

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



**Курганкин Виктор Витальевич**

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О НЕПОСРЕДСТВЕННОМ  
ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ОПЕРАТОРОМ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре теоретической и прикладной механики.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
**Замятин Владимир Маркович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»  
**Годяев Александр Иванович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»  
**Черный Сергей Петрович**


Ведущая организация: ООО «Юргинский машиностроительный завод»

Защита состоится «    » декабря 2014 в 10 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.092.04 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета и на сайте [www.knastu.ru](http://www.knastu.ru).

Автореферат разослан «    » октября 2014 г.

Учёный секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.092.04  
кандидат технических наук

 **В.И. Суздорф**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Существенный прогресс и экономическая эффективность во многих областях промышленности связаны с уровнем развития подъёмно-транспортного машиностроения, ориентированного на широкое внедрение комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, ликвидации ручных погрузочно-разгрузочных работ и исключения тяжёлого ручного труда.

Проблема создания эффективного подъёмно-транспортного оборудования приобретает актуальность по мере повышения требований к качеству выполнения сборочно-монтажных работ.

Регуляторы, управляющие механизмами позиционирования подъёмно-транспортного оборудования, обычно настраиваются при вводе в эксплуатацию, а их параметры и структура остаются неизменными в процессе использования. Однако на практике часто возникает необходимость перемещения грузов, которые различаются по своим параметрам (как по габаритам, так и по массе). Это ухудшает точность работы и увеличивает время позиционирования, что снижает эффективность производства.

Диссертационная работа посвящена разработке способа управления системой позиционирования объектов (СПО) различной массы, объёма, конфигураций, подходов к получению математической модели (ММ) объекта управления (ОУ) и синтезу регуляторов для системы автоматического управления (САУ), а также экспериментальным исследованиям разработанных способа и подходов.

**Цель работы** – разработка СПО с использованием информации о непосредственном воздействии на объект оператором, включая программно-алгоритмическую и аппаратную части.

Основные задачи, решаемые в работе:

- анализ особенностей подъёмно-транспортного оборудования и существующих способов управления таким оборудованием;
- разработка способа управления СПО;
- разработка принципиальной схемы СПО на основе нового способа управления;
- разработка алгоритма получения ММ ОУ для реализации во встраиваемой системе (ВС);
- разработка алгоритма синтеза регуляторов для реализации во ВС;
- создание устройства управления позиционированием объекта на базе ВС с использованием разработанных алгоритмов;
- численные и экспериментальные исследования работы устройства позиционирования объекта.

**Методы исследования.** В работе использованы методы операционного исчисления, теории автоматического управления, численного решения уравнений и систем уравнений, вещественный интерполяционный метод,

принцип динамической компенсации, а также методы компьютерного моделирования и натурных испытаний.

**Научная новизна:**

– разработан новый способ управления СПО, отличающийся от существующих тем, что управляющие сигналы формируются на основе опроса датчиков натяжения и отклонения троса от вертикали при непосредственном воздействии оператора на объект;

– разработан алгоритм идентификации линейных непрерывных объектов, все полюсы и нули передаточных функций (ПФ) которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости, основанный на вещественном интерполяционном методе (ВИМ) и отличающийся от него определением структуры идентифицируемого объекта, наложением ограничений на форму тестовых сигналов и получением ПФ объекта с использованием дискретной модели;

– разработан подход к идентификации линейных непрерывных стационарных неустойчивых объектов, отличающийся тем, что используются преобразования временных характеристик, позволяющие провести идентификацию как для устойчивых объектов и на основе полученной ПФ вычислить ММ неустойчивого объекта.

**Практическая ценность.** Разработанные алгоритмы идентификации могут применяться для получения ММ линейных, непрерывных, одномерных, стационарных, детерминированных объектов на основе экспериментальных характеристик.

Алгоритмы идентификации объектов и синтеза разработаны для самонастройки регуляторов ВС управления.

Разработанные способ, алгоритмы и программное обеспечение ориентированы на повышение эффективности сборочно-монтажных производств и могут применяться как при создании самостоятельных грузоподъемных устройств для сборочно-монтажных работ, так и для модернизации легких (грузоподъемностью до 10 т) кранов.

Полученные разработки могут быть использованы в системах имитации невесомости для создания тренажеров подготовки космонавтов.

Подходы к получению ММ ОУ и синтеза самонастраивающихся регуляторов реализованы в СУ мехатронных модулей на базе контроллеров Ezi-Servo компании FASTECH Co (Республика Корея, г. Бучеон). Подход и алгоритм идентификации ОУ использованы при разработке монтажного робота в ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева». Результаты исследований и разработок использованы в учебном процессе Томского политехнического университета.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– способ управления СПО, отличающийся от существующих тем, что управляющие сигналы формируются на основе опроса датчиков натяжения и отклонения троса от вертикали при непосредственном воздействии оператора на объект;

– алгоритм идентификации линейных непрерывных объектов, все полюсы и нули передаточных функций (ПФ) которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости, основанный на вещественном интерполяционном методе (ВИМ) и отличающийся от него определением структуры идентифицируемого объекта, наложением ограничений на форму тестовых сигналов и получением ПФ объекта с использованием дискретной модели;

– подход к идентификации линейных непрерывных стационарных неустойчивых объектов, отличающийся тем, что используются преобразования временных характеристик, позволяющие провести идентификацию как для устойчивых объектов и на основе полученной ПФ вычислить ММ неустойчивого объекта.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлены на X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии», г. Томск, 2012, а также на семинаре компании FASTECH Co, Республика Корея, г. Бучеон, 2013.

Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении следующих научно-исследовательских работ в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы»: «Разработка способов и алгоритмов построения математических моделей объектов управления и синтеза регуляторов для систем автоматического управления», «Разработка самонастраивающегося регулятора», «Создание идентификатора для математического описания объектов управления», «Разработка программного и алгоритмического обеспечения системы адаптивного управления устройством интеллектуального позиционирования объектов переменной массы».

По теме диссертации опубликовано 5 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы из 95 наименований и 5 приложений. Объём работы составляет 133 страницы машинописного текста. Основная часть диссертации иллюстрируется 79 рисунками и 22 таблицами.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность решаемых задач диссертационного исследования, дана общая характеристика работы, сформулированы основные положения.

**В первой главе** предложен способ управления СПО, в котором формирование управляющих сигналов основано на анализе непосредственного воздействия оператора на объект. Для реализации предложенного способа разработана принципиальная схема СПО. Разработана процедура позиционирования объекта.

Управление грузоподъемным оборудованием может проводиться из кабины или с помощью подвесных коробок управления и магнитных пускателей. Применение таких способов управления не всегда оправдано. В случае если требуется точное позиционирование груза по месту (большинство сборочно-монтажных производств), необходима корректировка положения с помощью непосредственного воздействия на него.

Предлагаемый способ управления СПО предназначен для точного позиционирования объекта из точки А в точку В (рисунок 1) при непосредственном воздействии на него оператором.

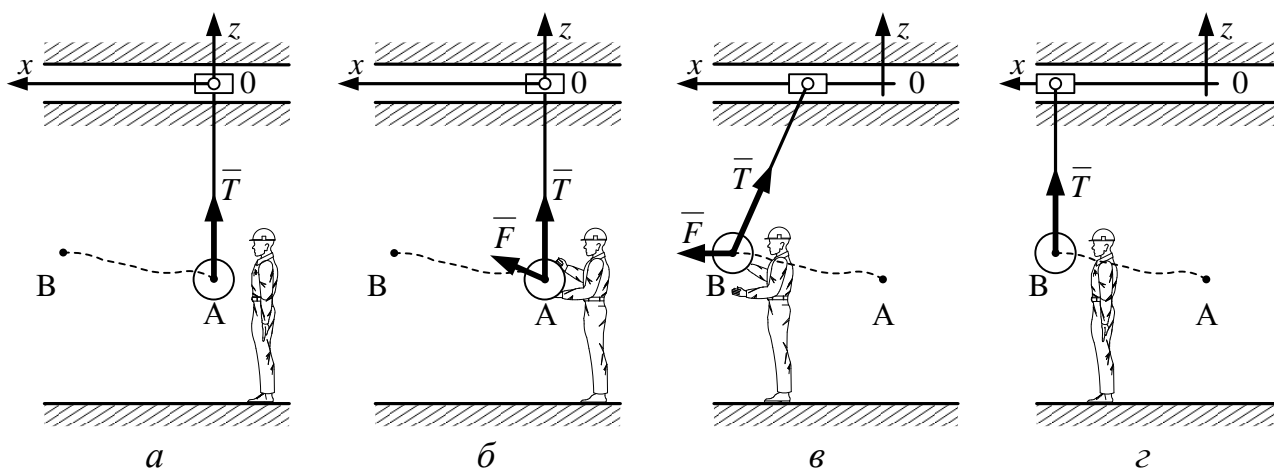


Рисунок 1

Оператор для позиционирования объекта, подвешенного на тросе (рисунок 1, а), задаёт траекторию его перемещения из точки А в точку В при помощи собственного усилия  $\bar{F}$ , приложенного непосредственно к объекту (рисунок 1, б). При этом трос отклоняется от вертикали на угол  $\bar{\varphi}$ . На основе данных о величине отклонения груза  $\bar{\varphi}$  и величине натяжения троса  $\bar{T}$  (рисунок 1, в) формируются управляющие сигналы на исполнительные механизмы и объект перемещается в заданную точку (рисунок 1, г).

