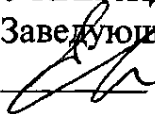


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

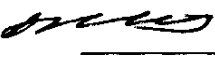


Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление и проектирование»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
 С.В. Ченцов
« 25 » 06 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

220700.62 Автоматизация технологических процессов и производств»

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ
СМЕСИ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ

Руководитель		<u>22.06</u> .2016 г.	проф., д-р техн. наук В. И. Иванчура
Выпускник		<u>22.06</u> .2016 г.	В. А. Матвеев
Нормоконтролер		<u>22.06</u> .2016 г.	Т. А. Грудинова

Красноярск 2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Синтез регулятора системы управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком» содержит 59 страниц текстового документа, 2 таблицы, 22 иллюстрации, 18 формул, 24 использованных источников.

ПРОЦЕСС УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ РАБОЧИМ ОРГАНОМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА, СИСТЕМА ВЫСОКОГО ПОРЯДКА, РАБОЧИЙ ОРГАН АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКА, ТРАМБУЮЩИЙ БРУС, ВИБРАЦИОННАЯ ПЛИТА, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА, ПИД-РЕГУЛЯТОР, АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ.

Объект исследования – система управления динамической системой с обратной связью, передаточная функция которой седьмого порядка, на примере процесса уплотнения асфальтоукладчиком.

Цель работы – разработка методики синтеза регулятора в системе с объектом управления, описываемым передаточной функцией седьмого порядка.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- анализ технологии процесса уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве автомобильной дороги;
- разработка функциональной и структурной схем системы управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси;
- создание математической модели системы в виде передаточных функций;
- создание имитационной модели системы;
- синтез регулятора системы управления аналитическим методом в частотной области;
- имитационное моделирование системы и исследование зависимости показателей качества переходной характеристики от задаваемых параметров.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Автоматизация процесса уплотнения асфальтоукладчиком	7
1.1 Автоматизация строительных дорожных машин.....	7
1.2 Технологическая схема асфальтоукладчика	9
1.3 Рабочий орган асфальтоукладчика	12
1.3.1 Трамбующий брус	13
1.3.2 Вибрационная выглаживающая плита	14
1.4 Функциональная и структурная схемы САУ	15
2 Синтез регулятора	19
2.1 Типовые регуляторы.....	19
2.2 Требования к системе управления	24
2.2.1 Критерии качества во временной области.....	25
2.2.2 Частотные критерии качества	26
2.3 Методы синтеза.....	27
2.3.1 Метод аналитического синтеза в частотной области	29
2.3.2 Настройка параметров регулятора по методу Циглера-Никольса.....	32
2.3.3 Метод Чина-Хронеса-Ресвика.....	34
2.3.4 Ручная настройка ПИД-регулятора	35
2.3.5 Численные методы оптимизации для настройки ПИД-регуляторов.....	36
2.4 Методика синтеза регулятора системы управления объектом высокого порядка	37
3 Имитационное моделирование САУ в программном пакете MATLAB&Simulink	39
3.1 Выбор среды разработки.....	39
3.2 Подготовка к синтезу	39
3.3 Исследование характеристик САУ с применением частотного метода	43
Заключение	56
Список использованных источников	57

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций развития отрасли дорожного строительства является внедрение автоматических систем управления рабочими процессами. Автоматизация процессов дорожно-строительных машин даёт возможность ускорять процесс, снижать трудоемкость и стоимость работ, повышать их качество, улучшать и облегчать условия труда обслуживающего персонала, обеспечивать безопасность выполняемых работ.

Асфальтоукладчик – центральная машина дорожно-строительного комплекта. Он обеспечивает укладку, профилирование и предварительное уплотнение слоя асфальтобетонной смеси. Асфальтоукладчик как объект управления представляет собой сложную техническую систему, состоящую из нескольких САУ. Автоматизация рабочего процесса асфальтоукладчика позволяет поддерживать ровность и толщину покрытия, рабочую скорость и направление движения, а также подачу, распределение и уплотнение смесей.

Качество дорожного покрытия в значительной степени определяется коэффициентом уплотнения асфальтобетонной смеси, зависящим от неоднородности толщины укладываемой смеси асфальтобетона и жесткости конструкции уплотняющего оборудования. В процессе уплотнения необходимо обеспечивать управление оборудованием по степени уплотнения асфальтобетонной смеси. В качестве уплотняющего оборудования на современных асфальтоукладчиках применяют систему "брус - плита".

В связи с тем, что постоянно растут требования к качеству укладки и долговечности дорожного полотна, повышение эффективности работы системы управления процессом уплотнения, обеспечивающей за асфальтоукладчиком заданную степень уплотнения асфальтобетонной смеси, с прогнозом получения высокого качества дорожного покрытия, является важной проблемой. И поэтому синтез регулятора как один из основных способов совершенствования систем автоматизации является актуальной задачей.

На сегодняшний день наиболее широко распространены ПИД-регуляторы (пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы). Они используются порядка в 90-95% регулирующих контуров. Такая популярность вызвана тем, что регулятор позволяет достичь поставленной цели управления для большинства технологических объектов, при этом его структура компактна и проста.

За всю историю своего использования и развития закон ПИД-управления дополнился нововведениями, призванными повысить его эффективно, это – реализация дифференцирования, борьба с насыщением интегральной составляющей и упреждающее управление. Однако ключевой проблемой в использовании ПИД-регулятора всегда являлся и является настройка его коэффициентов.

Первоначально это решалось с помощью человека-наладчика, который, на основе знаний и опыта, а так же интуиции, производил настройку регулятора, опираясь на данные, полученные в результате испытаний. Впоследствии появилось множество различных аналитических методов синтеза, а с появлением ЭВМ, и, следовательно, программируемых логических контроллеров (ПЛК), SCADA-систем и распределенных систем управления (РСУ), появились методы автоматической настройки.

Проблема синтеза регуляторов систем управления – одна из основных предметных задач теории автоматического управления. Синтез ПИД-регуляторов линейных систем управления достаточно хорошо изучен. Развитие теории синтеза систем управления объектами высокого порядка, является актуальной задачей.

Объект исследования: система управления динамической системой с обратной связью, передаточная функция которой седьмого порядка, на примере процесса уплотнения асфальтоукладчиком.

Целью бакалаврской работы является разработка методики синтеза регулятора в системе с объектом управления, описываемым передаточной функцией седьмого порядка. Для достижения цели поставлены задачи:

- анализ технологии процесса уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве автомобильной дороги;
- разработка структурной схемы системы управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси;
- создание математической модели системы в виде передаточных функций;
- создание имитационной модели системы;
- синтез регулятора системы управления аналитическим методом в частотной области;
- имитационное моделирование системы и исследование зависимости показателей качества переходной характеристики от задаваемых параметров.

1 Автоматизация процесса уплотнения асфальтоукладчиком

1.1 Автоматизация строительных дорожных машин

Земляные работы по трудоемкости составляют более 20 % всех строительных работ и выполняются в основном высокомеханизированным способом с применением современных экскаваторов, землеройно-транспортных, грунтоуплотняющих и других машин. Ручное управление этими машинами весьма утомительно для машиниста, требует большого сосредоточения, быстроты реакции, а иногда и значительных затрат физической силы. Например, на бульдозере за смену оператор производит до 13 тыс. переключений рычагов управления, а на скрепере — до 6 тыс. К концу смены машинист сильно утомляется, производительность его труда значительно снижается. Кроме того, не имея объективной информации о степени загруженности двигателей, перемещении РО, глубине копания и т.д., он вынужден управлять «вслепую», что не обеспечивает требуемого качества выполнения работ. Поэтому повышение производительности и точности земляных работ во многом определяется степенью автоматизации управления машиной, эффективностью и надежностью используемых средств автоматики.

Разнообразие условий работы, нестабильность производственного процесса, сложность выполняемых технологических операций не позволяют полностью исключить участие человека из процесса управления машинами для земляных работ. В связи с этим наиболее актуальна разработка систем частичной автоматизации в первую очередь технологических процессов управления, которые в наибольшей мере определяют безопасность и производительность труда, эффективность использования машин и решают следующие основные задачи:

- защита механизмов машин от аварий и перегрузок;
- контроль и регулирование двигателя (обычно двигателя внутреннего сгорания), обеспечивающие его надежную и экономичную работу;

- управление режимами копания, обеспечивающее максимально возможную толщину срезаемого слоя грунта (т.е. производительность) без поломки и перегрузки рабочих механизмов машины;
- управление траекторией движения РО, глубиной копания и циклом работы одноковшовых экскаваторов;
- управление режимами уплотнения грунта;
- дистанционное управление машинами при выполнении работ в опасных условиях (например, под водой, в зоне повышенной радиации и т.п.), а также при групповой работе нескольких машин и др.

