

УДК 664.951.022.62.002.5

UDC 664.951.022.62.002.5

**ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ
РАЗДЕЛОЧНО-ФИЛЕТИРОВОЧНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ
(Часть I. Моделирование цифрового следящего
привода)**

**APPROACH TO THE DESIGN OF SYSTEM
OF AUTOMATIC MANAGEMENT OF
WORKING ORGANS OF PREPARATION-
FILLET EQUIPMENT
(PART I. MODELING OF NUMERICAL
AUTOMATIC DRIVE)**

Фатыхов Юрий Адгамович
д. т. н., профессор

Fatykhov Yury Adgamovich
Dr. Sci. Tech., professor

Агеев Олег Вячеславович
соискатель\

Ageev Oleg Vyacheslavovich
post-graduate student

Шлемин Аркадий Васильевич
к. т. н., доцент

Shlemin Arkady Vasilievich
Cand. Tech. Sci., associate professor

Пономарев О.П.
к. т. н., доцент

Ponomarev O.P.
Cand. Tech. Sci., associate professor

*Калининградский государственный технический
университет, Калининград, Россия*

*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad,
Russia*

В статье рассмотрен подход к построению системы автоматического управления рабочими органами мехатронного разделочно-филетировочного оборудования на основе цифрового следящего привода. Приводится обобщенная структурная схема системы управления цифровым следящим приводом на базе электромеханического шагового позиционера. Рассмотрена приближенная модель цифрового следящего привода, приведены импульсные переходные характеристики с различными коэффициентами настроек ПД-регулятора.

Approach to the design of system of automatic management of working organs of mechatronic preparation-fillet equipment on the base of numerical automatic drive is considered in the article. Generalized structural scheme of management system by numerical automatic drive on the base of electromechanical stepping rotary indexing table is casted. Approximate model of numerical automatic drive was considered and impulse transition characteristics with different coefficients of PD-tuning controls were casted.

Ключевые слова: РАЗДЕЛЫВАНИЕ,
ФИЛЕТИРОВАНИЕ, РЫБНОЕ ФИЛЕ,
ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД,
ПРЯМОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ,
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ.

Key words: PREPARATION, FILLETING, FISH
SIRLOIN, NUMERICAL AUTOMATIC DRIVE,
DIRECT NUMERICAL MANAGEMENT, POINT-
TO-POINT MOTION.

Прогнозы возможного вылова рыбного сырья на ближайшее десятилетие указывают на перспективу роста добычи рыбы. Состав рыбопромыслового флота в настоящее время претерпевает существенные изменения. Флот состоит более чем из 2500 судов различного назначения, причем возраст половины судов составляет более 20 лет. В связи с тем, что существующие мощности будут неуклонно снижаться, возникает настоятельная необходимость обновления рыбопромыслового флота.

Наряду с этим планируется постепенный отход от негативной практики приобретения подержанных судов и оборудования иностранного производства. В создании больших и средних рыбопромысловых судов предусматривается увеличение доли участия отечественной промышленности [1]. Вместе с тем, наиболее эффективным и рентабельным способом хозяйствования является глубокая переработка рыбного сырья, в том числе в районах промысла.

Вышеизложенное свидетельствует об увеличении потребности в рыбообрабатывающем оборудовании. Вследствие непрерывного роста цен на энергоносители существенно возрос спрос и наметился переход на современные энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование. Внедрение глубокой переработки рыбы предполагает наличие эффективных и производительных средств для механизации и автоматизации процессов разделывания и филетирования рыбы с учетом требований ресурсосбережения и экологии.

Одним из путей решения этой проблемы является поэтапная автоматизация и компьютеризация современного разделочно-филетировочного оборудования на основе мехатроники. Востребованность и перспективность данного направления по совершенствованию технологического оборудования отрасли подтверждаются анализом тенденций в проектировании машин фирм: Baader, Marel Group, Nirron Fillestar, Arencо и др.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в создании разделочно-филетировочной техники является разработка автоматических разделочных линий. Данная техника должна создаваться по принципу модульно-блочного агрегатирования. При этом основной задачей считается выпуск высококачественного бескостного филе, нарезаемого на порции. Существует необходимость обеспечения жестких международных требований по санитарно-гигиеническим условиям

разделочного производства, что достигается замкнутой циркуляцией воды в производственной системе с промежуточной очисткой.

Автоматическая разделочная линия представляет собой принципиально новый технологический объект на основе мехатроники с большими возможностями. Такое оборудование должно разрабатываться с применением лазерных устройств, видеотехники, встраиваемых микроконтроллеров, что соответствует общей тенденции создания гибких производственных систем в машиностроении. В связи с этим, проектирование систем управления современным разделочно-филетировочным оборудованием предполагает проработку трех задач: выбор сенсорных устройств для рыбообрабатывающих модулей, выбор быстродействующих исполнительных механизмов и синтез законов управления.

Основными проблемами реализации технологических операций разделывания и филетирования рыбы являются: обеспечение экономичности вырезания костей и повышение выхода филейчиков за счет точной настройки рабочих органов на экономичный рез; точность выставления тушки на позиции обработки за счет применения прижимных устройств; повышение производительности разделочно-филетировочных модулей за счет увеличения быстродействия исполнительных механизмов и применения шаговых двигателей; обеспечение точного измерения параметра тела рыбы (толщины, высоты или длины), расширение универсальности разделочно-филетировочных модулей с точки зрения видового состава и размерных диапазонов обрабатываемых рыб.

С целью максимально точной настройки режущих рабочих органов для каждого экземпляра рыбы компьютером должны определяться параметры тушки прямым или косвенным методом. По результатам инструментальной инспекции филе должен корректироваться режим

обработки для последующих тушек, а бракованное филе направляться на ручную дозачистку от костей при помощи вакуумных отсосов.