Способ управления основан на анализе информации о трёх параметрах – силе натяжения троса  $\bar{T}$  и углах отклонения троса от вертикали  $\bar{\varphi}$  и  $\bar{\psi}$  (рисунок 2). Причём  $\bar{\varphi}$  и  $\bar{\psi}$  однозначно определяют направление движения груза в горизонтальной плоскости.

Разрабатываемая СПО представляет собой мостовой кран. Объект подвешивается на тросе, укрепленном на подвижной опоре, и с помощью исполнительных механизмов перемещается в пространстве.

Отличием данного устройства от имеющихся аналогов заключается в наличии

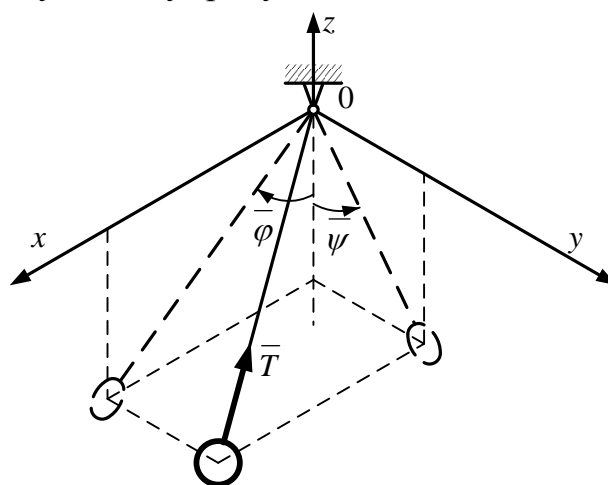


Рисунок 2 – Измеряемые параметры системы

датчиков, которые позволяют определить отклонение троса от вертикали и силу натяжения троса.

Принципиальная схема СПО изображена на рисунке 3. Блоки 1, 2, представляющие собой каретки с исполнительными механизмами, позволяют перемещать объект в горизонтальной плоскости по направляющим 3 и 4. Блок 5 представляет собой исполнительный механизм, который перемещает объект в вертикальном направлении. Блок управления 7, на основе сигналов поступающих с блока датчиков 6, формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы СПО, тем самым, перемещая объект в пространстве. В состав блока датчиков входят два датчика отклонения троса от вертикали и датчик натяжения троса. Блок управления реализован на базе ВС.

СПО позволяет позиционировать объект путём прямого на него воздействия оператором, а также повысить точность работы за счёт непосредственного контроля выполняемой операции.

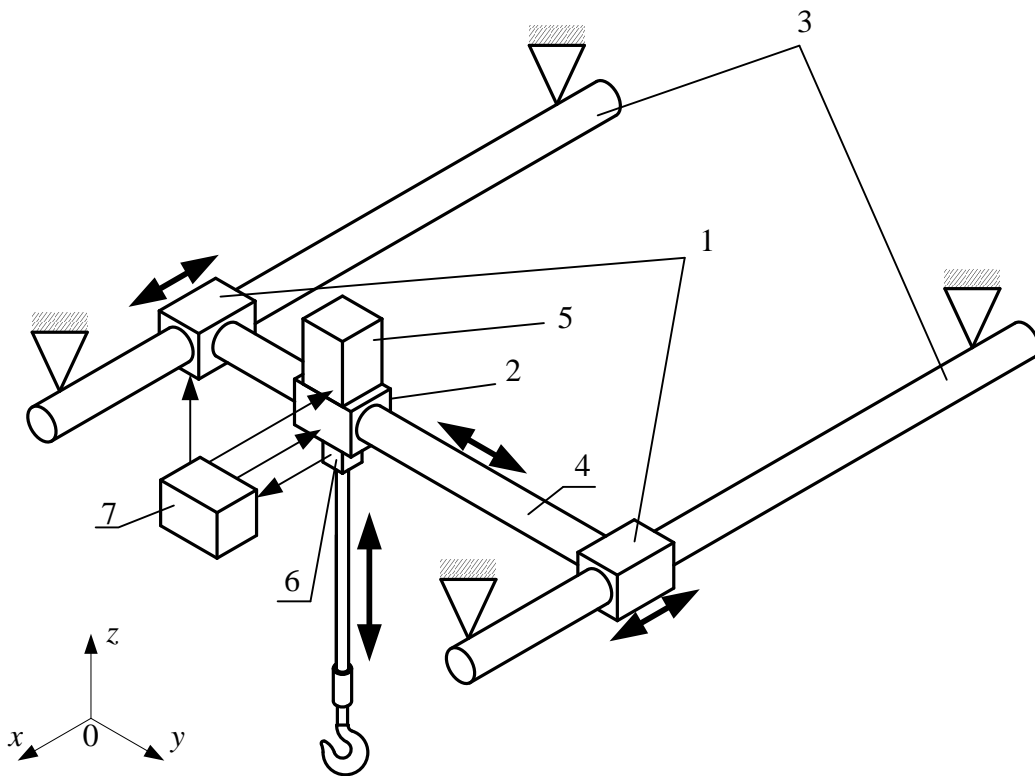


Рисунок 3 – Принципиальная схема СПО

Процедура позиционирования объекта выглядит следующим образом.

Оператор подвешивает объект и подаёт команду на блок управления, который перемещает объект в рабочую зону оператора. При этом формируются векторы входных и выходных данных, на основе которых происходит идентификация ОУ. Используя полученную ММ, блок управления синтезирует регуляторы для управления СПО. Оператор при помощи собственного усилия, приложенного непосредственно к объекту, позиционирует последний в заданную точку пространства и освобождает от него трос.

Из предложенной процедуры позиционирования объекта следуют несколько замечаний: во-первых, т.к. процедуры идентификации и синтеза реализуются в блоке управления (на базе ВС), то это накладывает

определенные ограничения на их быстродействие и занимаемую ими память; во-вторых, обе эти процедуры работают в автоматическом режиме, т.е. без участия оператора, а, следовательно, необходимы соответствующие алгоритмы; в-третьих, ММ ОУ определяется на основе реакции ОУ на входной тестовый сигнал (период дискретизации  $T_d$ ), который формируется при перемещении объекта в рабочую зону оператора.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы получения ММ линейных непрерывных объектов, относящихся к классу одномерных, стационарных, детерминированных. На основе ВИМ разработан алгоритм идентификации линейных непрерывных объектов, полюсы и нули ПФ которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости. Разработан подход идентификации линейных непрерывных неустойчивых объектов.

Задача идентификации заключается в получении ММ объекта по известным входному воздействию  $x(kT_d)$  и реакции объекта  $y(kT_d)$ , где  $k = \overline{0, N}$ ,  $T_d$  – период дискретизации,  $N$  – количество точек характеристик.

Линейный непрерывный объект, относящийся к классу одномерных, стационарных, детерминированных описывается ПФ вида

$$W_o(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_i s^i}, \quad m < n, \quad a_0 = 1, \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – коэффициенты ПФ;  $m$  и  $n$  – степени числителя и знаменателя ПФ.

Для решения задачи идентификации необходимо определить  $m$ ,  $n$ ,  $a_i$  и  $b_i$ .

В дальнейшем под параметрической идентификацией понимается нахождение коэффициентов  $a_i (i = \overline{1, n})$  и  $b_j (j = \overline{0, m})$  ПФ, но не  $m$  и  $n$ , а под структурно-параметрической идентификацией – нахождение  $m$ ,  $n$ ,  $a_i$  и  $b_j$ .

В основе алгоритма идентификации линейных непрерывных объектов, полюсы и нули ПФ которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости, лежит ВИМ.

Ключевые особенности алгоритма параметрической идентификации:

– идентификация проводится для дискретной модели ОУ вида

$$W_o^*(z) = \frac{\sum_{i=0}^n b_i^* z^i}{\sum_{i=0}^n a_i^* z^i}, \quad a_0^* = 1; \quad (2)$$

– тестовый сигнал имеет установившееся значение, причём неравное нулю;

– в качестве критерия адекватности модели используется оценка вида

$$\Delta y = \max_k \frac{|y_m(kT_d) - y(kT_d)|}{y_{уст}} \cdot 100\%,$$

где  $y_{уст}$  – установившееся значение снятой характеристики;  $y_m(kT_d)$  – реакция модели на тестовый сигнал  $x(kT_d)$ ;

– последний узел интерполирования находится на базе итерационного поиска, основанного на виде кривой ПФ объекта.



В данной работе переход от дискретной модели к непрерывной и обратно осуществляется на основе билинейных преобразований.

Замечание: если ММ линейного непрерывного объекта, полюсы и нули ПФ которого находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости, представлена как непрерывная ПФ (1), то её дискретный аналог – дискретная ПФ, – полученный на основе билинейных преобразований, имеет одинаковые порядки числителя и знаменателя, причём равные  $n$ . Следовательно, для процедуры структурно-параметрической идентификации объекта в виде дискретной ПФ достаточно определить параметры  $n$ ,  $a_i^*$  и  $b_i^*$ , где  $i = \overline{0, n}$ .