Около половины всех работников, выполняющих земляные работы, заняты ручным трудом и главным образом на зачистных операциях. Поэтому ликвидация ручного труда является одной из важнейших задач в общей проблеме сокращения ручного труда в строительстве.

Автоматизация СДМ позволяет добиться следующих результатов:

- расширения функциональных возможностей машин (это машины с программным и дистанционным управлением для работы в недоступных, опасных или вредных для человека условиях). Также возможность с помощью автоматики выполнять земляные работы, которые кинематика машины легко позволяет осуществлять, в то время как способности машиниста ограничены (прямолинейное движение ковша экскаватора с целью сокращения зачистных работ; зачистные работы вблизи подземных коммуникаций);
- упрощения труда машинистов за счет автоматического управления при выполнении отдельных технологических операций, таких как наполнение ковша погрузчиков и экскаваторов, регулирование скорости рабочих движений, позиционирование РО;
- экономии топлива за счет оптимального регулирования гидропривода в зависимости от рабочей нагрузки, позволяющего максимально использовать механическую работу двигателя;

– повышения надежности машин, так как с помощью бортовых ЭВМ упрощается диагностика и появляется возможность раннего обнаружения неполадок;

– повышения безопасности работ с применением автоматической сигнализации и отключения привода в опасных ситуациях (это позволяет работать в условиях повышенной опасности).

1.2 Технологическая схема асфальтоукладчика

Асфальтоукладчики предназначены для приема асфальтобетонных смесей из транспортных средств, распределения по дорожному основанию слоем заданной толщины, разравнивания и предварительного уплотнения уложенного слоя. Их применяют при строительстве автомобильных дорог и аэродромов, городских улиц и площадей, а также при ремонте дорожных покрытий.

К укладчикам предъявляются следующие требования:

– обеспечение ровности поверхности укладываемого слоя в продольном направлении (просвет под рейкой 3 м не более 3 мм);

– обеспечение постоянства поперечного уклона поверхности (отклонения от заданного уклона не более 0,005 мм);

– обеспечение постоянства толщины укладываемого слоя;

– обеспечение постоянства ширины укладываемого слоя;

– обеспечение проектных высотных отметок по оси покрытия;

(в трёх последних случаях отклонения не должны превышать 10 мм от заданных параметров).

Асфальтоукладчик является сложной строительно-дорожной машиной, работающей совместно с автосамосвалами или перегружателем-накопителем, поставляющим для него асфальтобетонную смесь.

Основными технологическими параметрами, определяющими выбор асфальтоукладчиков для конкретных условий строительства, являются:

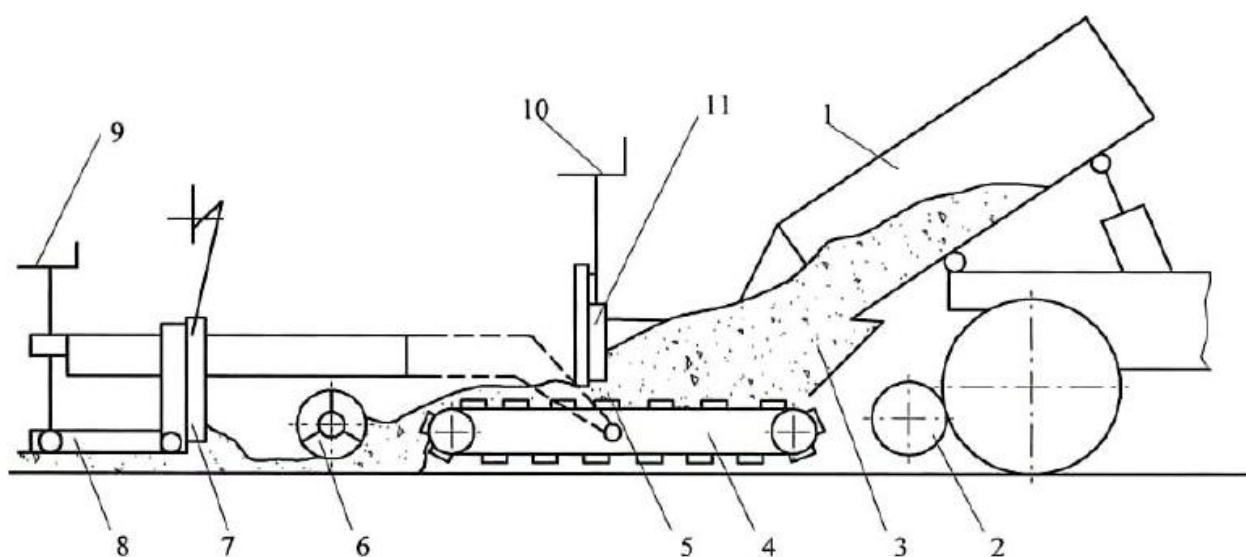
- диапазон ширины укладки, м;
- наибольшая толщина укладываемого слоя, мм;
- производительность питателей и шнеков (по распределению смеси), т/ч;
- вместимость приемного бункера, которая определяет производительность укладчика по приему смеси при постоянной скорости и безостановочном движении, т;
- диапазон рабочей скорости укладчика, которая также определяет производительность укладчика по распределению смеси, м/мин;
- мощность двигателя, кВт;
- масса асфальтоукладчика, определяющая выбор транспортного средства при перевозках, т;
- габариты, определяющие возможность размещения на стоянке и при транспортировке, м;
- тип ходовой части асфальтоукладчика.

Работает асфальтоукладчик следующим образом (рисунок 1). Смесь из автосамосвала 1, перемещаемая во время выгрузки толкающим усилием машины, через ролики 2 выгружается в приемный бункер 3. Из бункера смесь через регулируемое разгрузочное отверстие 5 у дна бункера подается с помощью скребковых питателей 4 на основание. Количество поступающей из бункера смеси регулируется заслонкой 11, которая перемещается в вертикальной плоскости винтами 10. По основанию смесь распределяется шнеками 6 на заданную ширину и уплотняется трамбуемым брусом 7 и виброплитой 8. Для получения заданного поперечного профиля рабочие органы (шнеки, трамбуемый брус, виброплита) состоят из двух частей – правой и левой, которые внизу соединены шарниром, а сверху – винтовой стяжкой.

Толщину укладываемого слоя по всей ширине укладываемой полосы асфальтобетонной смеси регулируют механизмом 9.

Асфальтобетонная смесь, доставляемая автосамосвалами, выгружается в бункер укладчика со стороны передней части машины, затем питателями подается из передней в заднюю часть за гусеничный ход машины, распределяется шнеком позади гусениц на ширину укладки, профилируется, выравнивается и уплотняется трамбуемым брусом и выглаживающей плитой. Окончательное уплотнение осуществляется катками.

Шасси обеспечивает передвижение асфальтоукладчика, прием и распределение асфальтобетонной смеси. Все сборочные единицы шасси расположены на нижней и верхней рамах, соединенных между собой.



1 – самосвал; 2 – упорный ролик; 3 – приемный бункер; 4 – скребковый питатель; 5 – разгрузочная щель; 6 – шнек; 7 – трамбуемый брус; 8 – выглаживающая плита; 9 – регулятор толщины слоя; 10 – регулировочный винт заслонки; 11 – заслонка бункера

Рисунок 1 – Технологическая схема асфальтоукладчика

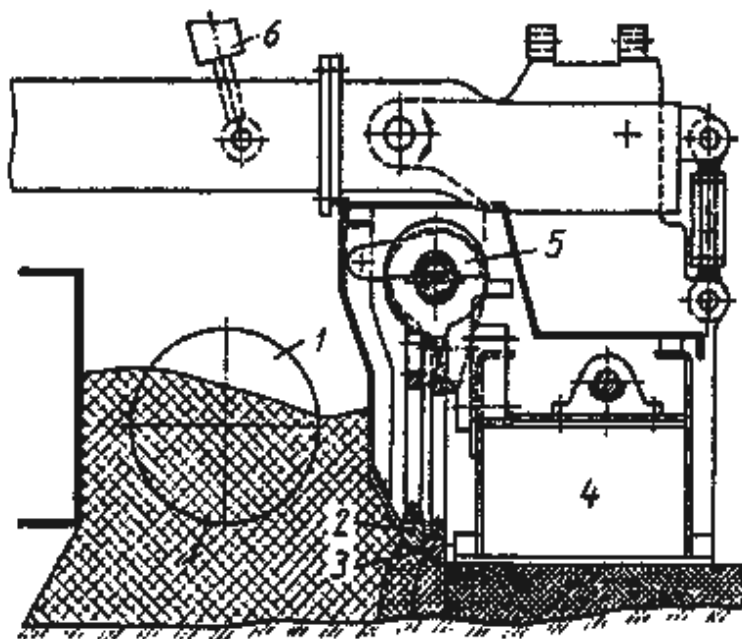
Ширина и толщина уплотняемого слоя являются конструктивными параметрами асфальтобетонного покрытия, поэтому наибольшее влияние на производительность асфальтоукладчика оказывает его рабочая скорость движения.