К недостаткам существующих разделочно-филетировочных машин с механическими измерительными блоками следует отнести невысокую точность настройки рабочих органов на экономичное вырезание костей. Так как створки измерительного блока, зачастую, продавливают ткань рыбы, оценка толщины рыбы искажается, что может приводить к неполному вырезанию костей. Наличие механической связи между исполнительным и измерительным блоками ограничивает производительность устройств, снижает надежность работы. Отсутствие непрерывного активного контроля за наличием неудаленных костей в готовом филе снижает качество готового продукта. Перенастройка программы механического исполнительного блока для настройки рабочих органов требует смены отдельных деталей, что является относительно трудоемкой операцией и ухудшает эксплуатационные характеристики приспособления.

При построении современного разделочно-филетировочного оборудования на базе средств мехатроники с применением шаговых двигателей автоматическая настройка рабочих органов должна осуществляться системой управления цифровым следящим приводом (ЦСП). Существенной особенностью такой системы является наличие в ее контурах информации как аналогового, так и цифрового вида.

Разработка системы управления ЦСП для настройки рабочих органов разделочно-филетировочного оборудования предусматривает определение ее структуры и выбор законов управления ЦСП. При этом необходимо обеспечивать требуемые показатели качества работы ЦСП, а именно – точность отработки входного воздействия, время переходного процесса, величину перерегулирования при отработке ступенчатого воздействия, полосы пропускания и т. д. Эти критерии могут быть достигнуты за счет

использования аналоговых корректирующих устройств или программной реализации в управляющей ЭВМ дискретных корректирующих фильтров (прямое цифровое управление приводом).

Полное математическое описание системы управления ЦСП является сложной аналитической задачей, в связи с чем, на начальном этапе исследования приемлемым и наглядным является использование графоаналитического метода. Представим модель системы управления ЦСП в виде эквивалентной структурной схемы.

ЦСП, в соответствии с работами [2, 4], может быть представлен эквивалентной структурной схемой (рисунок 1). На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $D_0(z)$ – дискретная передаточная функция программы вычисления закона движения привода; $D_1(z)$, $D_2(z)$, $D_3(z)$, $D_4(z)$ – дискретные передаточные функции программных модулей коррекции динамических свойств привода; $w(p)$ – передаточная функция непрерывной части привода.

Корректирующие звенья в ЦСП выполняют функции фазосдвигающих и усилительных элементов. В соответствии с работами [2, 3], высокую эффективность применения в качестве последовательных корректирующих звеньев имеют изодромные устройства, представляющие собой параллельное соединение усилительного элемента и интегратора. Их включение в контур управления по ошибке позволяет существенно повысить динамическую и статическую точность ЦСП, что связано с повышением порядка астатизма следящей системы по входному воздействию и по внешним возмущениям. Вместе с тем, введение изодромного устройства с малой постоянной времени затрудняет демпфирование системы, в то время как при большой постоянной времени могут заметно увеличиваться коэффициенты ошибок по высшим производным входного воздействия [2, 3]. Для их уменьшения

целесообразно использовать дополнительные контуры управления по первой и второй производной от ошибки.

В соответствии с работами [2, 3], последовательное корректирующее устройство в системе управления ЦСП может иметь программно реализуемые в управляющей ЭВМ контуры пропорционального, интегрального и дифференциального регулирования по ошибке, что повышает точность работы ЦСП при снижении общего коэффициента передачи.

Наиболее эффективной системой управления ЦСП, согласно работам [2, 4], является комбинированная система управления с включением компенсирующих сигналов по производным от входного воздействия. Решением этой задачи является использование численных методов дифференцирования для расчета оценок производных от входного воздействия. В случае низкой частоты поступления входного воздействия на привод целесообразным является применение классического полиномиального подхода к численным методам теории обработки информации.

Наряду с этим включение цифрового фильтра, осуществляющего вычисление производных от входного воздействия, в разомкнутый контур управления ЦСП позволяет выполнять экстраполяцию задающего воздействия в промежутках между моментами его поступления на привод. При этом экстраполяция существенно улучшает плавность движения рабочих органов. Кроме того, важным достоинством комбинированной системы управления ЦСП является то, что ее устойчивость в основном определяется замкнутым контуром [2]. Повышение запасов устойчивости может выполняться за счет введения дополнительных контуров отрицательной обратной связи по скорости и по ускорению регулируемой координаты, которые также реализуются программным образом.

С учетом вышеизложенного, на рисунке 2 приведена структура дискретной части системы управления ЦСП, построенная в соответствии с рекомендациями, изложенными в [2]. Данная структура позволяет менять в широком диапазоне свойства ЦСП и может быть положена в основу построения алгоритмов прямого цифрового управления настройкой рабочих органов разделочно-филетировочного оборудования.

Система управления ЦСП, показанная на рисунке 2, включает несколько программно реализуемых контуров управления, работающих в общем случае с разными периодами дискретности [2]:

- контуры пропорционального, интегрального и дифференциального регулирования по ошибке $e [k T_0]$;
- демпфирующие обратные связи по первой и второй разностям от регулируемой координаты $y [m T_2]$;
- компенсирующие цепи по первой и второй производным от входного воздействия $\dot{x} [k T_0]$, $\ddot{x} [k T_0]$.

Функции цифрового фильтра ЦФ (см. рисунок 2) заключаются в вычислении промежуточных значений входного воздействия на временном интервале между моментами поступления воздействия на вход привода ($n T_1$). Это позволяет увеличить частоту замыкания главной обратной связи в случае низкой частоты поступления задающего сигнала. С помощью цифрового фильтра также рассчитывают оценки производных входного воздействия, используемых для уменьшения динамических ошибок привода. Нелинейные элементы \dot{y}_1 , \dot{y}_2 , \dot{y}_3 позволяют учитывать ограниченную разрядность цифровых устройств управления.

Определим структуру цифровой части системы управления ЦСП для настройки рабочих органов разделочно-филетировочного оборудования по одной координате с учетом вышеупомянутых рекомендаций, изложенных в работах [2, 3].

