полагать, что для линейризованного ОУ  $n$ -го порядка целесообразно реализовать именно ФУ.

Критерий максимального быстродействия (10) в концепции ФУ предполагает, что при значениях периода  $T_{\text{opt}}$  дискретного управления время оптимального управления не будет превышать  $nT_{\text{opt}}$ . Однако при ограничении управления число периодов ФУ становится больше  $n$  и заведомо неизвестным.

Кроме того, как показывают исследования [15–17], в зависимости от начального состояния ОУ и внешних воздействий на ОУ ограничение управления может наступить не на первом, а на любом из  $n$  тактов дискретного управления в отличие от систем предельного быстродействия, в которых ограничение управления происходит уже на первом такте дискретизации. С другой стороны, при попадании в «зону пропорциональности» (линейности) оптимальное ФУ может завершиться за время, меньшее чем  $nT_{\text{opt}}$ , причем для «удачных» сочетаний значений переменных, входящих в алгоритм управления по состоянию, может оказаться достаточным всего одного такта управления.

Оптимальное управление предполагает, что любой участок оптимальной по некоторому критерию качества траектории движения САУ оптимален по тому же критерию качества. А это продуцирует важный для синтеза ФУ вывод: если один из периодов оптимальной траектории сопровождается выходом управления на режим ограничения, то и он принадлежит к оптимальной траектории относительно данного критерия оптимальности. Заметим, что в этой постановке задачи синтеза становится неважным, которым по счету будет период насыщения ФУ в последовательности дискретных управлений из  $n$  тактов выработки управляющих воздействий на ОУ.

Таким образом, для синтеза САУ ставится задача расчета на каждом такте ФУ такого периода его существования, который обеспечивал бы на одном из последующих  $n$  периодов ограничение управления на уровне максимально допустимого значения до достижения системой

зоны линейности, где будет выполняться критерий (10). Предлагается решение этой задачи искать в классе систем с модельным прогнозирующим управлением [8, 13].

**Модель движения приводов и синтез управления.** Пусть модель одномерной дискретно-непрерывной САУ, например подсистемы позиционирования ультразвуковой головки по оси  $X$ , представлена в векторно-матричном виде [15–17]

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t), \quad (11)$$

где  $\mathbf{X}(t)$ ,  $\mathbf{U}(k)$ ,  $\mathbf{F}(t)$  — векторы состояния, дискретного управления и аддитивного возмущения, действующего на ОУ, размера  $n \times 1$ ,  $1 \times 1$ ,  $f \times 1$  соответственно;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  — матрицы постоянных коэффициентов размера  $n \times n$ ,  $n \times t$  и  $n \times f$  соответственно.

В общем случае уравнение состояния (11) может быть дополнено уравнением выхода [7, 8].

Будем полагать, что дискретное SISO-управление ( $m = 1$ ) может быть представлено нестационарной функцией переменных ОУ в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(k) = & \mathbf{U}(k) = \mathbf{K}_X(T(k))\mathbf{X}(k) + \\ & + \mathbf{K}_X^*(T(k))\mathbf{X}^*(k) + \mathbf{K}_F(T(k))\mathbf{F}(k), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $k$  — номер такта дискретного управления с изменяемым периодом,  $k \in (1, \infty)$ ;  $\mathbf{U}(k)$  — формальное представление скалярного управления;  $\mathbf{K}_X(T(k))$  — матрица-строка размера  $1 \times n$  изменяющихся во времени коэффициентов конечного регулятора, отвечающая за финитное свободное движение;  $T(k)$  — период дискретного управления, меняющийся в  $k$ -е моменты времени выработки управления и являющийся результатом оптимизационной процедуры синтеза;  $\mathbf{X}(k)$  — фактическое значение компонент вектора состояния в  $k$ -й момент времени дискретного управления, полученных на основе измерения/наблюдения переменных состояния ОУ, сформированных с помощью устройств выборки-хранения и синхронной записи цифровой информации в параллельные регистры памяти,  $\mathbf{X}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ ,  $\mathbf{X}(k) \in \mathbf{X}^n$ ;  $\mathbf{K}_X^*(T(k))$  — матрица размера  $1 \times t$  переменных во времени коэффициентов, отвечающая за оптимальное вынужденное движение под действием аддитивных задающих воздействий;  $\mathbf{X}^*(k)$  — заданное значение вектора состояния, сформированное в  $k$ -й момент времени,  $\mathbf{X}^*(k) = [x_1^*(k), x_2^*(k), \dots, x_n^*(k)]^T$ ,