1.3 Рабочий орган асфальтоукладчика

Рабочие органы асфальтоукладчика предназначены для профилировки, предварительного уплотнения укладываемого слоя и отделки его поверхности.

Рабочие органы самоходных асфальтоукладчиков включают отражательный и торцовые щиты, трамбуемый брус и выглаживающую плиту. Предварительное уплотнение укатываемых асфальтобетонных смесей производят трамбуемым брусом и вибрационной выглаживающей плитой асфальтоукладчика, а окончательное – катками.

Смесь на дорожном полотне распределяется по всей ширине винтовыми конвейерами, уплотняется и выравнивается трамбуемым брусом и выглаживающей плитой.

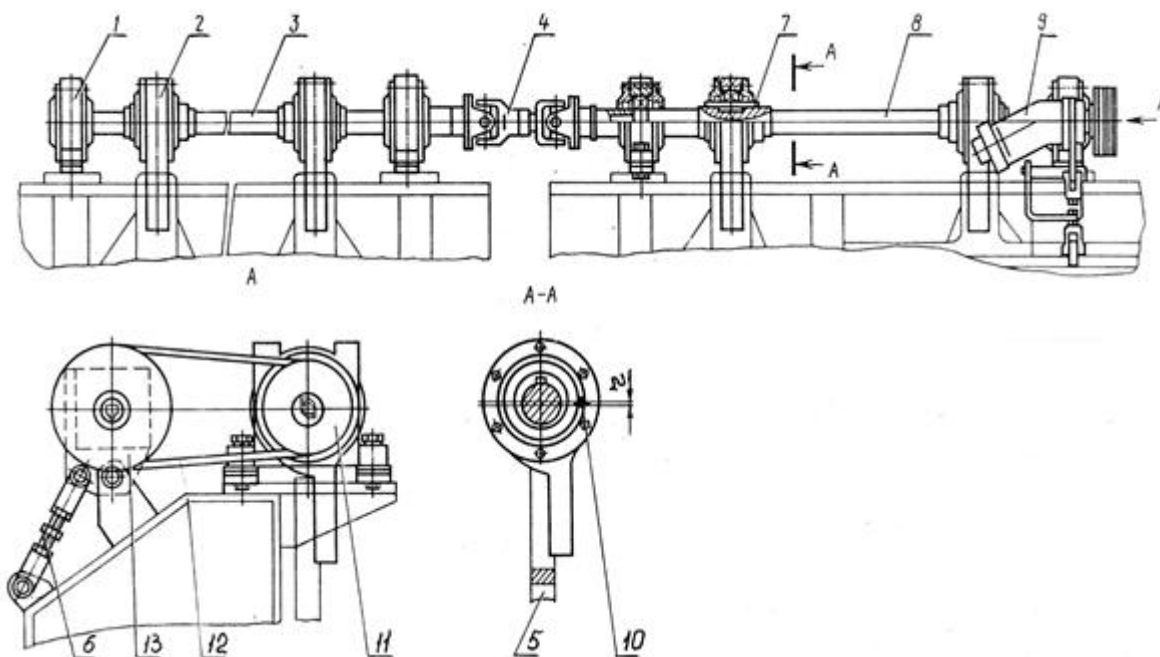


1 – распределительный шнек; 2 – трамбуемый брус предварительного уплотнения; 3 – основной трамбуемый брус; 4 – виброплита с синфазными вибраторами; 5 – привод трамбуемых брусьев; 6 – гидроцилиндр подъема и опускания бруса.

Рисунок 2 – Уплотняюще-выглаживающий рабочий орган асфальтоукладчика

1.3.1 Трамбующий брус

Трамбующий брус предназначен для предварительного уплотнения покрытия и его профилирования с помощью нижней кромки. Привод трамбующего бруса (рисунок 3) состоит из валов 3 и 8, соединенных между собой карданным валом 4. Валы, получающие вращение от гидромотора 9 через ведущий 13 и ведомый 11 шкивы и ремень 12, опираются на подшипниковые опоры 1. Эксцентриковые втулки 7, на шпонках посаженные на валы 3 и 8, сообщают шатунам 2 вращательное движение с заданным эксцентриситетом r . С шатунами связан трамбующий брус 5, вследствие чего он совершает возвратно-поступательные вертикальные движения с размахом $2r$.



1 – подшипниковая опора; 2 – шатун; 3 – вал; 4 – карданный вал; 5 – трамбующий брус; 7 – эксцентриковая втулка; 8 – вал; 9 – гидромотор; 11 – ведомый шкив; 12 – ремень; 13 – ведущий шкив

Рисунок 3 – Конструктивная схема привода трамбующего бруса

Трамбующий брус содержит трамбующий нож (рисунок 4). Его нижняя кромка специального профиля совершенствует плотность укладки. Нож выполнен из износостойкой стали.

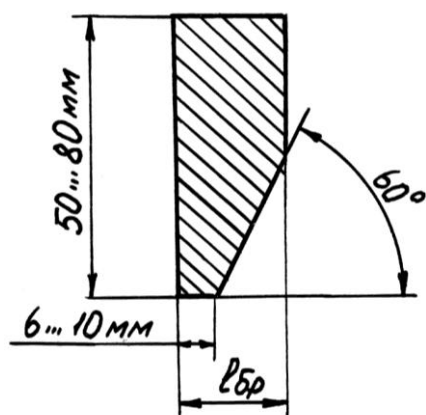


Рисунок 4 – Трамбующий нож

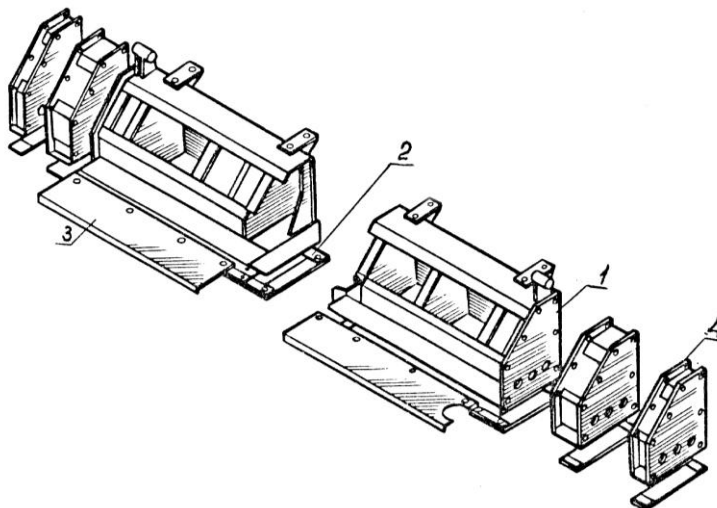
Ход современных трамбующих брусьев для большинства асфальтоукладчиков составляет 1,6 – 7,0 мм. Большие значения необходимы для уплотнения крупнозернистых, многощепенистых смесей и слоёв повышенной толщины. Частота колебаний трамбующего бруса обычно находится в пределах от 400 до 900 ударов в минуту.

1.3.2 Вибрационная выглаживающая плита

Выглаживающая плита служит опорой рабочего органа, формирует поперечный профиль, уплотняет укладываемое покрытие и производит его окончательную отделку.