Структурно-параметрическая идентификация основывается на переборе структур модели (2), т.е.  $n = \overline{1, M}$ , где  $M$  – максимальный рассматриваемый порядок модели. Для каждого  $n$  производится параметрическая идентификация. Из полученных моделей выбирается та, для которой  $\Delta u$  минимален.

Затем на основе билинейных преобразований осуществляется переход к непрерывной модели. В результате формируется модель в форме (1).

В том случае, если ОУ неустойчив разработан подход идентификации таких объектов.

Непрерывная ПФ  $W_o(s)$  неустойчивых объектов содержит полюсы, расположенные справа от мнимой оси комплексной плоскости (рисунок 4).

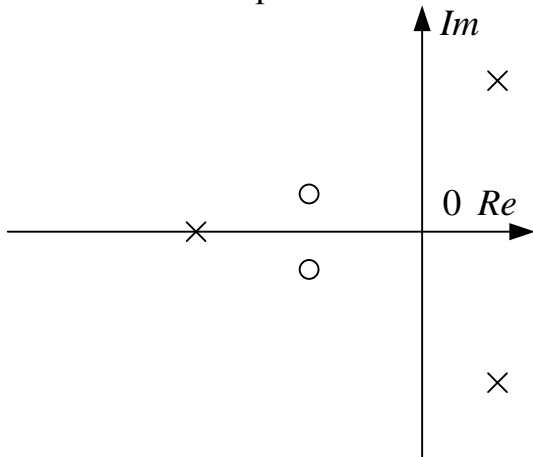


Рисунок 4 – Нули и полюсы  $W_o(s)$

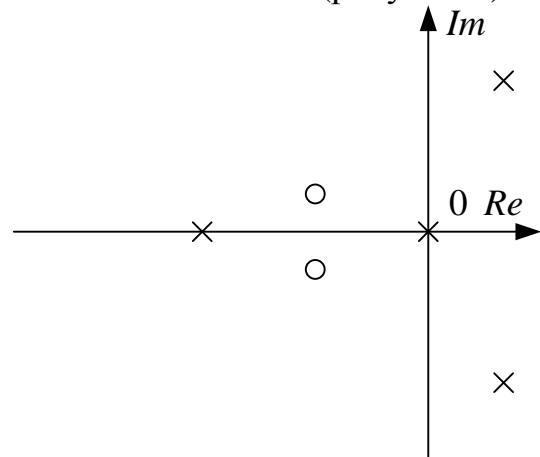


Рисунок 5 – Нули и полюсы  $Y(s)$

Обозначения:  $\times$  – полюс функции-изображения;  $\circ$  – нуль функции-изображения.

Обозначим функцию-изображение реакции объекта на ступенчатое воздействие с уровнем  $K$  как

$$Y(s) = W_o(s) \cdot \frac{K}{s} \xrightarrow{L^{-1}} y(t).$$

Причём  $Y(s)$  имеет нули и полюсы, представленные на рисунке 5.

Обратимся к свойству смещения изображений

$$f(t) \cdot e^{-\alpha t} \xrightarrow{L} F(s + \alpha), \quad \alpha > 0$$

и сместим нули и полюсы  $Y(s)$  на такую величину  $\alpha$  (рисунок 6 а), чтобы все они оказались слева от мнимой оси комплексной плоскости (рисунок 6 б)

$$f_{\text{сдв}}(t) = y(t) \cdot e^{-\alpha t} \xrightarrow{L} Y(s + \alpha) = W_o(s + \alpha) \cdot \frac{K}{s + \alpha}.$$

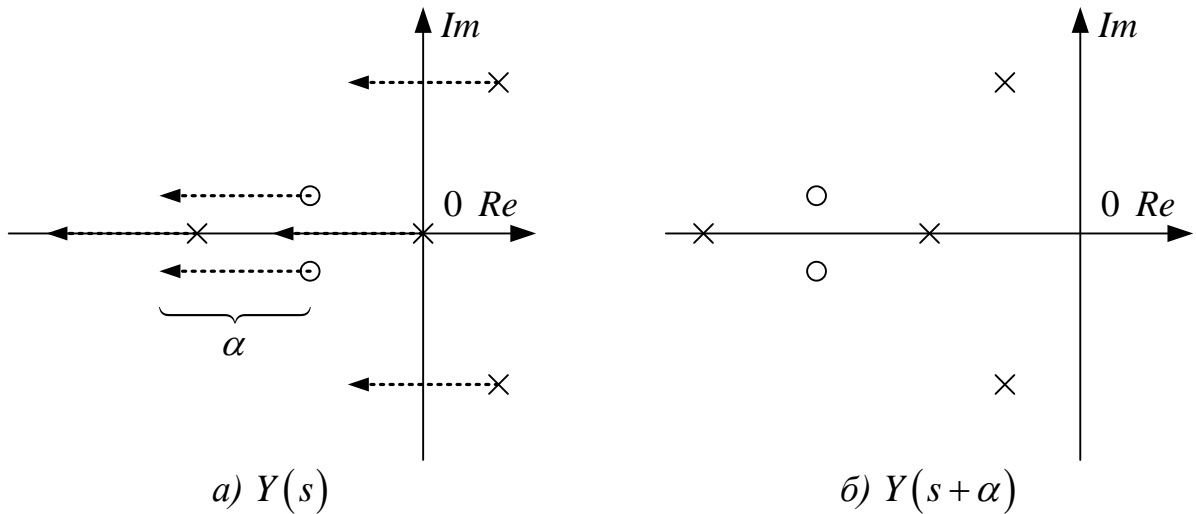
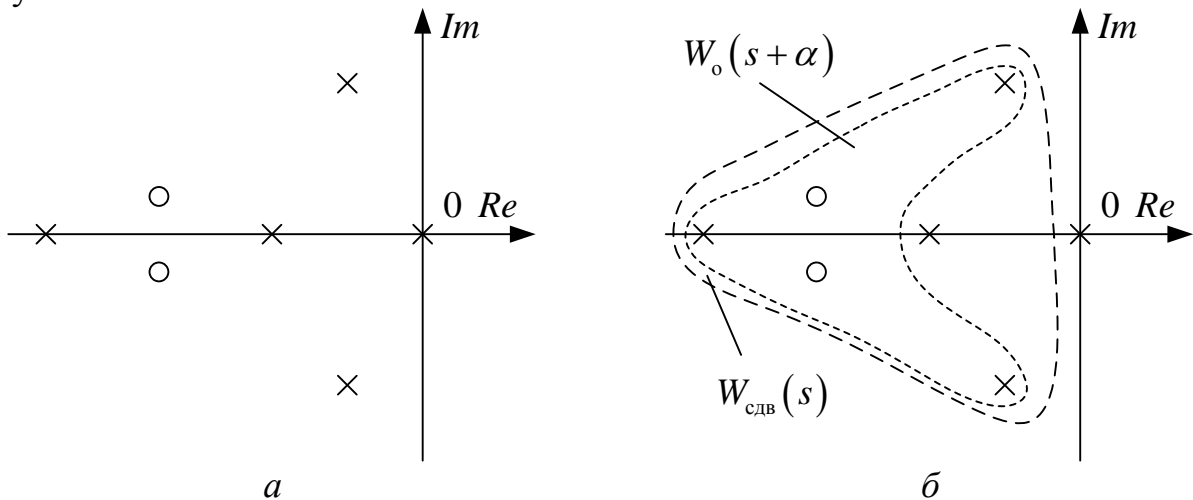


Рисунок 6 – Нули и полюсы функций

Проинтегрируем  $f_{\text{сдв}}(t)$  и получим

$$h_{\text{сдв}}(t) = \int_0^t f_{\text{сдв}}(t) dt,$$

функция-изображение которой имеет нули и полюсы, представленные на рисунке 7.

Рисунок 7 – Нули и полюсы  $H_{\text{сдв}}(s)$ 

$h_{\text{сдв}}(kT_d)$  определяется на основе  $f_{\text{сдв}}(kT_d) = y(kT_d) \cdot e^{-\alpha kT_d}$  и численных методов интегрирования.

Изображение функции  $h_{\text{сдв}}(t)$

$$h_{\text{сдв}}(t) \xrightarrow{L} H_{\text{сдв}}(s) = \frac{W_o(s + \alpha) \cdot K}{(s + \alpha) \cdot s}.$$

Обозначим

$$W_{\text{сдв}}(s) = \frac{W_o(s + \alpha) \cdot K}{s + \alpha}. \quad (3)$$

Полученная функция  $h_{\text{сдв}}(t)$  является переходной характеристикой (ПХ) объекта с ПФ  $W_{\text{сдв}}(s)$ .

ПФ  $W_{\text{сдв}}(s)$  находим с помощью алгоритма идентификации линейных непрерывных объектов, полюсы и нули ПФ которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости. После чего, используя (3), получаем

$$W_0(s + \alpha) = \frac{W_{\text{сдв}}(s) \cdot (s + \alpha)}{K}.$$

Заключительная операция

$$W_0(s + \alpha) \rightarrow W_0(s).$$

**В третьей главе** рассматриваются вопросы синтеза регуляторов САУ в классе одномерных систем.

Структурная схема САУ представлена на рисунке 8, где  $W_0(s)$  – ПФ ОУ;  $W_{\text{кв}}(s)$  – ПФ регулятора (КУ);  $x(t)$  – входной сигнал;  $y(t)$  – выходной сигнал;  $\varepsilon(t)$  – сигнал рассогласования;  $u(t)$  – сигнал регулятора.