$\mathbf{X}^*(k) \in \mathbf{X}^n$  (примечание: для систем стабилизации достаточно иметь одну компоненту вектора задающих воздействий, а именно — задание выходной переменной  $x_1^*(k)$ , однако для придания качеств инвариантности к задающим воздействиям в программно-временных и следящих САУ целесообразно обеспечить задание дополнительных фазовых переменных  $x_2^*(k), x_3^*(k), \dots, x_n^*(k)$ );  $\mathbf{K}_F(T(k))$  — матрица размера  $1 \times f$  переменных во времени коэффициентов, отвечающая за оптимальное вынужденное движение под действием аддитивных возмущающих воздействий;  $\mathbf{F}(k)$  — вектор аддитивных возмущений объекта в  $k$ -й момент времени, сформированный аналогично вектору состояния (при условии возможности измерения/наблюдения, в противном случае он равен нулю),  $\mathbf{F}(k) = [f_1(k), f_2(k), \dots, f_f(k)]^T$ ,  $\mathbf{F}(k) \in \mathbf{F}^f$ ;  $\mathbf{X}^n, \mathbf{F}^f$  — допустимые множества координат состояния САУ и аддитивных возмущений.

В контексте постановки задачи синтеза с учетом заданной структуры (12) управления запишем критерий (10) оптимального ФУ объектом в виде обобщенного логического предиката:

$$\begin{aligned} \forall (S \in \text{LTI}, k \in (1, \infty), \mathbf{X}^*(k) \in \mathbf{X}^n, \mathbf{X}(k) \in \mathbf{X}^n, \\ \mathbf{F}(k) \in \mathbf{F}^f, U_{\max}) \rightarrow \exists (T(k) \in (0, \infty)): \end{aligned} \quad (13)$$

$$(U(k) \approx U_{\max}), T(k) \Rightarrow T_{\text{opt}}(k),$$

где  $S$  — модель линеаризованного объекта  $n$ -го порядка, относящаяся к одной из форм представления линеаризованных САУ — LTI-систем [8];  $U_{\max}$  — модуль заданного максимально допустимого управления (в общем случае можно задаться минимальным и максимальным значениями предельно допустимых управлений с учетом знака);  $T_{\text{opt}}(k)$  — оптимальное значение периода управления в  $k$ -й дискретный момент времени, являющееся результатом оптимизационной процедуры синтеза,  $0 < T_{\text{opt}}(k) < \infty$ .

Заметим, что критерий (13) не требует минимизации времени переходного процесса, а предполагает решение оптимизационной задачи нахождения  $T_{\text{opt}}(k)$  на ограничениях  $|U(k)| \leq U_{\max}$  в каждый момент времени выработки дискретного управления.

Полагая, что на каждом такте дискретного ФУ существует численное значение периода, приводящее к насыщению управления на одном из  $n$  последующих дискретных управлений,

сформируем частный логический предикат для оптимизации прогнозного управления:

$$\forall (k \in (1, \infty)) \exists (h \in (1, n)) \wedge T_{\text{opt}}(k, h) \in (0, T_{\text{max}}):$$

$$|U(k)| = U_m(k, h) \approx U_{\text{max}},$$

где  $h$  — номер варьируемого прогнозного периода ФУ, отсчитываемый от момента времени формирования  $k$ -го такта управления,  $h = 1, 2, \dots, n$ ;  $T_{\text{max}}$  — максимальное значение периода ФУ, выбираемое из условия существования линейной зоны работы САУ, т. е.  $|U(k)| \leq U_{\text{max}}$  для любого сочетания компонент переменных, входящих в выражение (12);  $U_m(k)$  — максимальное по модулю значение управляющего воздействия, сформированного в  $k$ -й момент времени и представляющего собой экстремум

управлений, сформированных на  $n$  последующих тактах ФУ,  $U_m(k) \in (U_m(k, h))$ .