Плита состоит из двух половин, соединенных между собой шарниром и механизмом регулировки поперечного профиля (Рисунок 5). Рама плиты 1 собирается из металлопроката на сварку, из специальных гнутых профилей. Снизу к раме 1 крепится подошва 2, имеющая гладкую поверхность для обеспечения выглаживания поверхности укладываемого слоя. К раме крепится настил 3, по которому перемещаются рабочие. На каждую часть виброплиты устанавливаются вибраторы, которые крепятся к её раме.

По бокам на выглаживающую плиту устанавливаются уширители 4. Вибраторы соединяются между собой карданными валами и имеют гидравлический привод, аналогичный трамбующему брусу.



1 – рама, 2 – подошва, 3 – настил, 4 - уширители

Рисунок 5 – Выглаживающая вибрационная плита

Поверхность контакта вибрационных плит с асфальтобетонной смесью представляет собой плоскость.

Для наибольшей эффективности уплотнения длина вибрационной плиты должна быть больше или равна глубине уплотнения. Ширина вибрационной плиты асфальтоукладчика определяется шириной укладки.

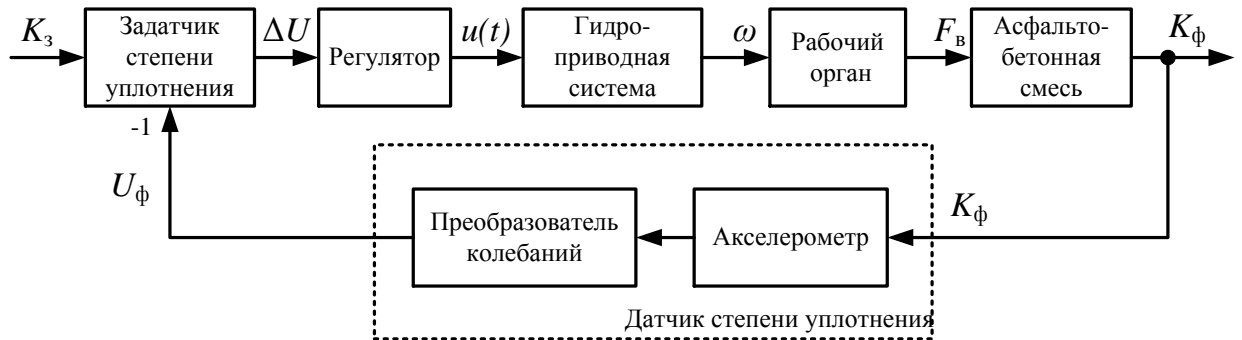
1.4 Функциональная и структурная схемы САУ

В состав системы автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси входят:

- 1) датчик степени уплотнения;
- 2) регулятор;
- 3) гидроприводная система;
- 4) рабочий орган (трамбующий брус + вибрационная плита);

- 5) датчик для измерения уплотнения смеси;
- 6) асфальтобетонная смесь.

Упрощенно функциональная схема САУ процессом уплотнения асфальтобетонной смеси изображена на рисунке 6.

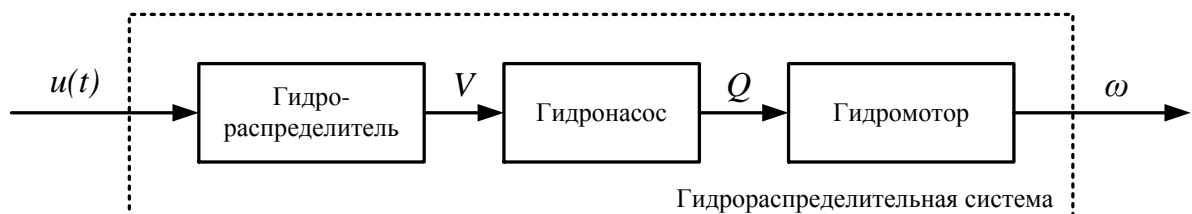


Обозначения на схеме: K_3 – заданный коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси; K_ϕ – фактический коэффициент уплотнения; ΔU – сигнал ошибки степени уплотнения; $u(t)$ – управляющий сигнал; ω – частота вращения гидромотора; F_v – возмущающая сила вибровозбудителя; U_3 – сигнал, соответствующий заданной степени уплотнения; U_ϕ – сигнал, соответствующий фактической степени уплотнения.

Рисунок 6 – Функциональная схема САУ

В гидроприводную систему (Рисунок 7) входит:

- 1) гидрораспределитель;
- 2) гидронасос;
- 3) гидромотор.



V – объем насоса, Q – расход

Рисунок 7 – Состав гидроприводной системы

Составим математическую модель системы управления, описывая каждый блок передаточной функцией. Модель представлена в виде структурной схемы (Рисунок 8).

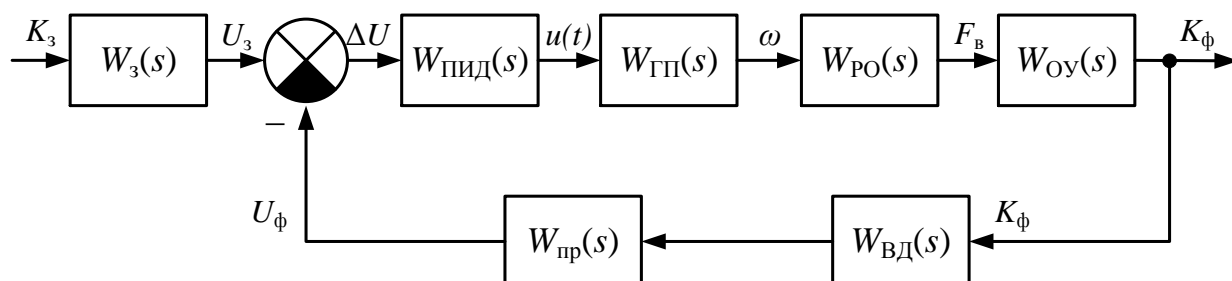


Рисунок 8 – Структурная схема САУ

Описание элементов САУ:

$W_3(s) = K_3$ – задатчик степени уплотнения асфальтобетонной смеси;

$W_{\text{ПИД}}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$ – передаточная функция бортового микропроцессора, где K_P – коэффициент передачи пропорциональной части корректирующего устройства; K_I – коэффициент передачи интегральной части корректирующего устройства; K_D – коэффициент передачи дифференциальной части корректирующего устройства;

$W_{\text{ГП}}(s) = \frac{1}{(T_{\text{ГП}}s + 1)(T_M^2 s^2 + 2\xi_M T_M s + 1)}$ – передаточная функция гидравлического привода, где $T_{\text{ГП}}$ – постоянная времени гидропривода; T_M – постоянная времени насоса; ξ_M – коэффициент демпфирования насоса;

$W_{\text{РО}}(s) = \frac{e^{\tau s}}{T_{\text{РО}}s + 1}$ – передаточная функция рабочего органа, где τ – время уплотнения;

$W_{\text{ОУ}}(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1}$ – передаточная функция объекта управления

(асфальтобетонная смесь);

$W_{\text{ВД}}(s) = \frac{K_{\text{ВД}}}{T_{\text{ВД}} s + 1}$ – передаточная функция вибродинамического датчика

контроля коэффициента уплотнения, где $K_{\text{ВД}}$ – коэффициент преобразования датчика; $T_{\text{ВД}}$ – постоянная датчика;

$W_{\text{пр.}}(s) = \frac{K_{\text{пр.}}}{T_{\text{пр.}} s + 1}$ – передаточная функция преобразователя

вибродинамических колебаний в напряжение для передачи его в сумматор, где $K_{\text{пр.}}$ – коэффициент преобразования; $T_{\text{пр.}}$ – постоянная преобразования.

2 Синтез регулятора

2.1 Типовые регуляторы

Под синтезом САУ понимают работу по расчету ее рациональной структуры и оптимальных параметров отдельных элементов. При решении задачи синтеза части структуры системы, такие как объект управления, регулирующие органы, средства измерения и т.д., известны. Неизвестной является регулирующая часть САУ. Задачей математического синтеза является определение оптимального, т.е. наилучшего в данных условиях, алгоритма или закона регулирования.

Такую задачу часто называют инженерным синтезом. Задачу инженерного синтеза можно считать завершённой, если расчет качества ожидаемого переходного процесса удовлетворяет требованиям к системе. Не исключены случаи, когда в рамках выбранной структуры это сделать не удастся. Тогда приходится использовать дополнительные сигналы, например, возмущения, производимые от отклонения, использовать местные обратные связи, вводить корректирующие устройства.