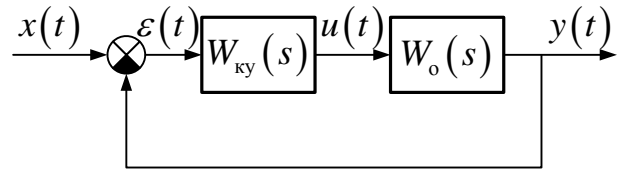


Рисунок 8 – Схема одноконтурной САУ

Заданы желаемые прямые показатели качества САУ: статический коэффициент передачи ( $k_3$ ), время регулирования ( $t_3$ ), перерегулирование ( $\sigma_3$ ).

Необходимо на основе заданных показателей качества синтезировать регулятор вида

$$W_{\text{кв}}(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_i s^i}, \quad m \leq n, \quad a_0 = 1. \quad (4)$$

При решении задачи синтеза для класса стационарных скалярных систем можно выделить два этапа:

– выбор эталонной ПФ  $W^3(s)$ , удовлетворяющей поставленным требованиям;

– определение параметров регулятора  $W_{\text{кв}}(s)$  из условия равенства эталонной и реальной ПФ.

Получение точного решения при нахождении ПФ КУ базируется на принципе динамической компенсации.

Поиск решения задачи синтеза регуляторов осуществляется в классе приближённых методов, использующих аппроксимацию основной зависимости во временной, вещественной или частотных областях. Такой подход позволяет получить методы, дающие хотя и приближённое, но физически реализуемое решение, обеспечивающее качество работы САУ, близкое к заданному.

В данной работе эталонная ПФ формируется двумя способами:

1) если  $\sigma_3 = 0$ , в качестве эталонной ПФ используется

$$W^3(s) = \frac{k_3}{\left[ \frac{t_3}{\ln(20)} \right] \cdot s + 1};$$

2) если  $0 < \sigma_3 < 100$  (%), в качестве эталонной ПФ используется

$$W^o(s) = \frac{k_3}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}.$$

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  однозначно зависят от  $\sigma_3$  и  $t_3$  и определяются с помощью итерационных алгоритмов поиска.

На основе имеющихся данных (эталонной ПФ и ПФ ОУ) согласно принципу динамической компенсации формируется ПФ КУ вида

$$W'_{\text{ку}}(s) = \frac{\sum_{i=0}^{m'} b'_i s^i}{\sum_{i=0}^{n'} a'_i s^i}, \quad (5)$$

которая не содержит ни нулей, ни полюсов, расположенных справа от мнимой оси комплексной плоскости.

Аппроксимация ПФ КУ проводится в три этапа:

1) сокращение близкорасположенных нулей ( $Z$ ) и полюсов ( $P$ ) осуществляется согласно условию

$$\frac{|Z_i - P_k|}{\sqrt{|Z_i \cdot P_k|}} < r, \quad 1 \leq i \leq m', \quad 1 \leq k \leq n',$$

где  $r$  – заданное вещественное число.

2) приведение ПФ КУ к физически реализуемому виду. В случае если  $m' > n'$ , то используется приближённое равенство

$$W'_{\text{ку}}(s) = \frac{\sum_{i=0}^{m'} b'_i s^i}{\sum_{i=0}^{n'} a'_i s^i} = \sum_{i=0}^{m'-n'} c'_i s^i + \frac{\sum_{i=0}^{n'-1} c_i s^i}{\sum_{i=0}^{n'} a'_i s^i} \approx W_{\text{ку}}(s) = c'_0 + \frac{\sum_{i=0}^{n'-1} c_i s^i}{\sum_{i=0}^{n'} a'_i s^i} = \frac{\sum_{i=0}^{n'} b_i s^i}{\sum_{i=0}^{n'} a'_i s^i}.$$

3) аппроксимация ПФ по условию близости ПХ. Пусть заданы период дискретизации  $T_d$ , количество точек характеристики  $N$  и ПФ (5), у которой все нули и все полюсы лежат слева от мнимой оси комплексной плоскости, причём  $m' \leq n'$ . Для ПФ (5) формируется ПХ  $h'(kT_d)$ , где  $k = \overline{0, N}$ . На основе полученной  $h'(kT_d)$  проводится предложенная в диссертационной работе идентификация, но имеющая особенность, заключающуюся в следующем. При структурно-параметрической идентификации происходит перебор структур модели  $n = 1, 2, \dots$  до тех пор, пока не выполнится одно из двух условий: либо  $n = n'$ , либо  $\Delta y < \Delta y_{\min}$ , где  $\Delta y_{\min}$  – заданное вещественное число.

**В четвёртой главе** проводятся экспериментальные исследования разработанных способа управления перемещением объектов и алгоритмов построения САУ.

Для исследования разработанных способа управления СПО и алгоритмов построения САУ собран стенд в Томском политехническом университете. Характеристики испытательного стенда: габаритные размеры (ДхШхВ, мм) – 2500х2500х2500; размер рабочей зоны – 2000х2000х2000; масса объекта – 1...20 кг.

Разработанный способ управления предполагает, что значения углов отклонения троса от вертикали  $\varphi$  и  $\psi$  определяют направление и величину скорости перемещения объекта в плоскости  $xOy$  рабочей зоны.

Сделаем допущение, что  $\Delta T = T - T_0$  ( $T_0$  – сила натяжения троса в состоянии покоя) будет определять величину и направление перемещения объекта в вертикальном направлении, а точнее скорость изменения длины троса –  $\dot{l}$ . В результате получаем, что система «развязана» для всех каналов:  $\varphi \rightarrow \dot{x}$ ,  $\psi \rightarrow \dot{y}$ ,  $\Delta T \rightarrow \dot{l}$ . Поэтому для каждого канала используются методы синтеза регуляторов в классе одномерных систем.

Настройка регуляторов для каналов  $\varphi \rightarrow \dot{x}$  и  $\psi \rightarrow \dot{y}$  эквивалентна (рисунок 2).

ММ ОУ для канала  $\varphi \rightarrow \dot{x}$  получена в диссертационной работе:

$$W_{\varphi\dot{x}}(s) = \frac{1}{l \cdot s}. \quad (6)$$

Получена реакция объекта  $\varphi(t)$  на входной тестовый сигнал  $u_x(t) = 150 \cdot 1(t)$ . Результат идентификации на основе разработанного алгоритма с учётом выражения (6):

$$W_{\varphi\dot{x}}(s) = \frac{3,498571}{s}. \quad (7)$$

Характеристики реального объекта  $\varphi(t)$  и модели  $\varphi_M(t)$  представлены на рисунке 9.

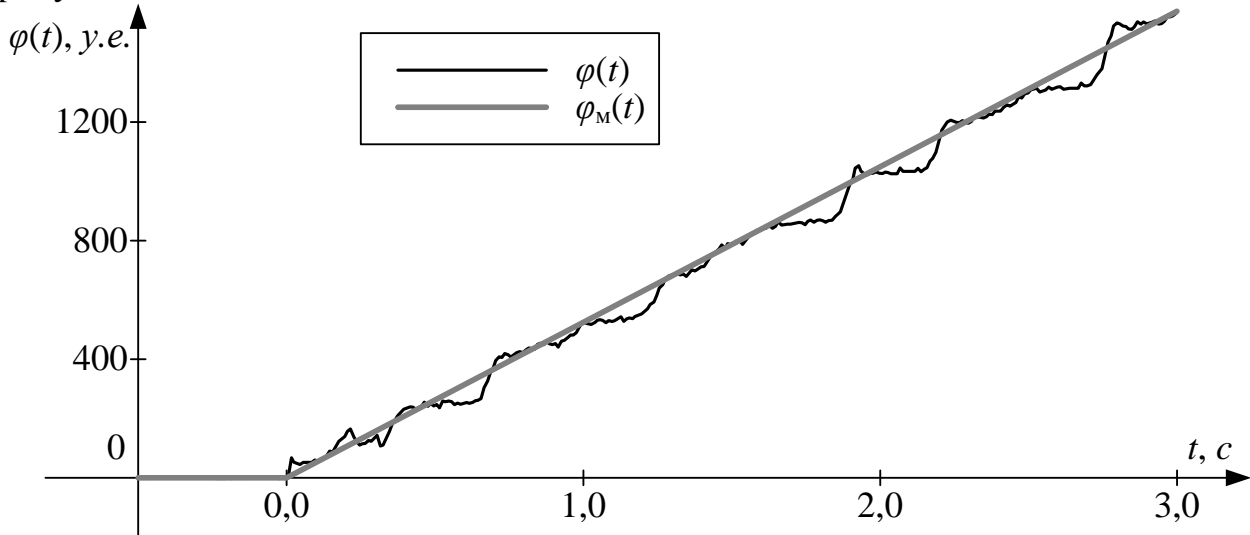


Рисунок 9 – Результаты идентификации

Заданные показатели качества САУ:  $k_3 = 1$ ;  $t_3 = 1$  с;  $\sigma_3 = 10\%$ .