Так как множества переменных САУ, включая управление, ограничены, период дискретного управления  $T(k)$  будет ограничен снизу минимальным значением, т. е.  $T_{\text{min}} \leq T(k) \leq T_{\text{max}}$ . Обоснование выбора  $T_{\text{min}}$  является самостоятельной многокритериальной задачей исследований. В частности, необходимо учитывать, что в квазиустановившихся состояниях

$$\forall ((X^*(k) - X(k)) < \Delta X(k)) \exists (k \in (n+1, \infty)): \quad (14)$$

$$T_{\text{opt}}(k) \approx T_{\text{min}},$$

где  $\Delta X(k)$  — отклонения координат состояния ОУ от заданных значений.

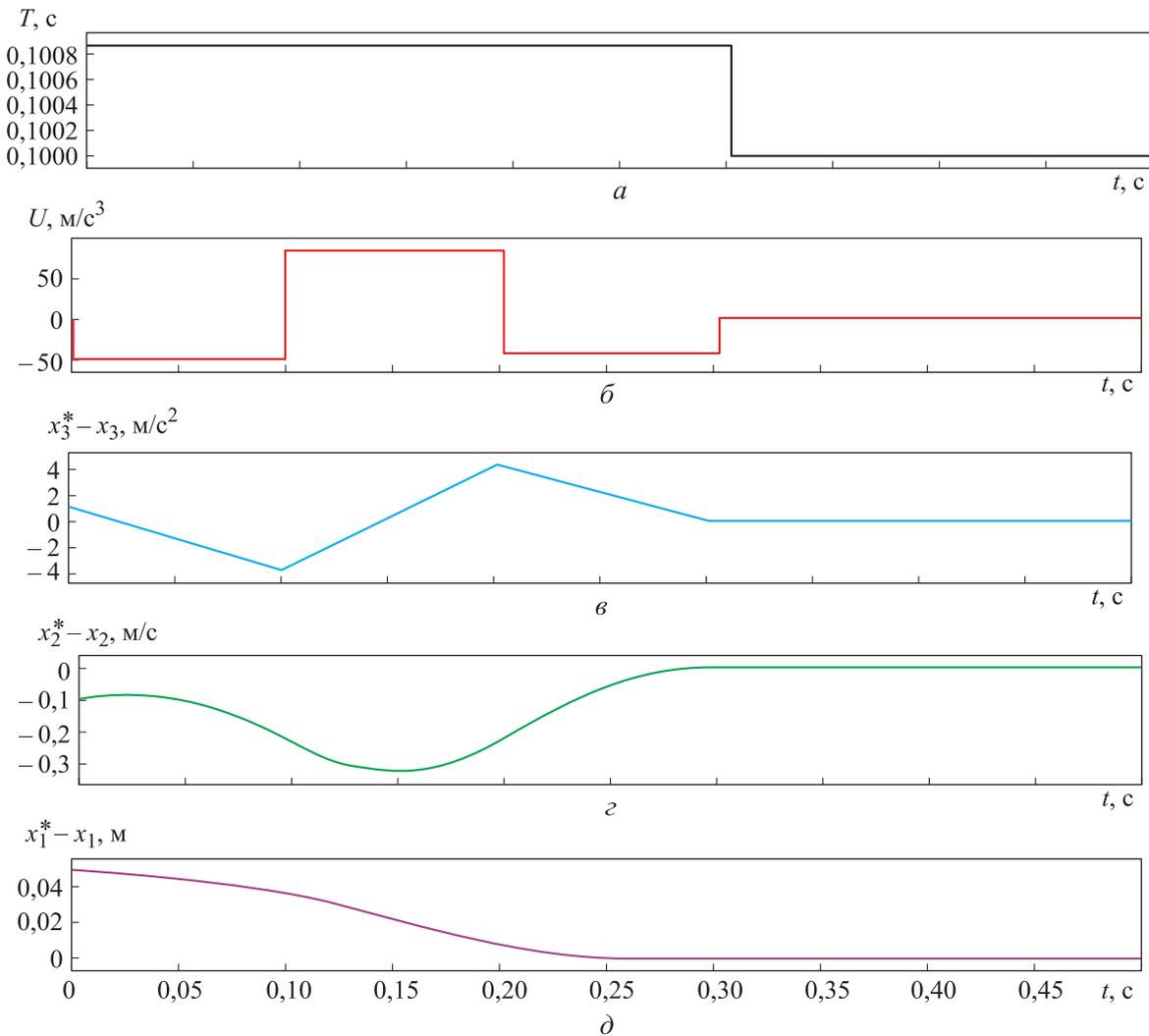


Рис. 1. Переходные процессы при отработке ненулевого начального состояния в зоне малых отклонений режимных фазовых переменных от заданных значений:

$a$  — период финитного управления  $T$ ;  $b$  — финитное управление  $U$ ;  
 $v, z, d$  — погрешности отработки ускорения  $x_3^* - x_3$ , скорости перемещения  $x_2^* - x_2$  и позиции  $x_1^* - x_1$  соответственно

Следовательно, в соответствии с выражением (14) необходимо сформировать критерий попадания САУ в зону линейности, например, задаться достаточно малыми отклонениями  $\Delta X(k)$ .

**Пример синтеза и имитационного моделирования САУ.** Для иллюстрации эффективности предложенного подхода к синтезу САУ с ограничением управления рассмотрим в качестве ОУ идеальный интегратор третьего порядка, отражающий интегриродифференциальную взаимосвязь трех фазовых координат, например механических переменных установки УСО — положения, скорости и ускорения. Модели такого рода характерны также для технологических объектов с координатами «скорость движения регулирующего органа — положение регулирующего органа или расход технологиче-

ской среды — уровень заполнения ею резервуара», где в качестве управления выступает ускорение или динамический момент привода исполнительного механизма.

Тогда, полагая, что скалярное возмущение аддитивно наиболее быстрой фазовой переменной, для линейной структуры  $S$  объекта в форме ЛТИ-модели (11) получим

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T; \\ \mathbf{U}(k) &= U(k); \mathbf{F}(t) = f(t); \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{X}(t)$  — вектор трех фазовых механических переменных ОУ;  $f(t)$  — аддитивное с ускоре-