Имея в наличии структуру, алгоритм и его численные параметры, можно решать третью задачу – техническую реализацию. В подавляющем большинстве случаев регулятор собирается из типовых звеньев, поэтому под синтезом понимают более узкую задачу – расчет корректирующих устройств САУ.

ПИД-регулятор – устройство в цепи обратной связи, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения (уставки) и выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения.

Если какие-либо составляющие ПИД-регулятора не используются, то регулятор называют пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор), пропорционально-дифференциальным (ПД-регулятор), пропорциональным (П-регулятор) и т. п.

П-регулятор

П-регулятор – это устройство, описываемое идеальным коэффициентом усиления K_p :

$$W_p(s) = K_p \quad (1)$$

Пропорциональная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен установленному, то выходной равен нулю.

Однако при использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

Чем больше коэффициент пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка, однако при слишком большом коэффициенте усиления могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость.

Этот тип регулятора используется тогда, когда желаемых показателей качества в переходном и установившемся режимах можно достичь простой

настройкой коэффициента усиления системы, не прибегая к динамическим преобразованиям сигнала.

ПИ-регулятор

Этот регулятор применяется для повышения точности системы в установившемся режиме. Передаточная функция ПИ-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{PI}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

где T_I – постоянная времени интегрирования, K_I – коэффициент интегрирования.

Регулирование ПИ-регулятора происходит в два этапа:

1) Сначала пропорциональная составляющая оперативно приближает регулируемую величину к заданному значению и уменьшает основную часть ошибки регулирования до остаточной статической ошибки.

2) Затем интегральная составляющая компенсирует эту ошибку до заданного значения выходного сигнала. Во избежание перерегулирования, интегральную составляющую делают медленнодействующей.

Наличие пропорциональной составляющей в регуляторе обеспечивает быструю реакцию на появление ошибки регулирования, т.е. высокое быстродействие. За счет интегральной составляющей, которую называют изодромом, а сам регулятор изодромным, ПИ-регулятор дает высокую точность регулирования.

ПД-регулятор

Передаточная функция ПД-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{PD}(s) = K_P(1 + T_D s) = K_P + K_D s \quad (3)$$

где T_D – постоянная времени дифференцирования, K_D – коэффициент дифференцирования.

Пропорционально-дифференциальный регулятор применяется для повышения быстродействия работы системы. Регулирование по производной не имеет самостоятельного значения, так как в установившемся состоянии производная от ошибки равна нулю и управление прекращается. Однако она играет большую роль в переходных процессах, потому что позволяет учитывать тенденцию к росту или уменьшению ошибки. В результате увеличивается скорость реакции системы, повышается быстродействие, снижается ошибка в динамике.

Кроме того, пропорционально-дифференциальные регуляторы пригодны для стабилизации регулируемых систем с двумя нейтральными звеньями или с одним нейтральным и одним неустойчивым звеном. Повышение общего коэффициента усиления цепи регулирования приводит к уменьшению статических ошибок.

ПИД-регулятор

ПИД-регулятор применяют в системах управления тогда, когда требуется улучшить как вид переходного процесса, так и точность в установившемся режиме. Передаточная функция классического ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4)$$

Выделяют несколько различных форм ПИД-регуляторов. Наиболее популярные из них, используемые в технических системах:

1) *Классическая* или *нереализуемая* – наиболее известная и распространенная, передаточная функция которой приведена выше.

2) *Последовательная*, возникшая в результате применения ПИД-регуляторов в системах с пневматическими устройствами. Передаточная функция описывается формулой:

$$W_{PID}(s) = K_P (\alpha + T_D s) \left(1 + \frac{1}{\alpha T_I s}\right), \quad T_I \geq 4T_D, \quad \alpha = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_D}{T_I}}}{2} > 0. \quad (5)$$

3) *ПИД-регулятор с фильтром*. Классическая и последовательная формы регуляторов содержат чистое дифференцирование, что может вызвать ряд проблем, связанных с реализацией и большим коэффициентом усиления на высоких частотах, часто используют дополнительные фильтры, при этом можно выделить две подформы:

а) *ПИД-регулятор с фильтром дифференциальной составляющей:*

$$W_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s}\right), \quad N = 2 \dots 20; \quad (6)$$

б) *ПИД-регулятор с фильтром по входу:*

$$W_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \frac{1}{(T_f s + 1)^n}, \quad (7)$$

где T_f – постоянная фильтра, n – степень фильтра, выбираемая, как правило, $n = 1$.

2.2 Требования к системе управления

В процессе уплотнения необходимо обеспечивать управление оборудованием по степени уплотнения асфальтобетонной смеси. Особенностью рабочего процесса асфальтоукладчика является то, что настройка режимов уплотняющего оборудования осуществляется машинистом-оператором, с использованием имеющихся органов управления, на основе информационных данных методических рекомендаций, что является субъективной настройкой параметров, не позволяющей оперативно учитывать текущее состояние напряженно-деформированного состояния уплотняемой среды для обеспечения оптимальной степени уплотнения.

Формирование системы автоматического управления процессом уплотнения дорожно-строительных материалов, должно быть основано на информации о динамике рабочего процесса асфальтоукладчика. А это значит, что САУ должна оперативно принимать информацию и при необходимости влиять на параметры для качественного регулирования коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси.

К основным требованиям, предъявляемым к системе относятся:

- обеспечение требуемого коэффициента уплотнения;
- отсутствие перерегулирования системы в процессе работы;
- простота в настройке, при работе с САУ.

2.2.1 Критерии качества во временной области

Для оценки качества регулирования в замкнутой системе с ПИД-регулятором обычно используют ступенчатое входное воздействие и ряд критериев для описания формы переходного процесса (рисунок 9):

- максимум ошибки регулирования E_{\max} и момент времени t_{\max} при котором ошибка достигает этого максимума;
- декремент затухания d – отношение первого максимума ко второму, типовое значение $d = 4$ и более
- статическая ошибка $E_{\text{ст}}$ – это постоянная ошибка в равновесном, то есть в установившемся, или статическом, режиме системы;
- время регулирования (или установления) t_p с заданной погрешностью Δ – это время, по истечении которого погрешность регулирования не превышает заданного значения Δ , обычно 5%;
- перерегулирование σ – это превышение первого выброса над установившимся значением переменной, обычно выражается в процентах от установившегося значения;
- время нарастания t_n – это интервал времени, в течение которого выходная переменная нарастает от 10 до 90% от своего установившегося значения;
- период затухающих колебаний T (строго говоря, затухающие колебания не являются периодическими, поэтому здесь под периодом понимается расстояние между двумя соседними максимумами переходной характеристики).

Для систем управления в качестве тестового сигнала часто используют не функцию скачка, а линейно нарастающий сигнал, поскольку электромеханические системы обычно имеют ограниченную скорость нарастания выходной величины.

Приведённые критерии используются для оценки качества реакции как на изменение уставки, так и на воздействие внешних возмущений и шумов измерений.

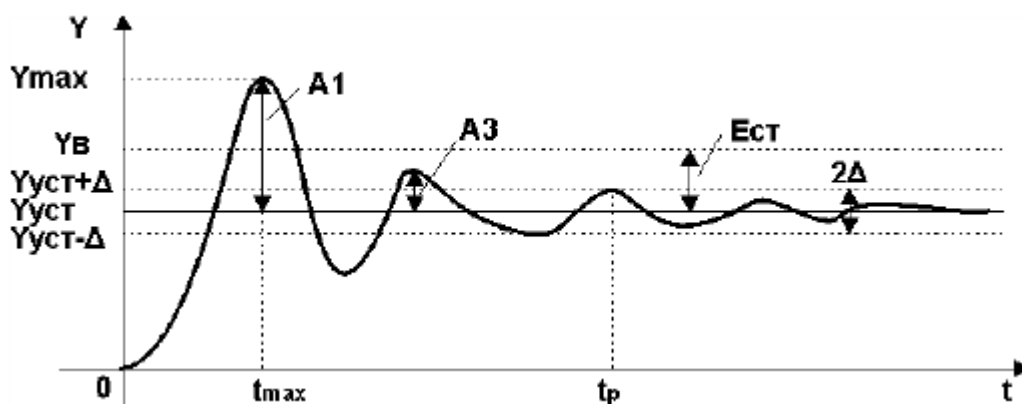


Рисунок 9 – Определение показателей качества по переходной характеристике

2.2.2 Частотные критерии качества

В частотной области обычно используются следующие критерии, получаемые из графиков логарифмической амплитудной и частотной характеристик (ЛАЧХ) замкнутой системы:

- полоса пропускания (или) по уровню -3 дБ (или по уровню $= 0,7$) – полоса частот от 0 до , в пределах которой кривая ЛАХ снижается не более чем на 3 дБ относительно её значения на нулевой частоте $L(0)$;

- колебательность M – отношение максимального (пикового) значения ЛАХ L_{\max} к её значению на нулевой частоте $L(0)$, то есть в установившемся режиме, типовыми значениями являются $M = 1,5...1,6$;

- резонансная частота системы – частота, на которой ЛАХ достигает максимума $L_{\max} = L(\omega_r)$.