На рисунке 10 представлена структурная схема САУ для канала  $\varphi \rightarrow \dot{x}$ . В результате синтеза получаем ПФ КУ

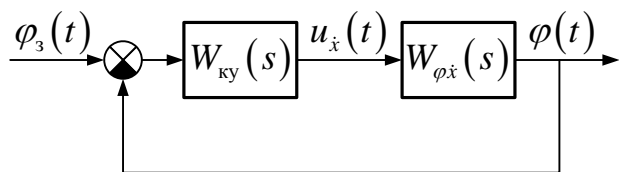


Рисунок 10

$$W_{\text{кy}}(s) = \frac{1,268572}{1,614952 \cdot 10^{-1} \cdot s + 1}. \quad (8)$$

Натурный эксперимент: ПФ (8) преобразуется в дискретную форму на основе билинейных преобразований для  $T_d = 0,005 \text{ с}$ , программно задаётся  $\varphi_3 = 750 \cdot 1(t)$ . Характеристики  $\varphi(t)$  и  $u_x(t)$  представлены соответственно на рисунках 11 и 12.

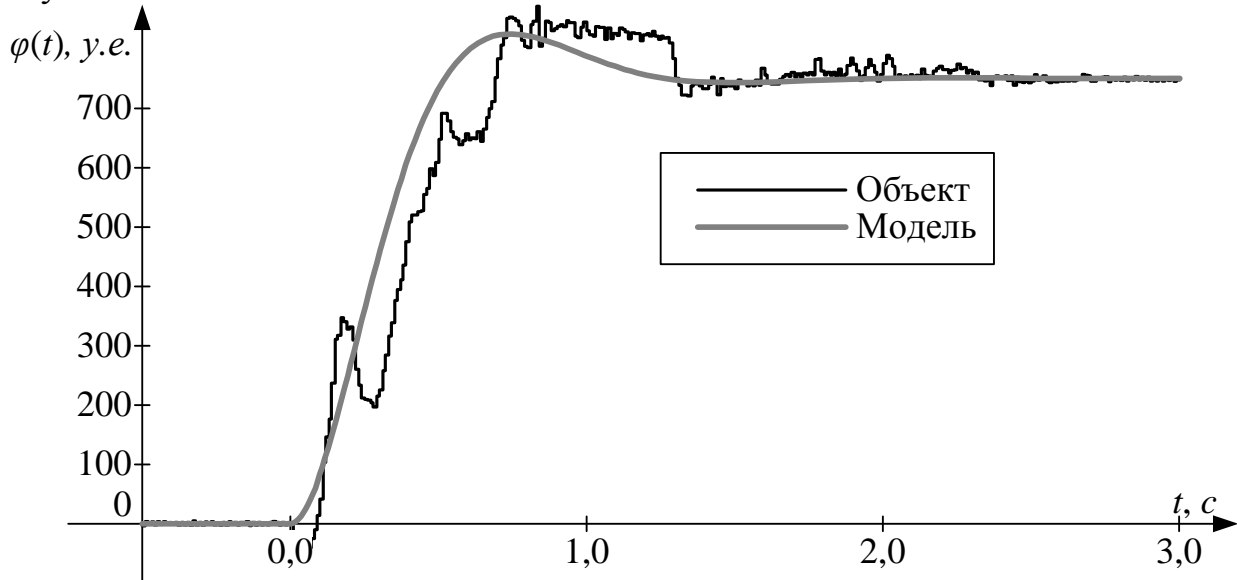


Рисунок 11 – Реакции эталонной САУ и реальной системы

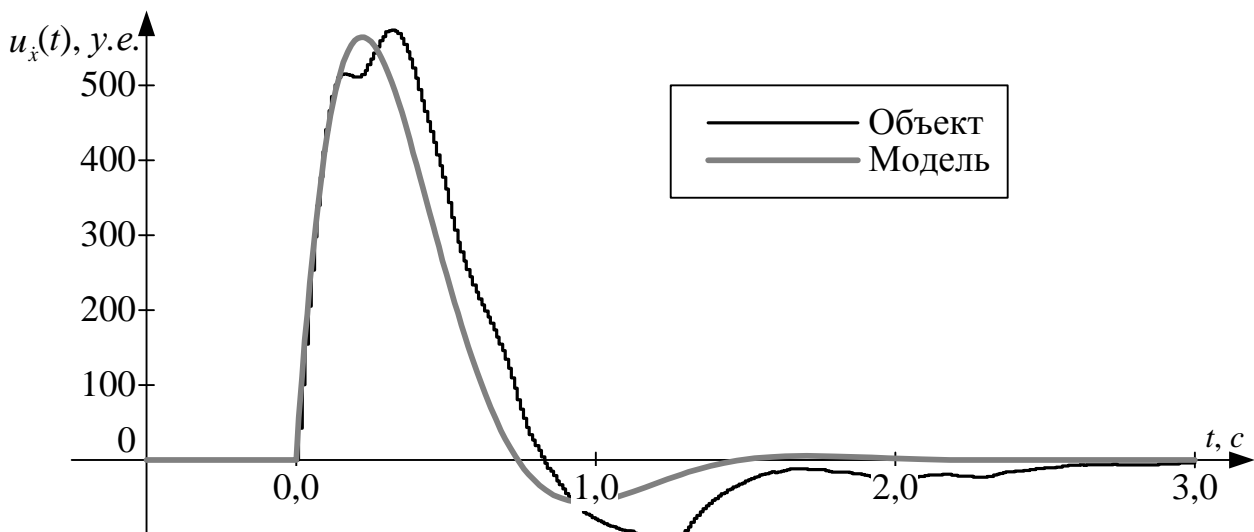


Рисунок 12 – Управляющий сигнал

Результаты эксперимента подтверждают, что ММ (7) описывает реальный объект (рисунок 9). Анализируя характеристику объекта (рисунок 11), можно утверждать, что САУ устойчива и синтезированный регулятор (8) выполняет основную функцию – стабилизация управляемой величины.

Из (6) следует, что ММ ОУ не зависит от массы объекта. Следовательно, нет необходимости во время эксплуатации устройства при смене объекта каждый раз производить синтез регуляторов САУ для перемещения объектов в горизонтальной плоскости. Синтез регуляторов достаточно производить при вводе в эксплуатацию.

Разработанный способ управления перемещением объектов предполагает, что скорость передвижения объекта в вертикальном направлении  $\bar{V}_z$  зависит от прикладываемой к объекту силы  $\bar{F}$ , которая в установившемся режиме равна  $(-\Delta T)$ .

В данной системе (рисунок 13) нет технических средств измерить ни прикладываемую оператором силу  $\bar{F}$ , ни скорость перемещения объекта в вертикальном направлении  $\bar{V}_z$ . Поэтому, во-первых, предположим, что  $|F| \approx |\Delta T|$ , а, во-вторых, скорость перемещения объекта в вертикальном направлении вычисляется на основе выражения

$$V_z \approx \frac{1}{m} \int \Delta T \cdot dt, \quad (9)$$

где  $m$  – масса объекта.

Заданные показатели качества САУ:  $k_3 = 0,01$ ;  $t_3 = 2$  с;  $\sigma_3 = 0\%$ .

Структурная схема САУ представлена на рисунке 14.

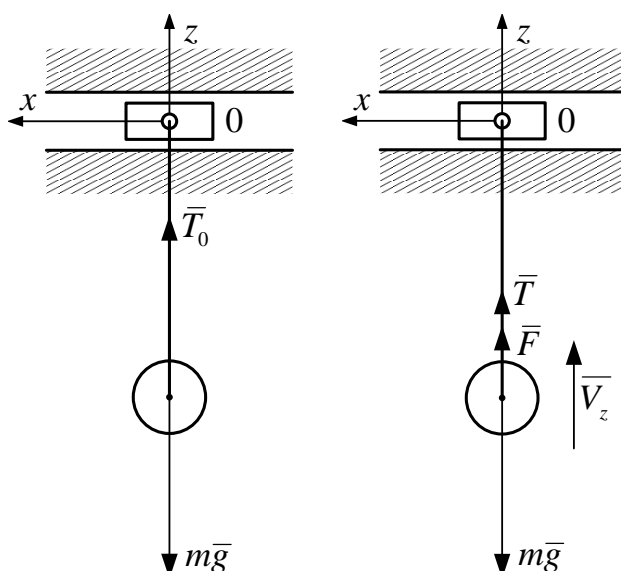
Получена реакция объекта  $\Delta T(t)$  на входной тестовый сигнал  $u_i(t) = 30 \cdot 1(t)$  для объекта массой  $m = 10$  кг.

В результате идентификации получена ПФ канала

$$W_{\Delta T i}(s) = \frac{\sum_{i=0}^2 b_i s^i}{\sum_{i=0}^5 a_i s^i}, \quad (10)$$

коэффициенты которой представлены в таблице.

Характеристики реального объекта  $\Delta T(t)$  и модели  $\Delta T_m(t)$  представлены на рисунке 15.