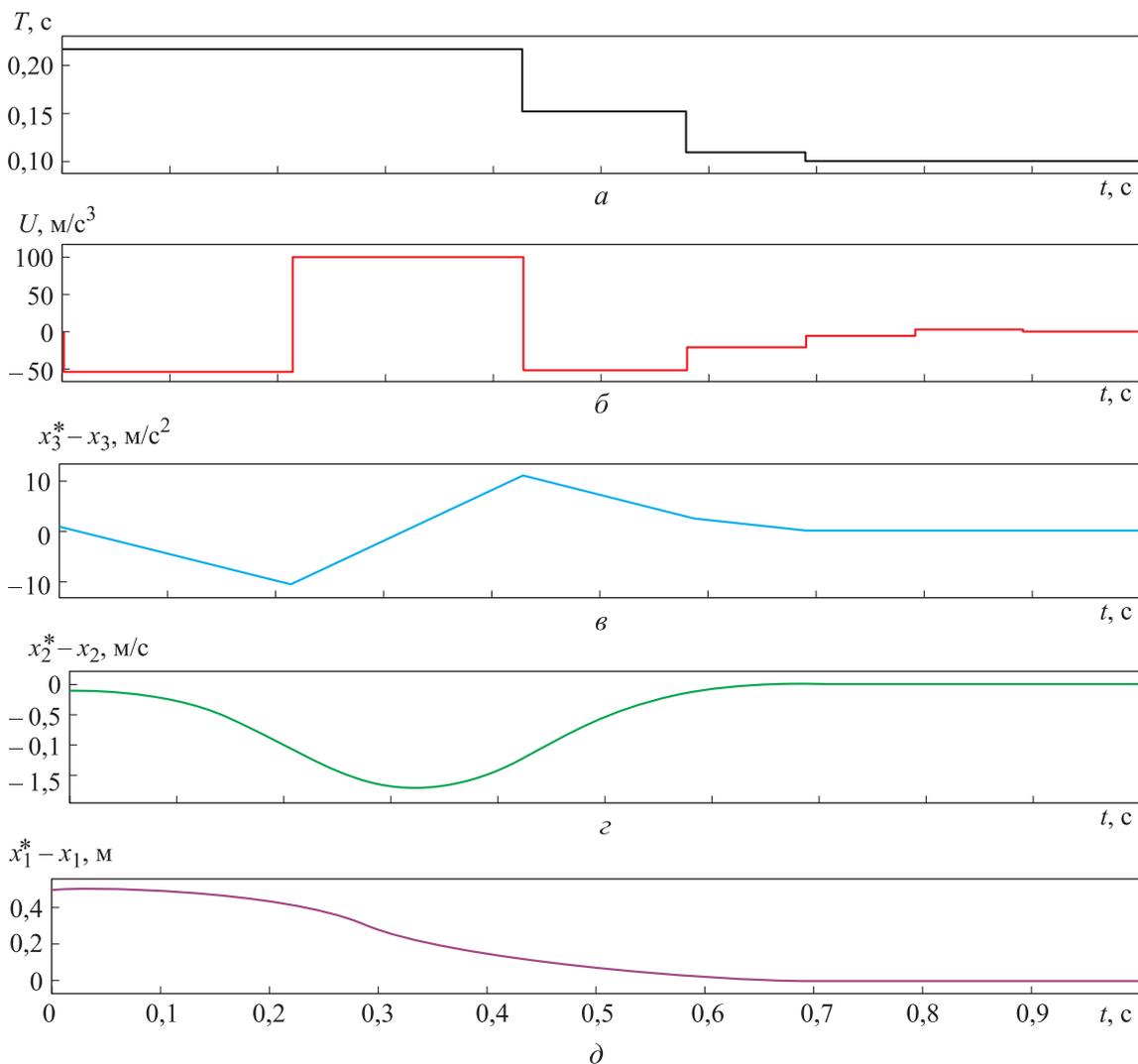


Рис. 2. Переходные процессы при обработке ненулевого начального состояния в зоне больших отклонений режимных фазовых переменных от заданных значений: а-д — то же, что на рис. 1

нием привода скалярное возмущение (по сути, это момент нагрузки на валу).

Пара матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  соответствует модели ОУ в канонической форме управляемости, что позволяет упростить решение задачи синтеза регулятора состояния. Пусть финитный регулятор имеет структуру (12). Тогда для рассматриваемого объекта параметры финитного регулятора могут быть рассчитаны в соответствии с методикой синтеза [16]:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_X^*(T(k)) &= -\mathbf{K}_X(T(k)) = \\ &= [1/T^3(k); 2/T^2(k); 1,833/T(k)]^T; \end{aligned}$$

$$\mathbf{K}_F(T(k)) = 1,833/T(k).$$

Далее приведены результаты имитационного моделирования финитной САУ в среде MATLAB/Simulink. Для определенности будем полагать, что допустимое ограничение управления соответствует  $|U_{\max}| = 100 \text{ м/с}^3$ , а минимальный период  $T_{\min} = 0,1 \text{ с}$ .