Непрерывная часть привода является кинематическим звеном исполнительного механизма, приводимым в движение шаговым двигателем. В качестве датчика обратной связи по положению целесообразно использовать измерительную систему, включающую фотоэлектрический импульсный прибор для расчета фактического угла поворота, расположенный на валу шагового двигателя.

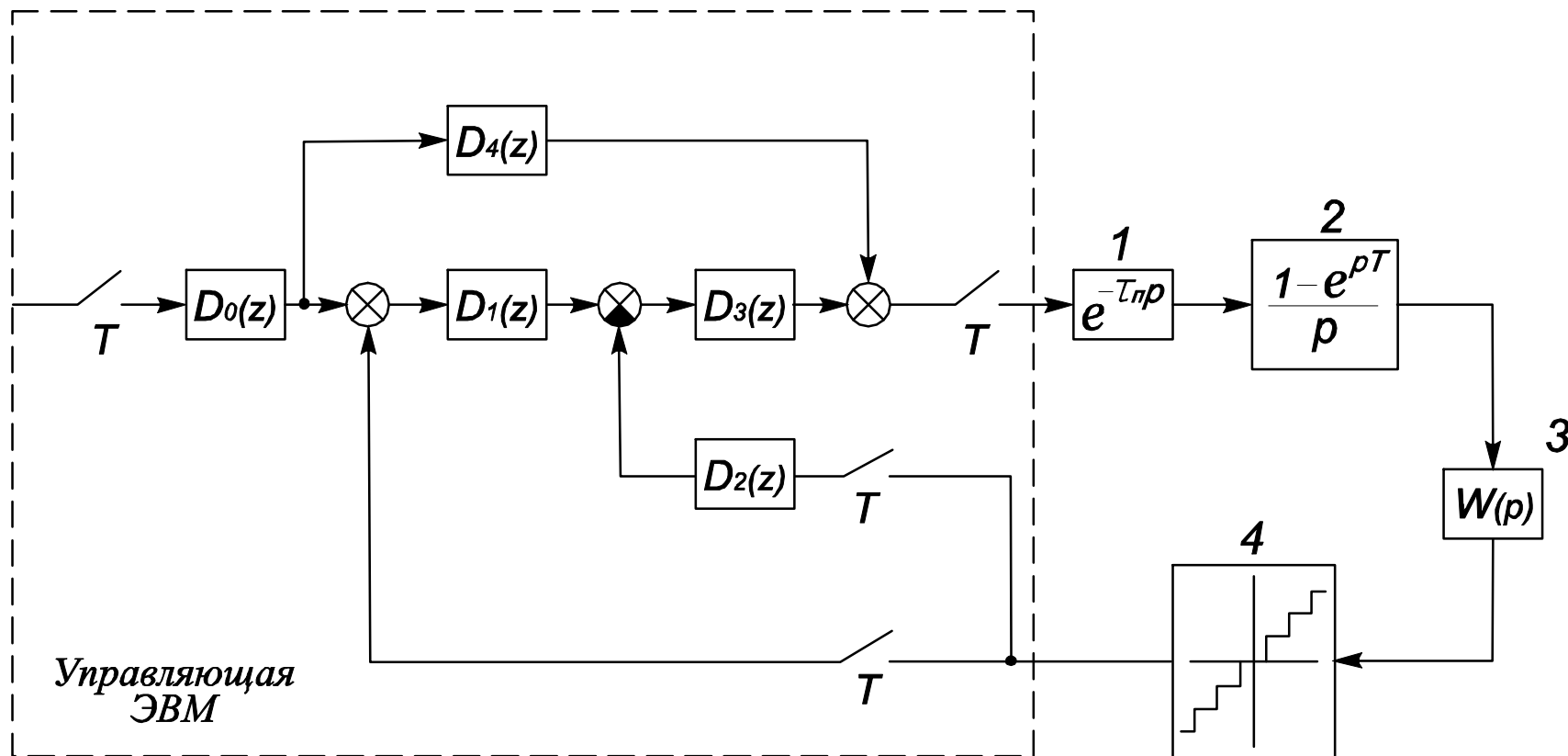


Рисунок 1 – Эквивалентная структурная схема ЦСП для настройки рабочих органов разделочно-филетировочного оборудования, согласно [2, 4]: 1 – элемент задержки; 2 – экстраполятор нулевого порядка (фиксатор); 3 – передаточная функция непрерывной части привода; 4 – аналого-цифровой преобразователь