а) в состоянии покоя б) при приложении силы оператором  
Рисунок 13 – Силы, действующие в системе

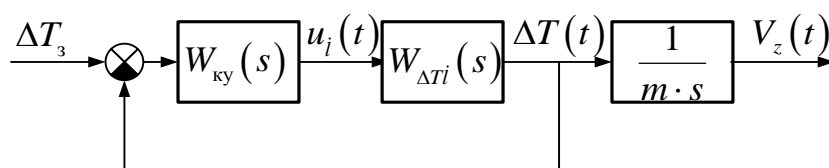


Рисунок 14

Таблица – Коэффициенты ПФ (10)

$i$	$a_i$	$b_i$
0	1,000000	0,000000
1	$8,040294 \cdot 10^{-2}$	$1,063971 \cdot 10^{-1}$
2	$2,316776 \cdot 10^{-3}$	$2,960324 \cdot 10^{-3}$
3	$8,332613 \cdot 10^{-5}$	–
4	$8,661152 \cdot 10^{-7}$	–
5	$5,087768 \cdot 10^{-9}$	–

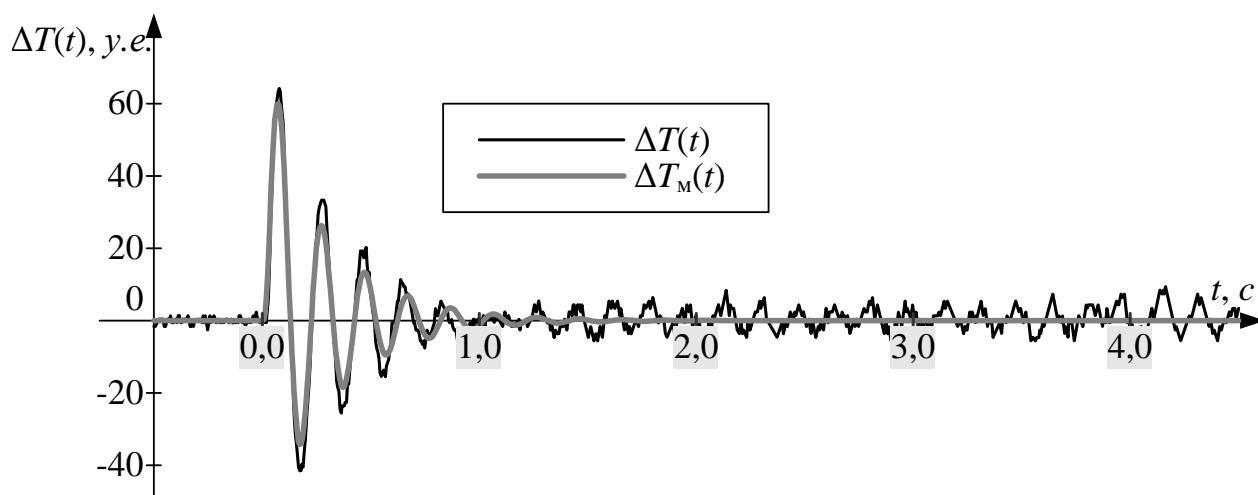
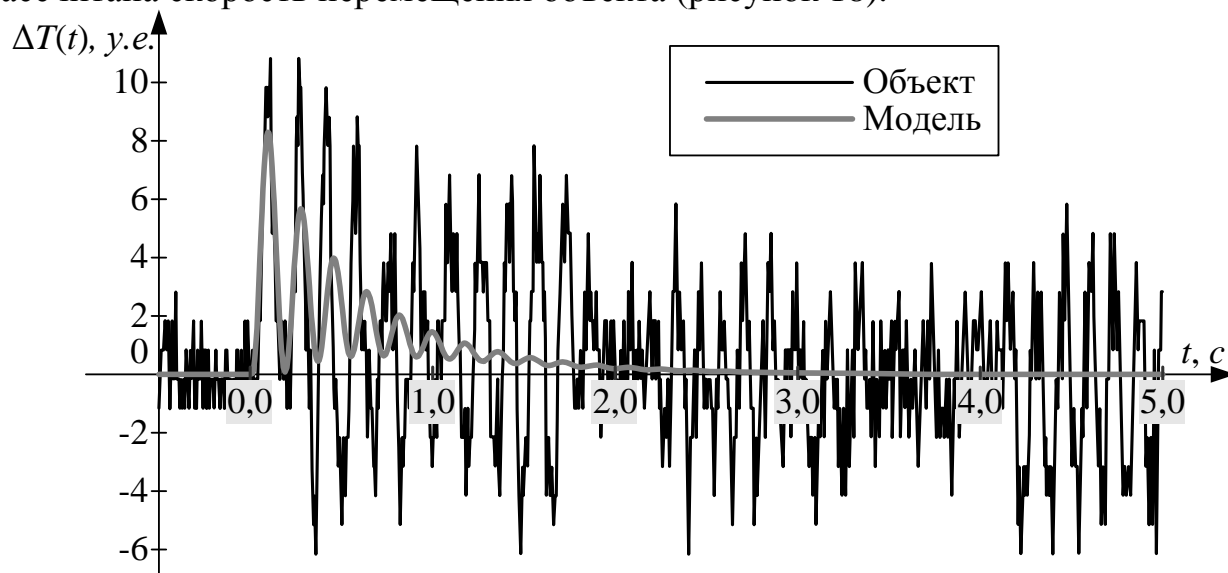


Рисунок 15 – Результаты идентификации

Результатом синтеза является ПФ КУ

$$W_{\text{ку}}(s) = \frac{9,547052 \cdot 10^{-5} s^2 + 7,226063 \cdot 10^{-2} s + 9,398748 \cdot 10^{-1}}{1,551052 \cdot 10^{-2} s^2 + 5,852877 \cdot 10^{-1} s + 1,000000}. \quad (11)$$

Натурный эксперимент: ПФ (11) преобразуется в дискретную форму на основе билинейных преобразований для  $T_d = 0,005$  с; измеряется сила натяжения объекта находящегося в покое ( $T_0$ ) и программно задаётся  $\Delta T_3 = 30 \cdot 1(t)$ . Характеристики  $\Delta T(t)$  и  $u(t)$  представлены соответственно на рисунках 16 и 17. На основе данных о  $\Delta T(t)$  (рисунок 16) и закономерности (9) рассчитана скорость перемещения объекта (рисунок 18).

Рисунок 16 – График изменения  $\Delta T$ 

Результаты эксперимента подтверждают, что ММ (10) описывает реальный объект (рисунок 15). Анализируя характеристику объекта (рисунок 18), можно утверждать, что САУ устойчива и синтезированный регулятор (11) выполняет основную функцию – стабилизация управляемой величины.



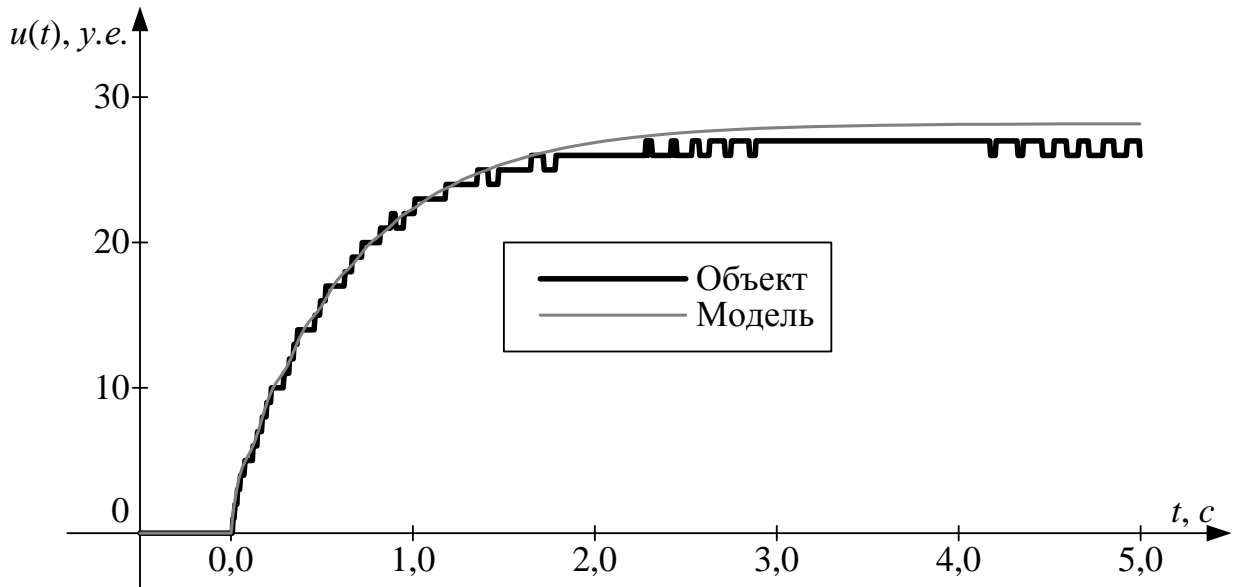
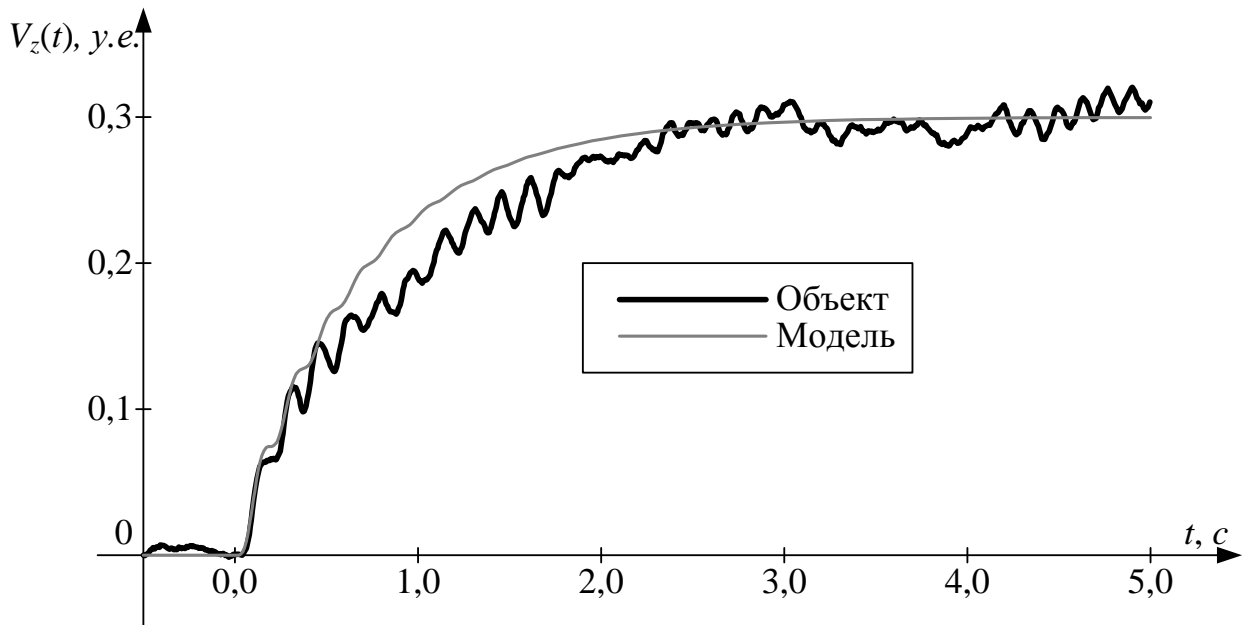