На рис. 1 приведены переходные процессы отработки системой ненулевого начального состояния  $\mathbf{X}^*(0) - \mathbf{X}(0) = [0,05 \text{ м}; -0,1 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}^2]$ , соответствующие работе САУ в линейной зоне без ограничения управления. На рис. 2 показаны переходные процессы отработки системой начального состояния  $\mathbf{X}^*(0) - \mathbf{X}(0) = [0,5 \text{ м}; -0,1 \text{ м/с}; 1 \text{ м/с}^2]$ , приводящего к ограничению управления на уровне  $|U_{\max}| = 100 \text{ м/с}^3$ .

Как видно из рис. 1, процессы в линейной зоне полностью отвечают концепции ФУ и заканчиваются за  $nT_{\text{opt}}$  периодов управления, причем  $T_{\text{opt}} \approx T_{\min}$ . Процессы с ограничением

управления на уровне  $100 \text{ м/с}^3$  (см. рис. 2) реализуются с переменным периодом управления и являются квазиоптимальными по быстродействию, однако заканчиваются практически за те же три ( $n = 3$ ) минимальных периода после выхода САУ из режима ограничения управляющего воздействия.

## Выводы

1. Для оптимальной по быстродействию и точности отработки заданных режимных параметров установки УСО (УСД) материалов и изделий с ограничением управления предложено применять критерий ФУ в сочетании с методологией модельного прогнозирующего управления.

2. Показано, что процесс ФУ надо рассматривать как процесс квазифинитного управления, подобный аperiodическому управлению и длящийся теоретически бесконечно долго. Вместе с тем при невозмущенном координатно-параметрическом управлении УСО (УСД) и теоретически абсолютной точности измерения координат состояния и вычисления управления можно обеспечить финитный процесс управления, заканчивающийся практически за  $n$  конечных периодов после выхода управляющего воздействия из насыщения.

3. Приведены результаты имитационного моделирования ФУ движением ультраструйной головки установки УСО (УСД), подтверждающие эффективность предложенного подхода.

## Литература

- [1] Барсуков Г.В., Михеев А.В., Александров А.А. Оптимизация энергетических затрат технологии резания материалов гидроабразивной струей. *Наука и мир*, 2013, № 2, с. 46–48.
- [2] Полянский С.Н., Нестеров А.С. Технология и оборудование гидроабразивной резки. *Вестник машиностроения*, 2004, № 5, с. 43–46.
- [3] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультразвуковая экспресс-диагностика материалов изделий машиностроения. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*, 2011, № 123, с. 141–147.
- [4] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Проваторов А.С., Хафизов М.В. Моделирование ультразвукового воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [5] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [6] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.

- [7] Dorf P., Bishop R. *Современные системы управления*. Москва, Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
- [8] Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. *Проектирование систем управления*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 911 с.
- [9] Пшихопов В.Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*, 2007, № 1, с. 51–57.
- [10] Hodel A.S., Hall C.E. Variable-Structure PID Control to Prevent Integrator Windup. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 442–451, doi: 10.1109/41.915424
- [11] Александров В.М. Последовательный синтез оптимального по быстродействию управления в реальном времени. *Автоматика и телемеханика*, 2008, № 8, с. 3–24.
- [12] Иштутинов В.В., Савин А.А. Применение современного программного обеспечения для проектирования высокودинамичных электроприводов. *Электротехника*, 2015, № 7, с. 2–9.
- [13] Анучин А.С. Прогнозирование сигнала обратной связи для ПИ-регулятора предельного быстродействия. *Электротехника*, 2014, № 6, с. 27–36.
- [14] Пятибратов Г.Я. О применении электромеханических систем для ограничения динамических нагрузок упругих механизмов. *Электротехника*, 2018, № 1, с. 43–49.
- [15] Kazantsev V., Lykov A., Dadenkov D. The issue of invariance and astatic control in servosystems. *9<sup>th</sup> International Conference on Power Drives Systems*, Perm, 3–7 October 2016, no. CFP16F20-ART, code 125064, doi: 10.1109/ICPDS.2016.7756720
- [16] Казанцев В.П., Даденков Д.А. Позиционно-следящие электроприводы с финитным управлением. *Электротехника*, 2015, № 6, с. 45–50.
- [17] Казанцев В.П. Дискретно-непрерывные электромеханические системы управления с пассивной адаптацией. *Электротехника*, 2015, № 6, с. 57–62.