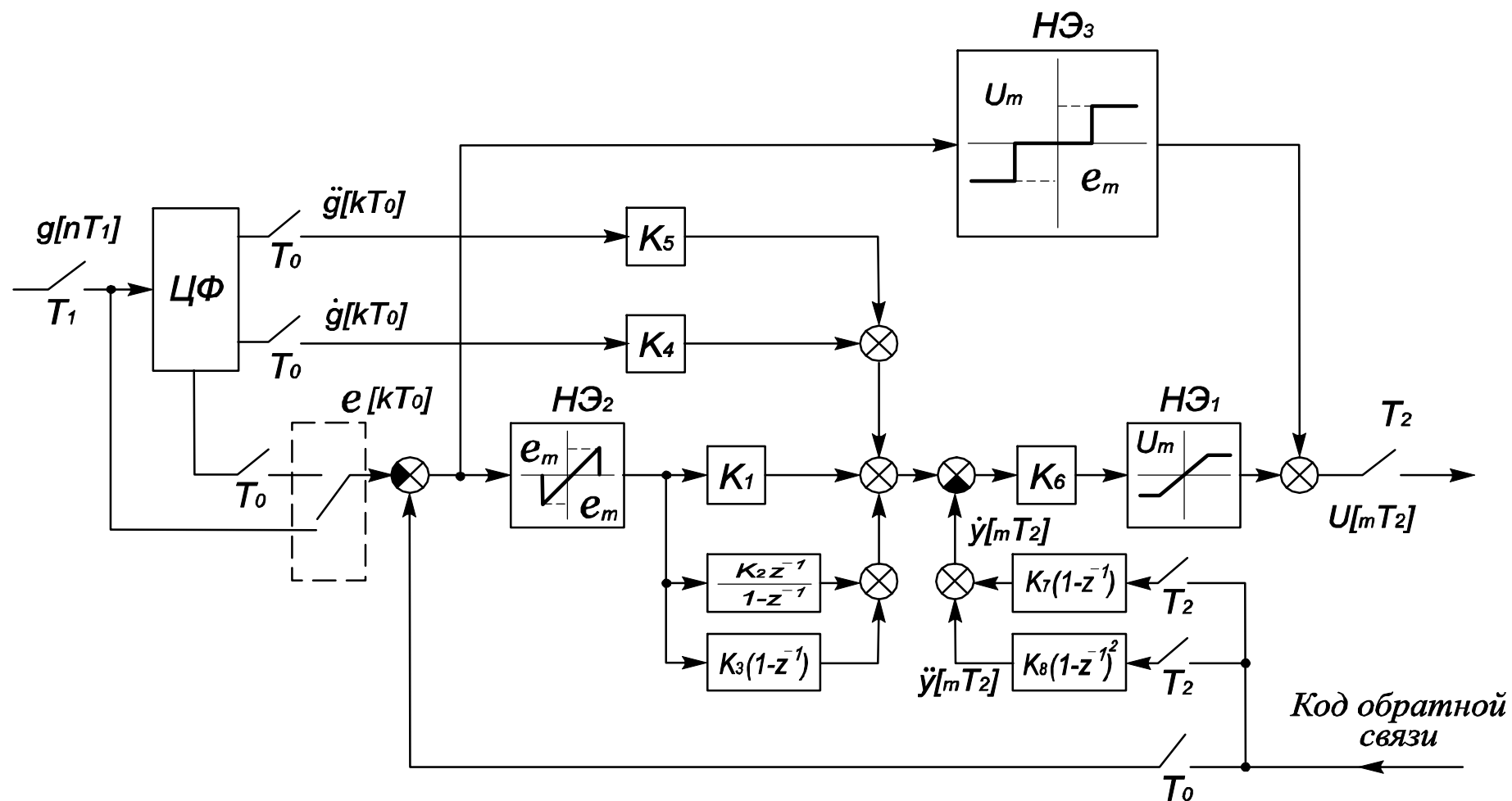


Рисунок 2 – Структурная схема дискретной части следящего привода с прямым цифровым управлением, согласно [2]

Цифровая часть системы управления ЦСП должна обеспечивать [2, 3]:

– интерполяцию входного сигнала на привод в промежутках между его обновлением на верхнем уровне системы управления в целях повышения частоты замыкания главной обратной связи;

– отработку без установившихся ошибок входных воздействий, имеющих ненулевые значения первой и второй производной;

– время переходного процесса при отработке ступенчатого воздействия – не более 3 с;

– перерегулирование – не более 10 %.

Структура цифровой части системы управления ЦСП на базе шагового двигателя (рисунок 3) включает: интерполятор входного воздействия, цифровой ПИ-регулятор, разомкнутые контуры управления по первой и второй производным от входного воздействия, элемент ограничения выходного сигнала управления по модулю. На рисунке 3 обозначены: $g [t_n]$ – входное воздействие, поступающее с верхнего уровня системы управления ЦСП с периодом дискретности T_1 ; $g [t_m]$ – вычисляемые в интерполяторе промежуточные значения входного воздействия, соответствующие периоду дискретности T_0 ; $N = T_1/T_0$ – параметр интерполятора; $\Delta a [t_m]$, $a [t_m]$ – приращение и абсолютное текущее значение угла поворота двигателя; $e [t_m]$ – рассогласование в приводе; $U [t_m]$ – сигнал управления, выдаваемый в схему управления двигателем; Δg и $\Delta^2 g$ – первая и вторая разности изменения входного воздействия.

Оценка и оптимизация параметров графоаналитической модели, показанной на рисунке 3, выходит за рамки настоящей работы.

Для определения дискретной передаточной функции $D_4(z)$ цифрового корректирующего устройства (см. рисунок 1) целесообразно использовать подход, предложенный в работе [4]. Дискретная передаточная функция имеет следующий вид [4]:

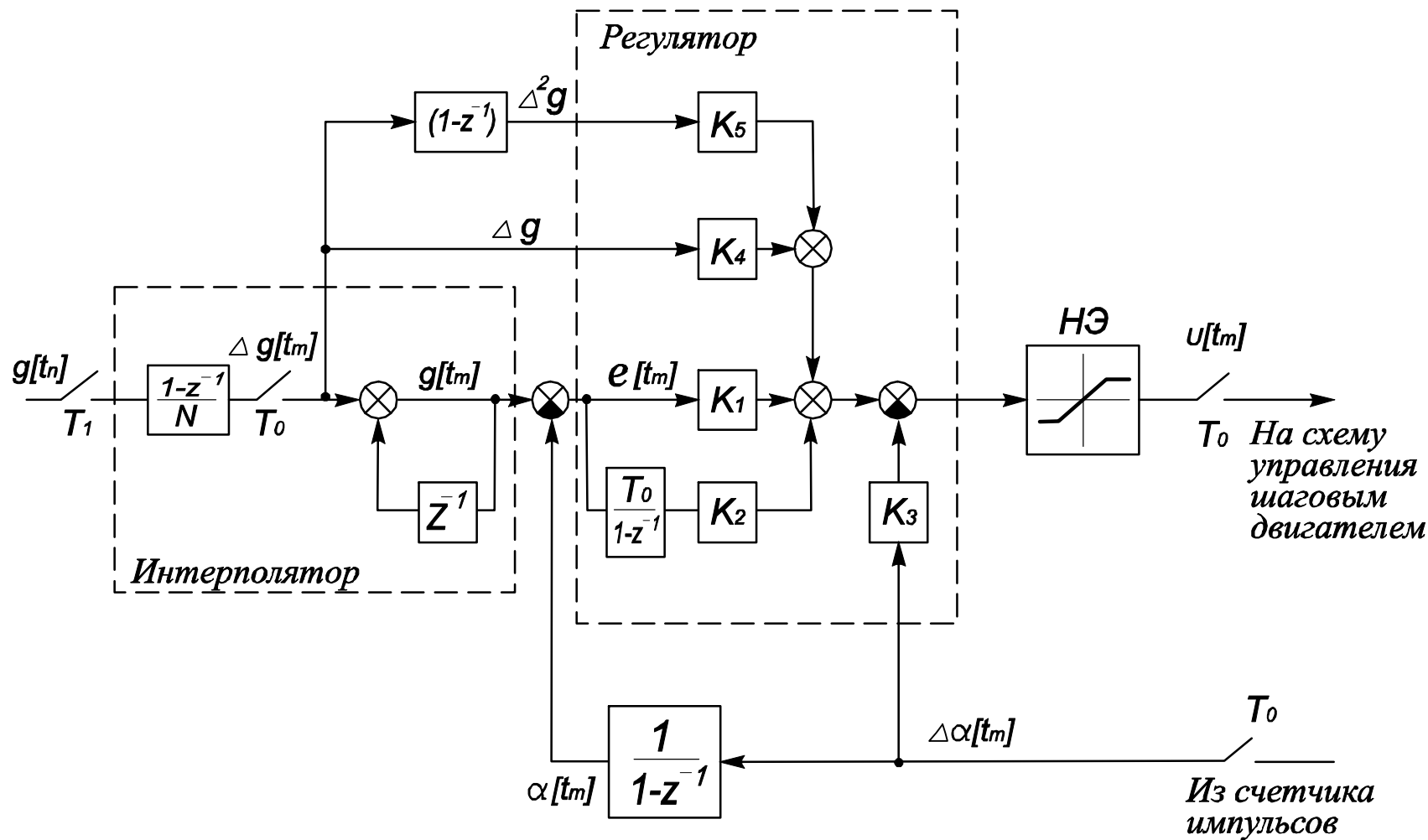


Рисунок 3 – Структурная схема дискретной части следящего привода на основе шагового двигателя с прямым цифровым управлением

$$D_4(z) = u_1 \cdot (1 - z^{-1}) + u_2 \cdot (1 - z^{-1})^2 + u_3 \cdot (1 - z^{-1})^3, \quad (1)$$

где u_1 , u_2 , u_3 – коэффициенты цифрового корректирующего устройства, определяемые из условия абсолютной инвариантности ЦСП относительно задающего воздействия. При этом коэффициенты установившейся ошибки по положению, скорости, ускорению и рывку в дискретные моменты времени равны нулю.

$$u_1 = \frac{1}{K_i T}, \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{1 - A u_1}{K_i T}, \quad (3)$$

$$u_3 = \frac{1 - A (u_1 + u_2)}{B \cdot T} - \frac{2 K_i (8a \cdot b^2 + M1) u_1}{2 \cdot B \cdot T \cdot N1 \cdot T_0^2 \cdot (1 - 2e^{-aT} \cdot \cos(B \cdot T) + e^{-2aT})}, \quad (4)$$

где T – период дискретизации в цифровом контуре положения; $K_i = K_i / K_{\dot{N}}$ – коэффициент передачи непрерывной части системы; K_i – коэффициент передачи механизма; $K_{\dot{N}}$ – коэффициент обратной связи по скорости; $T_0 = \sqrt{T_{D\dot{N}} T_1}$; $T_{D\dot{N}}$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора скорости; T_1 – постоянная времени входного фильтра контура скорости, оптимизирующего реакцию системы на входное воздействие; a , b – вещественная и мнимая части комплексно сопряженных корней характеристического уравнения, полученного при преобразовании передаточной функции объекта управления из непрерывной области в Z – область; A , B , $M1$, $N1$ – полиномы, полученные в результате преобразования передаточной функции системы по ошибке.

Как видно из выражений (2)–(4), коэффициенты цифрового корректирующего устройства зависят от частоты квантования в контуре положения, коэффициента регулятора положения, параметров ЦСП, при этом они не зависят от типа интерполятора.

Введение цифровой коррекции в контур положения позволяет значительно снизить скоростную, координатную и контурную ошибки [4]. Наибольший эффект при использовании цифровой коррекции дает цифровое корректирующее устройство 3-го порядка. Это позволяет уменьшить координатную ошибку на 69 %, скоростную ошибку на этапе разгона – на 64,3 %. Введение цифрового корректирующего устройства 2-го порядка позволяет уменьшить координатную ошибку на 68,4 %, скоростную ошибку – на 62 %. Введение цифрового корректирующего устройства 1-го порядка позволяет уменьшить координатную ошибку на 67,4 %, скоростную ошибку – на 54,8 %. В общем случае эффект от использования цифровой коррекции задающих сигналов определяется заданной контурной скоростью и ускорением, а также геометрией траектории движения [4].

Непрерывная часть системы управления ЦСП на основе мехатронного шагового позиционера является сложной многосвязной системой с переменными в функции пути параметрами и содержит ряд нелинейностей (ограничение, зона нечувствительности, люфт, сухое трение). В связи с этим, точный теоретический анализ непрерывной части системы управления ЦСП является трудно осуществимой задачей. Целесообразно расчленив задачу на ряд более простых, обосновывая в каждом случае правомерность упрощения математической модели.

Анализ устойчивости процесса позиционирования рабочих органов филетировочного оборудования целесообразно провести с помощью исследования упрощенной линеаризованной модели системы управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера. Приближенное моделирование системы управления ЦСП выполнено на основе экспериментальных динамических характеристик электромеханического <http://ej.kubagro.ru/2007/10/pdf/15.pdf>

шагового позиционера. При этом под непрерывной частью понимается вся внешняя по отношению к управляющей ЭВМ часть системы управления ЦСП.