Рисунок 17 – Управляющий сигнал

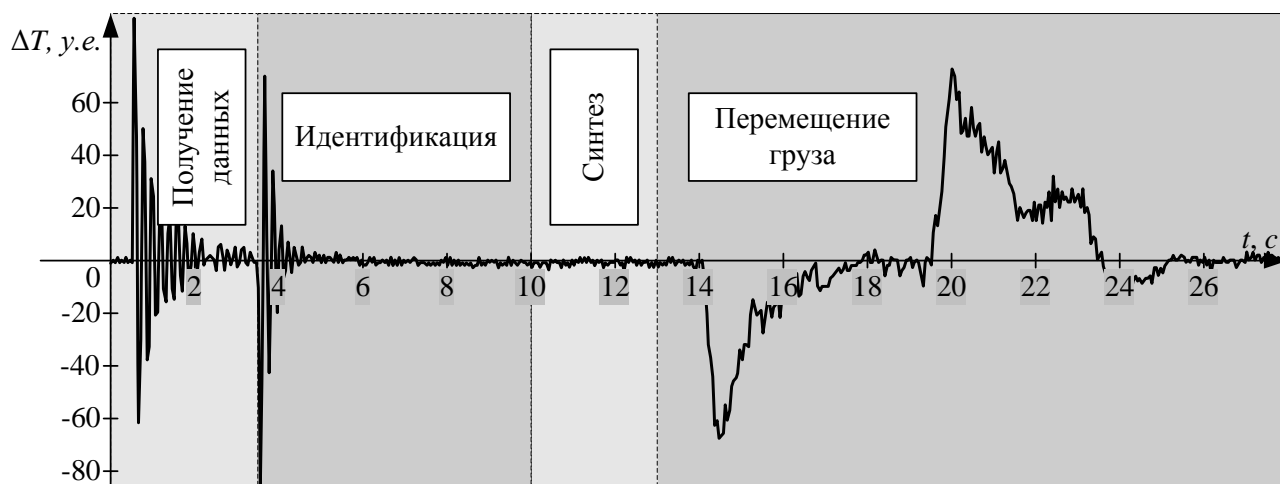
Рисунок 18 – Расчётная скорость перемещения объекта  $V_z$ 

При синтезе САУ сделано допущение, что канал  $\Delta T \rightarrow \dot{l}$  «развязан». Однако для более качественного процесса управления необходимо учесть, что т.к. оператор задаёт перемещение в горизонтальной плоскости с помощью собственного усилия, то за счёт этого воздействия он отклоняет трос от вертикали, тем самым изменяя силу натяжения (рисунок 1). Поэтому в процессе автоматического управления необходимо сделать поправку (вывод выражения представлен в диссертационной работе)

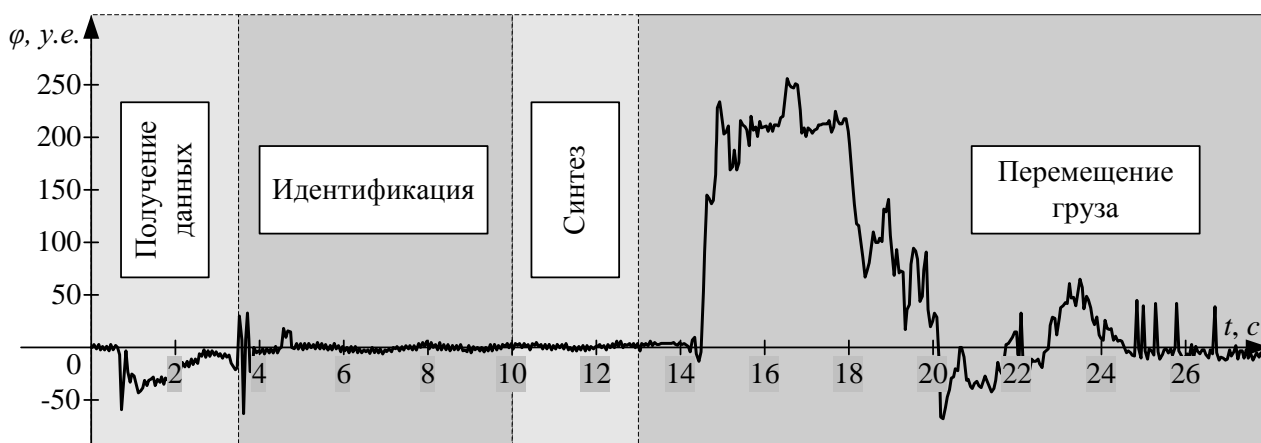
$$\Delta T \rightarrow \Delta T' = T - T_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi + \operatorname{tg}^2 \psi + 1}.$$

Для оценки работоспособности разработанного способа управления СПО и устройства для его реализации проведён натурный эксперимент с объектом массой 10 кг, который, согласно процедуре позиционирования, перемещён в заданную точку пространства. На рисунках 19 и 20 представлены графики сигналов снятых с датчиков и формируемых САУ. В настоящее время нет

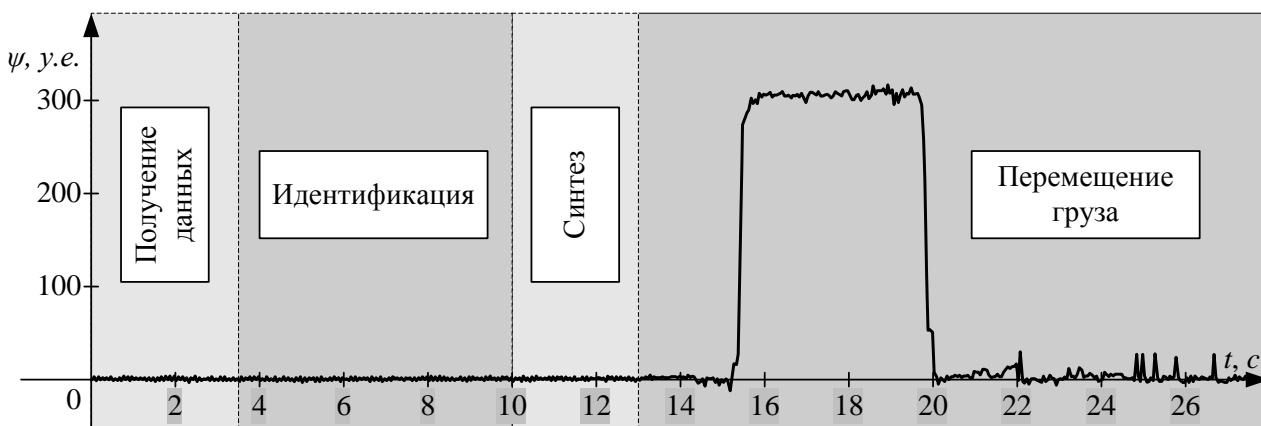
технических средств, позволяющих измерить реальное положение и скорость перемещения объекта; однако, т.к. в системе используются сервопривода, которые имеют жесткую зависимость величины задающего сигнала и скорости вращения вала, то  $\dot{x} \sim u_x$ ,  $\dot{y} \sim u_y$  и  $\dot{l} \sim u_z$ , а графики, представленные на рисунке 20, дают представление об изменении скорости движения объекта в декартовых координатах.