Частотные критерии у реальных регуляторов не могут быть однозначно связаны с временными критериями из-за нелинейностей (обычно это нелинейности типа «ограничение») и алгоритмов устранения эффекта интегрального насыщения. Однако можно приближённо установить следующие зависимости между критериями в частотной и временной областях:

- $T_n \omega_{-3\text{дБ}} \approx 2$;
- частота максимума передаточной характеристики замкнутой системы приблизительно соответствует периоду затухающих колебаний отклика на ступенчатое входное воздействие — —;
- чем медленнее затухают колебания, тем больше показатель колебательности M .

2.3 Методы синтеза

Существующие на сегодня методы синтеза ПИД-регуляторов можно разделить на следующие группы:

1) *Интуитивная настройка*. Способ настройки подразумевает изменение параметров ПИД-регулятора независимо друг от друга по «интуиции» до тех пор, пока цель управления не будет достигнута.

2) *Характеристические методы*. Эти методы появились на основе практического опыта (так же как и методы Циглера-Никольса) и подразумевают настройку регулятора по данным полученным в результате испытания в разомкнутом контуре.

3) *Аналитические методы* (Алгебраический синтез). Параметры ПИД-регулятора вычисляются из аналитических или алгебраических зависимостей между моделью объекта и целью управления (например, метод внутренней модели (ИМС) и лямбда настройка). Как правило, аналитические методы дают простые формулы и могут быть использованы в адаптивных системах, однако

требуется цель управления в аналитической форме и достаточно точная модель объекта управления.

4) *Частотные методы.* Частотные характеристики объекта управления используются для настройки ПИД-регулятора. Как правило, эти методы ресурсоемки и применяются для синтеза робастных ПИД-регуляторов.

5) *Оптимальный синтез.* Эти методы можно рассматривать как особый вид оптимального управления, где коэффициенты ПИД-регулятора определяются с помощью численных методов оптимизации, компьютерных эвристики или эволюционных алгоритмов. Как правило, оптимизация требует значительное количество ресурсов и осуществляется во временной области.

Данная классификация не является исчерпывающей и ограничивающей. Некоторые методы, используемые на практике, относятся к нескольким группам.

Несмотря на то, что техника регулирования накопила достаточное количество новых подходов и методов, проектирование автоматических регуляторов и определение их параметров, удовлетворяющих конкретным требованиям к САУ, нуждаются в дальнейшей серьезной проработке. Учитывая современный уровень техники и требования практики, основным направлением решения проблемы является коренное совершенствование методов расчета регуляторов, а также создание адаптивных систем регулирования.

Критерии для выбора определенных методов ручного или автоматического проектирования регуляторов различаются незначительно. В большинстве случаев указанные методы применимы как для аналоговых, так и дискретных систем регулирования. Причем считается, что важно лишь обеспечить достаточное соответствие проекта реальному процессу, а уточнение параметров регулятора и характера динамических процессов в системе регулирования без проблем достигается на технологическом объекте в процессе внедрения. Большое значение при выборе метода настройки регуляторов

придается их простоте при использовании в проектной практике и нетрудоемкости при моделировании.

Ниже приводится краткое описание наиболее известных методов и способов настройки параметров ПИД-регулятора: аналитического синтеза в частотной области (частотный метод), методов Циглера-Никольса и CHR (характеристические методы), метода ручной настройки и метода оптимального синтеза.

2.3.1 Метод аналитического синтеза в частотной области

Аналитический синтез в частотной области или же *частотный метод синтеза* – это метод, использующий частотные характеристики системы управления в разомкнутом состоянии и основанный на критерии Найквиста. Этот метод не дает точных оценок о временных характеристиках, однако позволяет получить информацию о поведении системы в установившемся режиме (область низких частот), о запасах устойчивости и о полосе пропускания системы.

Получим уравнения для синтеза классического ПИД-регулятора. Его передаточная функция представлена формулой (4).

Диаграмма Найквиста для скорректированной разомкнутой системы $W_{p1}(j\omega_{cp1})$ на частоте среза ω_{cp1} проходит через точку $e^{j(-180^\circ+\gamma_1)}$, где γ_1 – запас по фазе (Рисунок 10). Или иначе,

$$W_{p1}(j\omega_{cp1}) = W_{PID}(j\omega_{cp1}) \cdot W_p(j\omega_{cp1}) = e^{j(-180^\circ+\gamma_1)}, \quad (8)$$

где $W_p(j\omega_{cp1})$ – передаточная функция нескорректированной разомкнутой системы, $W_{PID}(j\omega_{cp1})$ – передаточная функция классического ПИД-регулятора.

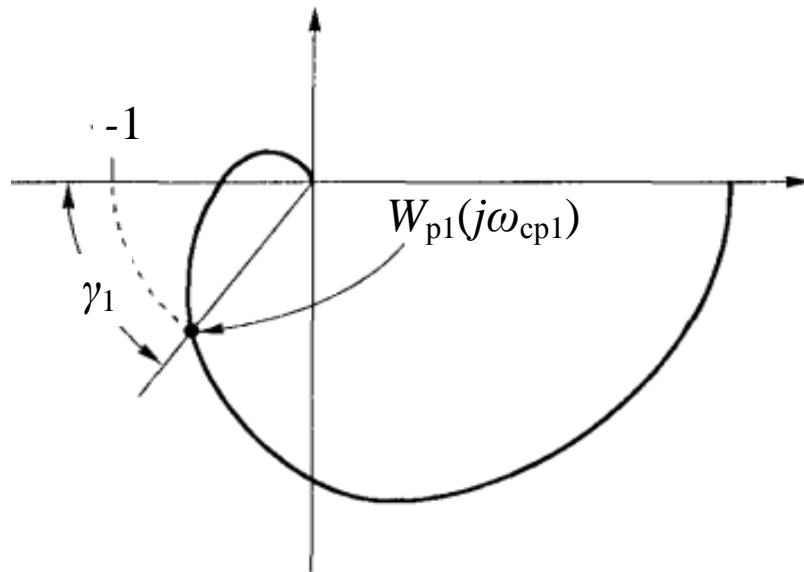


Рисунок 10 – Диаграмма Найквиста для скорректированной системы $W_{p1}(j\omega_{cp1})$

Обозначим аргумент функции $W_{PID}(j\omega_{cp1})$ через θ , и согласно формуле (9) получим:

$$\theta = \arg(W_{PID}(j\omega_{cp1})) = -180^\circ + \gamma_1 - \arg(W_p(\omega_{cp1})) \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (9)$$

Из формул (8) и (9) получается:

$$K_P + j(K_D\omega_{cp1} - \frac{K_I}{\omega_{cp1}}) = |W_{PID}(\omega_{cp1})| \cdot (\cos \theta + j \sin \theta), \quad (10)$$

где

$$|W_{PID}(\omega_{cp1})| = \frac{1}{|W_p(\omega_{cp1})|}. \quad (11)$$

С учетом (11), приравняв в уравнении (10) действительные части, получим:

$$K_P = \frac{\cos \theta}{|W_p(\omega_{cp1})|}, \quad (12)$$

а приравняв мнимые части:

$$K_D \omega_{cp1} - \frac{K_I}{\omega_{cp1}} = \frac{\sin \theta}{|W_p(\omega_{cp1})|}. \quad (13)$$

При известном ω_{cp1} на основании уравнения (12) вычисляется коэффициент K_P . Затем, задав, к примеру, коэффициент K_I (исходя из требований к качеству системы в установившемся режиме), можно решить уравнение (13) относительно K_D , и наоборот.