Определена импульсная переходная характеристика системы управления ЦСП путем подачи в течение такта времени на блок управления шаговым позиционером ступенчатого входного импульса и регистрации фактического положения рабочего органа устройства для филетирования. Сопоставление расчетных значений модели с экспериментальной характеристикой показывает, что система управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера приближенно может быть описана моделью, приведенной на рисунке 4. Данная модель представляет собой описание каскадной двухконтурной следящей системы автоматического управления позиционированием рабочего органа.

Кривой 1 на рисунках 5 и 6 соответствует экспериментальная переходная характеристика системы управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера. Кривой 2 на рисунках 5 и 6 соответствует переходная характеристика приближенной модели системы управления ЦСП с параметрами, указанными на рисунке 4.

Кривой 3 на рисунке 5 соответствует переходная характеристика модели следящей системы, включающей ПД-регулятор, со следующими параметрами цифрового регулятора:

$$\begin{aligned}K_I &= 3,88 \\K_{\bar{A}} &= 2,52 \cdot \\T_{EA} &= 0,001\end{aligned} \quad (5)$$

Кривой 4 на рисунке 5 соответствует переходная характеристика модели следящей системы, включающей ПД-регулятор, со следующими параметрами цифрового регулятора:

$$\begin{aligned}K_I &= 5,22 \\K_{\bar{A}} &= 2,52 \quad . \\T_{\hat{E}A} &= 0,001\end{aligned}\quad (6)$$

Кривой 5 на рисунке 6 соответствует переходная характеристика модели следящей системы, включающей ПД-регулятор, со следующими параметрами цифрового регулятора:

$$\begin{aligned}K_I &= 3,52 \\K_{\bar{A}} &= 2,64 \quad . \\T_{\hat{E}A} &= 0,001\end{aligned}\quad (7)$$

Кривой 6 на рисунке 6 соответствует переходная характеристика модели следящей системы, включающей ПД-регулятор, со следующими параметрами цифрового регулятора:

$$\begin{aligned}K_I &= 3,52 \\K_{\bar{A}} &= 1,12 \quad . \\T_{\hat{E}A} &= 0,001\end{aligned}\quad (8)$$

Колебательный характер звеньев в модели следящей системы (см. рисунок 4) обуславливает необходимость фиксации исполнительного вала в точке позиционирования. Надежную фиксацию исполнительного вала можно обеспечить следующими способами:

- применением самотормозящих передач, что влечет возрастание затрат на сухое трение;

- использованием управляемого фиксирующего приспособления (электромагнитного тормоза, муфты и т. д.), конструктивно встроенного в позиционер;

- применением усилителей мощности, позволяющих удерживать исполнительный вал в неизменном положении с определенной погрешностью.

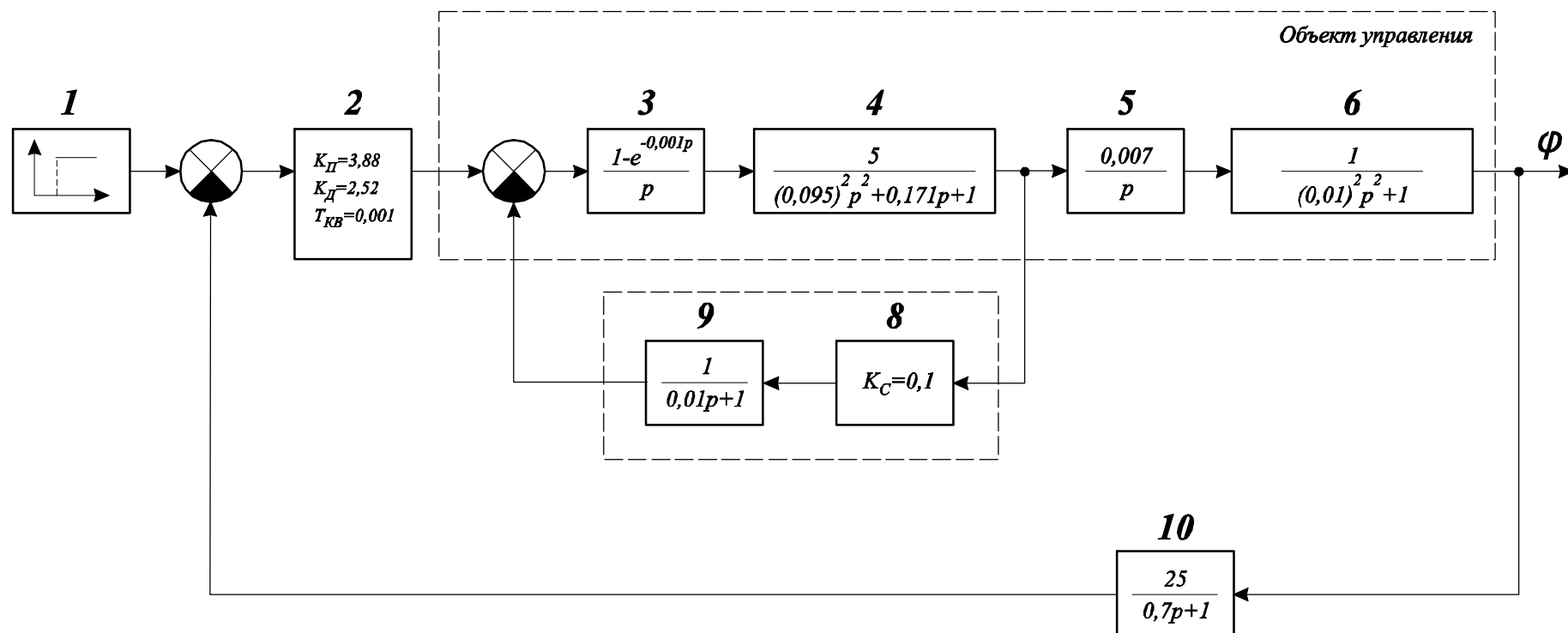


Рисунок 4 – Структурная схема приближенной модели системы управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера: 1 – источник ступенчатого воздействия; 2 – цифровой ПД-регулятор; 3 – экстраполятор нулевого порядка (фиксатор); 4 – шаговый двигатель; 5 – редуктор; 6 – упругая механическая передача; 8, 9 – датчик скорости (ПИ-регулятор скорости); 10 – измерительная система, j – текущее значение угла поворота исполнительного вала