а) Изменение силы натяжения  $\Delta T$  троса

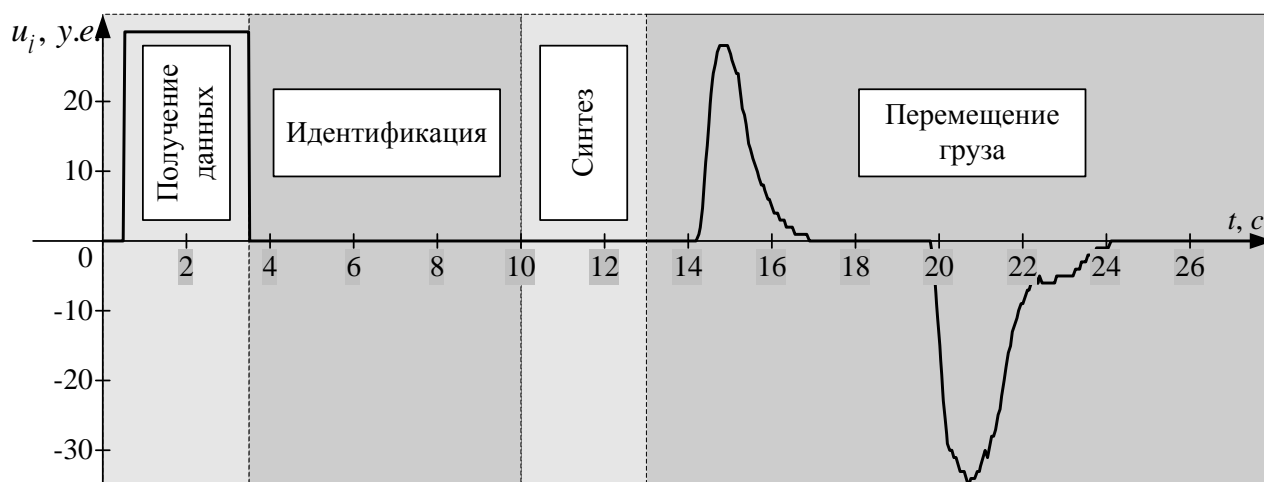


б) Угол отклонения  $\varphi$  троса от вертикали



в) Угол отклонения  $\psi$  троса от вертикали

Рисунок 19 – Измеряемые параметры системы



а) Для изменения длины троса

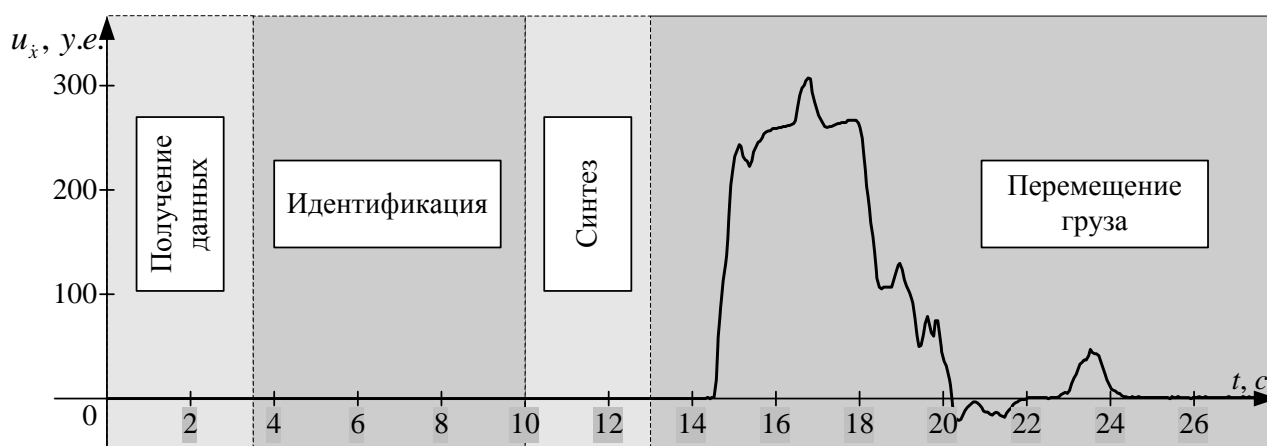
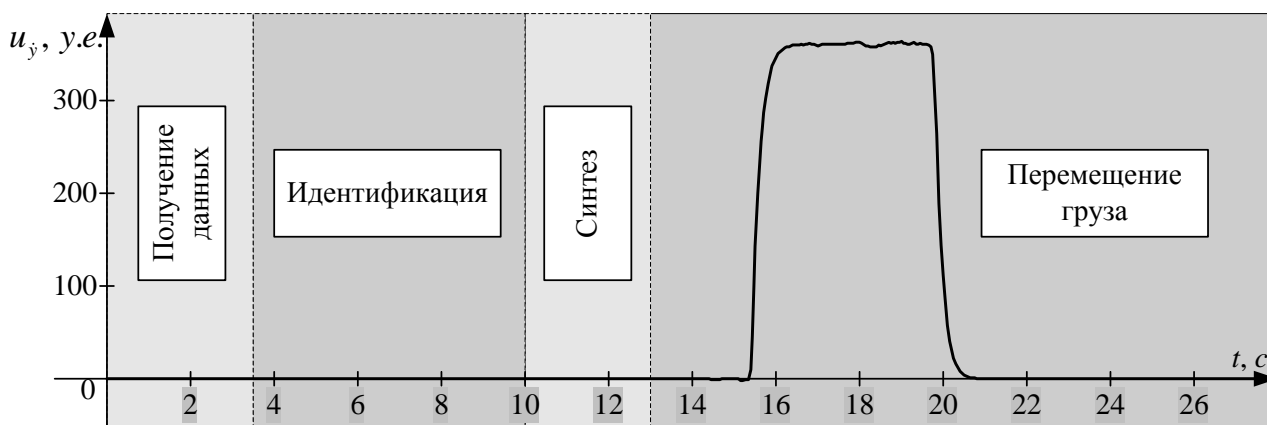
б) Для перемещения объекта в направлении  $Ox$ в) Для перемещения объекта в направлении  $Oy$ 

Рисунок 20 – Управляющие сигналы на приводы

Пояснения к рисункам 19 и 20:  $0 \leq t < 3,5$  – перемещение объекта в рабочую зону, формирование массивов входных и выходных данных;  $3,5 \leq t < 10$  – идентификация;  $10 \leq t < 13$  – синтез регулятора САУ;  $13 \leq t < 28$  – оператор при помощи собственного усилия, приложенного непосредственно к объекту, позиционирует последний в заданную точку пространства.

Анализ кривых показал, что разработанное математическое и программное обеспечение САУ позволяет получить ММ ОУ, провести синтез регуляторов, сформировать управляющие сигналы необходимые для позиционирования объекта в заданную точку пространства.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан новый способ управления СПО, отличающийся от существующих тем, что управляющие сигналы формируются на основе опроса датчиков натяжения и отклонения троса от вертикали при непосредственном воздействии оператора на объект. Применение такого способа управления позволит повысить точность позиционирования объекта за счёт непосредственного контроля человеком выполнения операции и улучшит комфортность условий труда.

2. Разработана принципиальная схема СПО, отличием которой от существующих является наличие датчика натяжения троса и датчиков отклонения троса от вертикали. Это позволит реализовать предложенный в п. 1 способ управления.

3. На основе ВИМ разработан алгоритм идентификации линейных непрерывных объектов, полюсы и нули передаточных функций которых находятся слева от мнимой оси комплексной плоскости. Алгоритм требует минимального участия проектировщика САУ, что позволяет реализовать автоматический режим его функционирования.

4. Разработан подход к идентификации линейных непрерывных неустойчивых объектов. Подход может быть применён для идентификации устойчивых объектов со статическим коэффициентом передачи равным нулю.

5. Разработан алгоритм синтеза регуляторов, который ориентирован для применения во ВС. В качестве исходных данных для синтеза выступают прямые показатели качества переходного процесса и структурная схема САУ. Алгоритм может выполняться в автоматическом режиме, вследствие чего применение разработанных алгоритмов идентификации и синтеза предоставляет возможность создания на базе ВС самонастраивающегося регулятора.

6. Сконструировано грузоподъёмное устройство на основе разработанного способа управления СПО, а также алгоритмах идентификации ОУ и синтеза регуляторов.

7. Проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов идентификации и синтеза регуляторов СПО. Показана работоспособность этих алгоритмов.

8. Проведен натурный эксперимент с устройством позиционирования объектов. Показана работоспособность способа управления позиционированием и разработанного устройства.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Пат. 2483997 Россия. МПК В65G 9/00 Способ управления перемещением грузов и устройство для его реализации / С.В. Замятин, В.В. Курганкин, В.М. Замятин. Заявлено 16.11.2011; опубл. 10.06.2013.
2. Zamyatin S.V., Kurgankin V.V., Rudnicki V.A. Embedded control system development for the solution of self-adjusted regulator design problem and its robustness properties estimation // Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical sciences. – 2014. – V. 62. – No 2. – P. 341–347.
3. Курганкин В.В., Замятин С.В., Алексеев А.С. Применение встраиваемых систем управления для решения задачи идентификации // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – №5. – С. 39-42.
4. Курганкин В.В., Замятин С.В., Замятин В.М., Пушкарев М.И. Синтез встраиваемой одноконтурной системы автоматического управления с самонастраивающимся регулятором и оценка ее робастности // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – №5. – С. 46-49.
5. Рудницкий В.А., Алексеев А.С., Курганкин В.В. Идентификация объектов управления в форме дискретных передаточных функции на основе вещественного интерполяционного метода // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №5. – С. 89-94.
6. Курганкин В.В., Замятин В.М. Интеллектуальное устройство позиционирования грузов // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных – Томск – 2012. – С. 234-236.