Если частота среза скорректированной системы ω_{cp1} изначально неизвестна, то её можно подобрать по соотношению (14), задав время регулирования t_p .

$$\omega_{cp1} = \frac{8}{t_p \cdot \operatorname{tg} \gamma_1}. \quad (14)$$

Однако это соотношение является точным только для типовых систем второго порядка. Для систем более высоких порядка оно может служить лишь приближением, причем довольно грубым.

Фазовый сдвиг, создаваемый регулятором на частоте ω_{cp1} , может быть как положительным, так и отрицательным, а модуль функции $|W_{PD}(\omega_{cp1})|$, может быть как больше, так и меньше единицы. Поэтому единственным ограничением

на выбор частоты ω_{cp1} является то, что абсолютное значение угла θ по формуле (9) должно быть меньше, чем 90° .

Уравнения (12) и (13) имеют общий характер и применимы к синтезу любых модификаций ПИД-регулятора. Например, полагая, что $K_I = 0$, получится ПД-регулятор, и в результате:

$$K_D = \frac{\sin \theta}{\omega_{cp1} \cdot |W_p(\omega_{cp1})|}. \quad (15)$$

2.3.2 Настройка параметров регулятора по методу Циглера-Никольса

Циглер и Никольс предложили два метода настройки ПИД-регуляторов. Первый вариант основан на использовании запасов устойчивости. В этом варианте используются результаты экспериментального исследования системы, состоящей из П-регулятора и заданного объекта регулирования. Коэффициент передачи П-регулятора K_P увеличивается до тех пор, пока на выходе системы не установятся колебания с постоянной амплитудой колебаний, то есть система не окажется на границе устойчивости. Фиксируется и обозначается через K_P^* значение коэффициента передачи регулятора, при котором система находится на границе устойчивости. Измеряется период T^* установившихся в системе колебаний. Значения параметров регулятора выбранного типа рассчитываются по формулам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

	K_P	K_I	K_D
П-регулятор	$0,5K_P^*$	–	–
ПИ-регулятор	$0,45K_P^*$	$0,54K_P^*/T^*$	–
ПИД-регулятор	$0,6K_P^*$	$1,2K_P^*/T^*$	$0,075K_P^*T^*$

Во втором варианте используется реакция объекта управления на ступенчатое воздействие. Объекты управления, имеющие апериодическую кривую разгона (Рисунок 11) аппроксимируются последовательным соединением апериодического и запаздывающего звеньев.

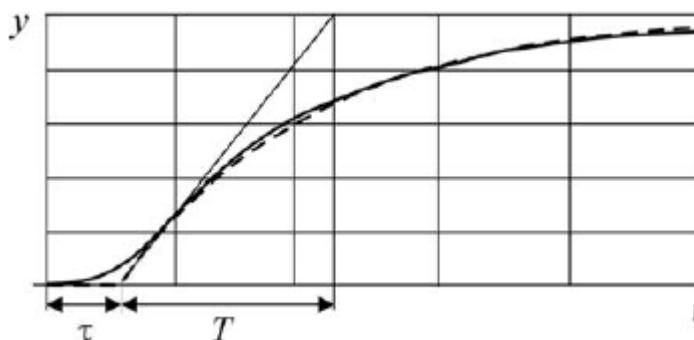


Рисунок 11 – Кривая разгона объекта управления

В этом случае передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{\text{оу}}(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (16)$$

где k – коэффициент передачи, T – постоянная времени, τ – время запаздывания. Значения параметров регулятора рассчитываются по формулам, приведенным в таблице 2. Метод дает удовлетворительные результаты, если $0,5 < \tau / T < 0,6$.

Таблица 2

	K_P	K_I	K_D
П-регулятор	$T / k\tau$	–	–
ПИ-регулятор	$0,9T / k\tau$	$0,3T / k\tau^2$	–
ПИД-регулятор	$1,2T / k\tau$	$0,6T / k\tau^2$	$0,6T / k\tau$

Методы Циглера-Никольса дают параметры, далёкие от оптимальных. Это объясняется не только упрощённостью самих методов, но и тем, что параметры регулятора в этих методах определялись Циглером и Никольсом, исходя из требования к декременту затухания, равному 4, что и даёт медленное затухание процесса колебаний. Также в них никак не учитываются требования к запасу устойчивости системы, что является вторым недостатком. Судя по медленному затуханию переходного процесса в системе, эти методы дают слишком малый запас устойчивости. Несмотря на это, метод Циглера–Никольса и некоторые его модификации весьма популярны, и многие производители регуляторов рекомендуют их для настройки регуляторов.

2.3.3 Метод Чина-Хронеса-Ресвика

В отличие от Циглера и Никольса, которые использовали в качестве критерия качества настройки декремент затухания, равный 4, Чин, Хронес и Ресвик (CHR) использовали критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии не более чем 20-процентного перерегулирования. Такой критерий позволяет получить больший запас устойчивости, чем в методе Циглера-Никольса.

Метод CHR даёт две разные системы параметров регулятора. Одна из них получена при наблюдении отклика на изменение уставки, вторая – при наблюдении отклика на внешние возмущения. Какую систему параметров выбирать, зависит от того, что важнее для конкретного регулятора: качество регулирования при изменении уставки или ослабление внешних воздействий. Если же важно и то и другое, то необходимо использовать регуляторы с двумя степенями свободы.

2.3.4 Ручная настройка ПИД-регулятора

Расчёт параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощённых моделях объекта. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Поэтому после расчёта параметров регулятора желательно сделать его подстройку. Подстройку можно выполнить на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Перечисленные правила применяются также для регуляторов, использующих методы экспертных систем и нечёткой логики.

Ручную настройку с помощью правил удобно выполнять с применением интерактивного программного обеспечения на компьютере, временно включённом в контур управления. Для оценки реакции системы на изменение уставки, внешние воздействия или шумы измерений подают искусственные воздействия и наблюдают реакцию на них. После выполнения настройки значения коэффициентов регулятора записывают в память ПИД-контроллера, а компьютер удаляют.

Отметим, что применение правил возможно только после предварительной настройки регулятора по формулам. Попытки настроить

регулятор без начального приближённого расчёта коэффициентов могут быть безуспешными.

Сформулированные правила справедливы только в окрестности оптимальной настройки регулятора. Вдали от неё эффекты могут быть иными.

2.3.5 Численные методы оптимизации для настройки ПИД-регуляторов

Методы оптимизации для нахождения параметров регулятора концептуально очень просты. Выбирается критерий минимизации, в качестве которого может быть один из показателей качества или комплексный критерий, составленный из нескольких показателей с разными весовыми коэффициентами. К критерию добавляются ограничения, накладываемые требованиями робастности. Таким путём получается критериальная функция, зависящая от параметров ПИД-регулятора. Далее используются численные методы минимизации критериальной функции с заданными ограничениями, которые и позволяют найти искомые параметры ПИД-регулятора.

Методы, основанные на оптимизации, имеют следующие достоинства:

- позволяют получить оптимальные значения параметров, не требующие дальнейшей подстройки;
- не требуют упрощения модели объекта, модель может быть какой угодно сложной;
- позволяют быстро достичь конечного результата (избежать процедуры длительной подстройки параметров).

Однако реализация данного подхода связана с большими проблемами, которые не один десяток лет являются предметом научных исследований. К этим проблемам относятся:

- длительность процесса поиска минимума;
- низкая надёжность метода (во многих случаях вычислительный процесс может расходиться, и искомые коэффициенты не будут найдены);

– низкая скорость поиска минимума для овражных функций и функций с несколькими минимумами.

Тем не менее, методы оптимизации являются мощным средством настройки ПИД-регуляторов с помощью специально разработанных для этого компьютерных программ.

2.4 Методика синтеза регулятора системы управления объектом высокого порядка

Все существующие методы различны по трудоемкости и качеству настройки регуляторов САУ. К примеру, методы Циглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика довольно просты, но часто дают неудовлетворительные результаты (большие перерегулирования). Другие же методы точны только для систем с типовыми объектами не более второго порядка. Есть методы, позволяющие получить очень качественную настройку регулятора, но в тоже время они математически сложны и требуют длительного и трудоемкого моделирования.

В бакалаврской работе за основу предложенной методики был взят метод аналитического синтеза в частотной области (рассмотрен в пункте 2.3.1). Таким образом, для синтеза ПИД-регулятора системы управления с объектом седьмого порядка необходимо выполнить следующие шаги:

1) Определить передаточную функцию нескорректированной разомкнутой системы путем произведения пяти передаточных функции отдельных блоков $W_p(s) = W_{\Gamma\Pi}(s) \cdot W_{\text{PO}}(s) \cdot W_{\text{OY}}(s) \cdot W_{\text{ВД}}(s) \cdot W_{\text{mp}}(s)$.