## References

- [1] Barsukov G.V., Mikheyev A.V., Aleksandrov A.A. Optimization of power consumption of cutting technology of the materials with the help of hydroabrasive stream. *Science and world*, 2013, no. 2, pp. 46–48.
- [2] Polyanskiy S.N., Nesterov A.S. Waterjet cutting technology and equipment. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2004, no. 5, pp. 43–46 (in Russ.).
- [3] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Shuteyev V.A. Ultra-jet rapid diagnostics of materials of mechanical engineering products. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 123, pp. 141–147 (in Russ.).
- [4] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Provatorov A.S., Khafizov M.V. Modeling of ultra-jet influence for coating quality control. *Physical mesomechanics*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89.
- [5] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [The quality of surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2000. 320 p.
- [6] Grubyy S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravleniye rezhimnymi parametrami* [Optimization of machining process and control of operating parameters]. Moscow, Bauman Press, 2014. 149 p.
- [7] Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Prentice Hall, 2010. 1104 p. (Russ. ed.: Dorf R., Bishop R. *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Moscow, Laboratoriya Bazovoykh Znaniy publ., 2002. 832 p.).
- [8] Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. *Control system design*. Prentice Hall, 2001. 908 p. (Russ. ed.: Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.E. *Proyektirovaniye sistem upravleniya*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy publ., 2010. 911 p.).
- [9] Pshikhopov V.Kh. Optimal performance trajectory control of electromechanical handling robots. *Russian Electromechanics*, 2007, no. 1, pp. 51–57 (in Russ.).
- [10] Hodel A.S., Hall C.E. Variable-Structure PID Control to Prevent Integrator Windup. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 442–451, doi: 10.1109/41.915424

- [11] Aleksandrov V.M. Sequential synthesis of the time-optimal control in real time. *Automation and Remote Control*, 2008, vol. 69, iss. 8, pp. 1271–1288, doi: 10.1134/S0005117908080018
- [12] Ishutinov V.V., Savin A.A. The use of modern software for the design of highly dynamic electric drives. Part 1. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 367–372, doi: 10.3103/S1068371215070068
- [13] Anuchin A.S. Feedback-signal prediction for a deadbeat PI controller. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 6, pp. 367–375, doi: 10.3103/S1068371214060029
- [14] Pyatibratov G.Ya. On the use of electromechanical systems to limit the dynamic loads of elastic mechanisms. *Elektrotehnika*, 2018, no. 1, pp. 43–49 (in Russ.).
- [15] Kazantsev V., Lykov A., Dadenkov D. The issue of invariance and astatic control in servosystems. *9<sup>th</sup> International Conference on Power Drives Systems*, Perm, 3–7 October 2016, no. CFP16F20-ART, code 125064, doi: 10.1109/ICPDS.2016.7756720
- [16] Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Position-servo drives with finite control. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 6, pp. 344–349, doi: 10.3103/S106837121506005X
- [17] Kazantsev V.P. Discrete-continuous electromechanical control systems with passive adaptation. *Elektrotehnika*, 2015, no. 6, pp. 57–62 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.12.2018

## Информация об авторах

**КАЗАНЦЕВ Владимир Петрович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: kvp.pnpu@mail.ru).

**БОЧКАРЕВ Сергей Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

## Information about the authors

**KAZANTSEV Vladimir Petrovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Microprocessor Automation. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: kvp.pnpu@mail.ru).

**BOCHKAREV Sergey Vasilievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Microprocessor Automation. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Казанцев В.П., Бочкарев С.В. Фinitное управление приводами установок для ультраструйной обработки и диагностики материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 2, с. 24–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-24-33

### Please cite this article in English as:

Kazantsev V.P., Bochkarev S.V. Finite Control of Actuators of Machines for Ultra-Jet Processing and Diagnostics of Materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 2, pp. 24–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-2-24-33