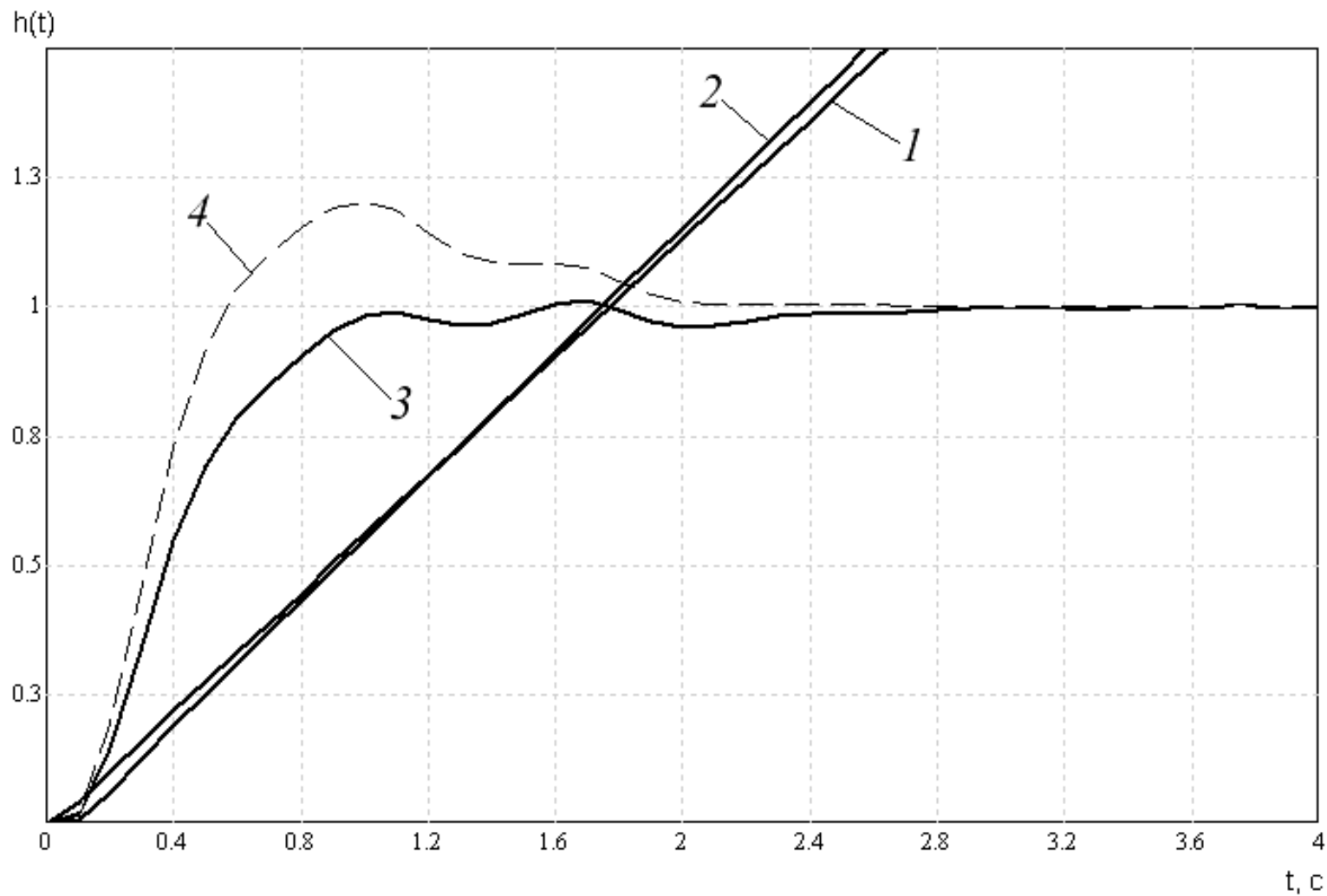


Рисунок 5 – Импульсные переходные характеристики модели системы управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера

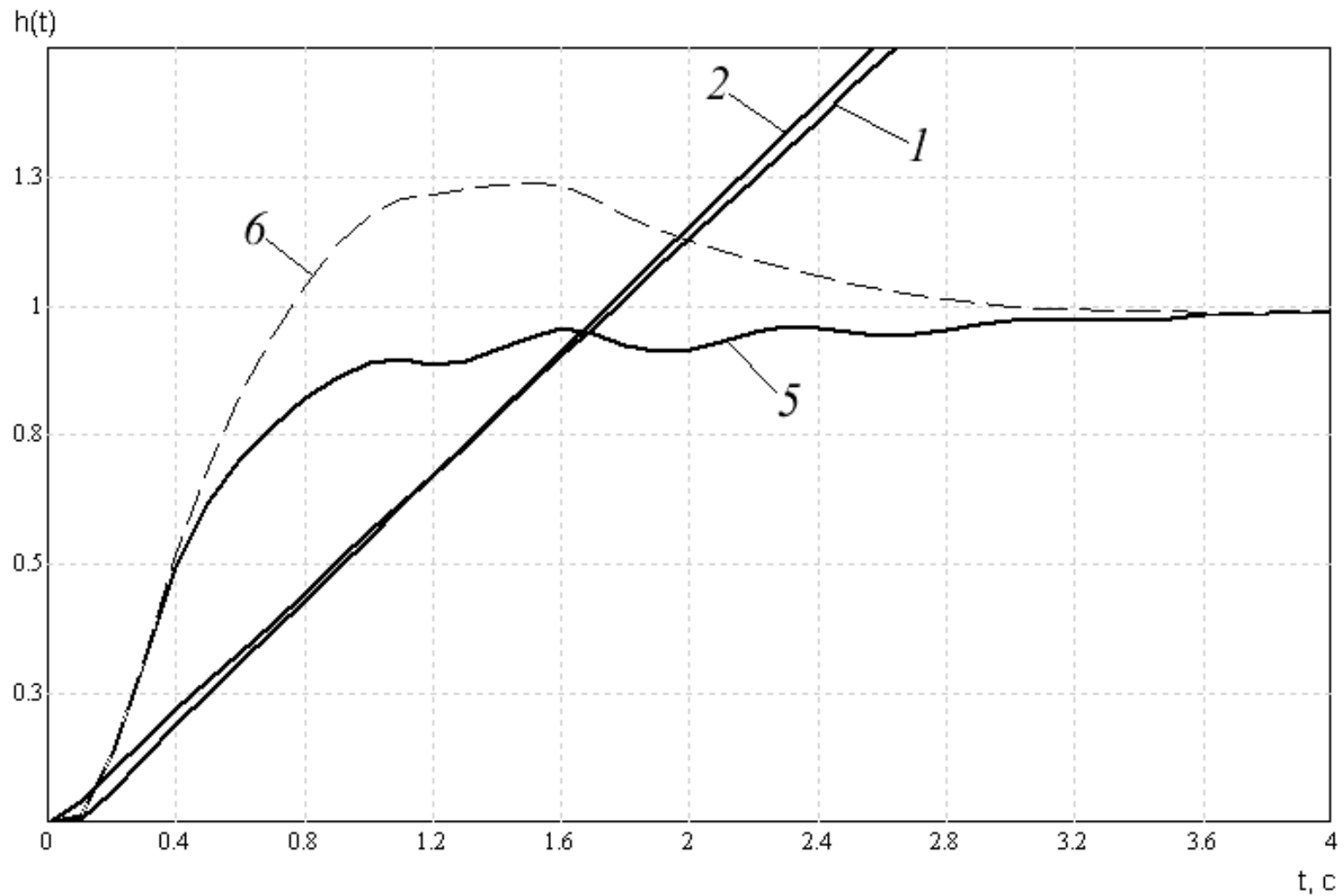


Рисунок 6 – Импульсные переходные характеристики модели системы управления ЦСП на основе электромеханического шагового позиционера

Это связано с возбуждением режима автоколебаний в окрестности точки позиционирования с малой амплитудой (менее половины величины погрешности позиционирования) и высокой частотой.

Проведены анализ устойчивости следящих систем и построение ЛАХ, ФЧХ, годографов с использованием критерия Найквиста, критерия Михайлова, критерия Попова [5, 6]. Расчет выполнен при помощи программного комплекса для моделирования и исследования систем и объектов “МВТУ” версии 3.5.

Результаты исследований подтверждают, что предложенная структура приближенной модели системы управления ЦСП обеспечивает качественное управление процессом позиционирования рабочих органов разделочно-филетировочного оборудования.

Разработка регулятора и оптимизация режимов позиционирования рабочих органов филетировочного оборудования выходят за рамки данной работы.

Список литературы

1. О мерах Правительства РФ по развитию судостроительной промышленности // Тезисы доклада заместителя министра промышленности и энергетики РФ А. Реуса на заседании Совета Федерации РФ 15 ноября 2006 года // Судовое снабжение и обслуживание. – 2006. – № 6. – С. 2–6.
2. Ломака, М.В. Микропроцессорное управление приводами / М.В. Ломака, И.В. Медведев. – М.: Машиностроение, 1990. – 96 с.
3. Бесекерский, В.А. Системы автоматического управления с микроЭВМ / В.А. Бесекерский, В.В. Изранцев. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
4. Букреев, В. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов интерполяции траекторий движения многокоординатных электроприводов / В. Букреев, Н. Гусев, М. Коваленко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 46–53.
5. Сердобинцев С.П. Автоматика и автоматизация производственных процессов в рыбной промышленности. – М.: Колос, 1994. – 335 с.
6. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / К.А. Пупков и др. Под общ. ред. Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
7. Агеев, О.В. Принципы построения адаптивной системы управления модульной рыбообработочной линией / О.В. Агеев, А.В. Шлемин // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2007. – №25(1). – Шифр Информрегистра: 0420700012\0001. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2007/01/pdf/13.pdf>.

8. Система управления универсальной рыбообделочной машиной: пат. 60312 РФ, МПК А22 С25/14 / О.В. Агеев, А.В. Шлемин; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2006128880; заявл. 08.08.06; опубл. 27.01.07; бюл. № 3.
9. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
10. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация: Учеб. пособие для вузов / В.В. Костюк и др. – Киев: Вища школа, 1985. – 359 с.
11. Промышленная робототехника / А.В. Бабич и др. Под общ. ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.
12. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
13. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
14. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы: Учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 319 с.
15. Сосонкин, В.Л. Концепция числового программного управления мехатронными системами: анализ современного мирового уровня архитектурных решений в области ЧПУ / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. – № 7. – С. 11–17.
16. Пospelов Ю.В. Механизированные разделочные линии рыбообработывающих производств. – М.: Агропромиздат, 1987. – 188 с.
17. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
18. Фатыхов, Ю.А. Ресурсосберегающее мехатронное управление оборудованием для разделывания и филетирования рыбы: Учеб. пособие / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2007. – 156 с.
19. Фатыхов, Ю.А. Применение систем технического зрения для повышения эффективности разделочно-филетировочных линий / Ю.А. Фатыхов, А.В. Шлемин, О.В. Агеев // Инновации в науке и образовании – 2007: Материалы V междунар. науч. конф. / КГТУ. – Калининград, 2007. – С. 400–402.
20. Фатыхов, Ю.А. Современный подход к разработке ресурсосберегающего разделочно-филетировочного оборудования / Ю.А. Фатыхов, А.В. Шлемин, О.В. Агеев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2007. – № 3 (298). – С. 91–94.