2) В передаточной функции разомкнутой системы произвести замену s на $j\omega$ и определить модуль $A_p(\omega)$ и аргумент $\phi_p(\omega)$ частотной функции.

3) Задать частоту среза скорректированной системы. Её можно подобрать по соотношению (14), где время регулирования и запас по фазе задаются требованиями к качеству процесса.

4) По формуле (9) вычислить аргумент передаточной функции корректирующего устройства θ . Абсолютное значение угла θ должно быть меньше, чем 90° . Если получится больше 90 , то необходимо изменить частоту среза.

5) Рассчитать пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора K_P по формуле (12).

6) Задать интегральный коэффициент ПИД-регулятора K_I , исходя из требований к качеству системы в установившемся режиме.

7) По уравнению (13) рассчитать дифференциальный коэффициент K_D .

8) Получить передаточную функцию в виде $W_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$.

3 Имитационное моделирование САУ в программном пакете MATLAB&Simulink

3.1 Выбор среды разработки

Программный пакет MATLAB&Simulink является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой S-моделью, или просто моделью. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств MATLAB&Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Используя палитры компонентов (библиотеки), пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета MATLAB&Simulink и соединяет линиями входы и выходы блоков. Таким образом, создается блок-схема системы или устройства, то есть модель.

MATLAB&Simulink автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства.

3.2 Подготовка к синтезу

Задаем исходные данные:

$$T_{\Gamma\Pi} = 0,0015\text{ с}; T_M = 0,0025\text{ с}; \xi_M = 0,7; T_0 = 0,0015\text{ с}; K_0 = 1,5; T_{\text{PO}} = 0,002\text{ с}; \\ K_{\text{ВД}} = 1; T_{\text{ВД}} = 0,002\text{ с}; K_{\text{пр.}} = 1; T_{\text{пр.}} = 0,002\text{ с}.$$

Задаем передаточные функции и подставляем значения переменных:

$$W_{\text{ГП}}(s) = \frac{1}{(T_{\text{ГП}}s + 1)(T_{\text{М}}^2s^2 + 2\xi_{\text{М}}T_{\text{М}}s + 1)} = \frac{3,2 \cdot 10^8}{3s^3 + 3680s^2 + 1,6 \cdot 10^6s + 3,2 \cdot 10^8};$$

$$W_{\text{ПО}}(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_{\text{ПО}}s + 1} = \frac{500 \cdot e^{-10^{-3}s}}{s + 500}; \quad W_{\text{ОУ}}(s) = \frac{T_0}{K_0s + 1} = \frac{3000}{3s + 2000};$$

$$W_{\text{ВД}}(s) = \frac{K_{\text{ВД}}}{T_{\text{ВД}}s + 1} = \frac{500}{s + 500}; \quad W_{\text{пр.}}(s) = \frac{K_{\text{пр.}}}{T_{\text{пр.}}s + 1} = \frac{500}{s + 500}.$$

Строим модель замкнутой системы управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси с ПИД-регулятором и нелинейным звеном в программном пакете MATLAB&Simulink . (Рисунок 12)

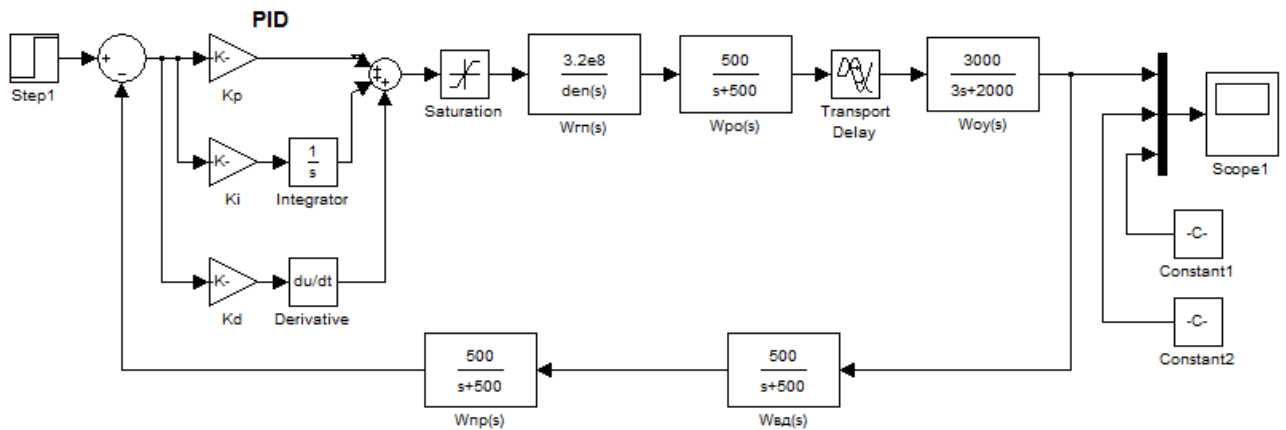


Рисунок 12 – Имитационная модель САУ

Задание на синтез ПИД-регулятора

Система регулирования коэффициента плотности асфальтобетонной смеси должна обеспечивать отработку заданного значения без ошибки в установившемся режиме. Перерегулирование не должно превышать 5 %. Время переходного процесса при отработке задания не должно превышать 0,1 с.

Проведем анализ исходной системы без ПИД-регулятора. Качество работы исходной системы оценим по переходной характеристике замкнутой системы.

Получим переходную характеристику замкнутой системы (Рисунок 13) в пакете MATLAB&Simulink.

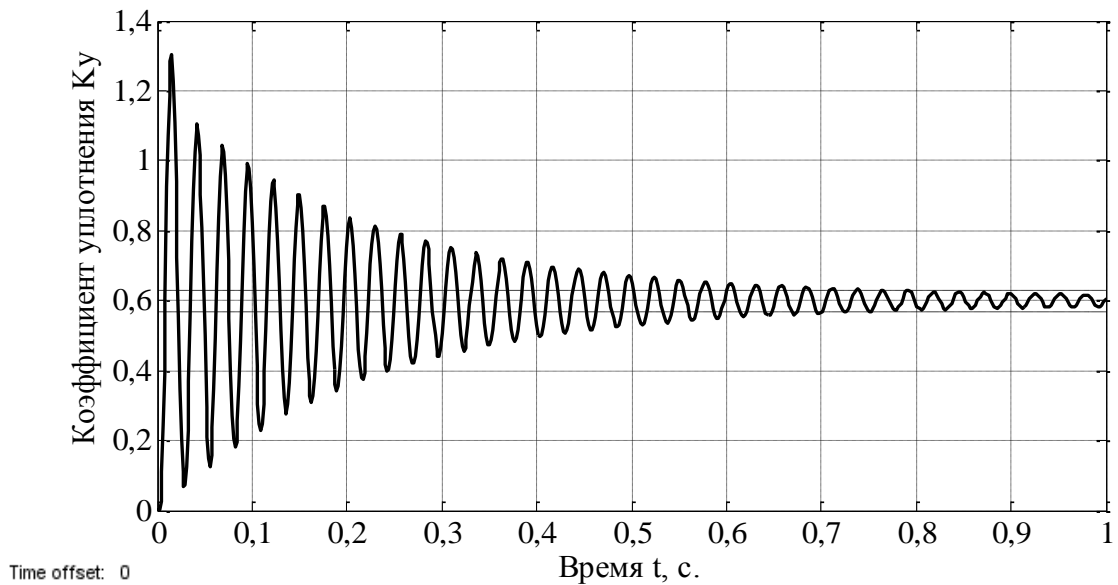


Рисунок 13 – Переходная характеристика замкнутой системы

Временные показатели качества характеристики:

Установившееся значение переходной характеристики: $y_{уст} = 0,7$;

Максимальное значение переходной характеристики: $y_{max} = 1,3$;

Установившаяся или статическая ошибка в %:

$$E_{ст.} = \frac{1 - y_{уст.}}{1} \cdot 100\% = 40\%;$$

Время переходного процесса: $t_p = 0,7$ с;

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст.}}{y_{уст.}} \cdot 100\% = 117\%.$$

Определим частотные показатели качества с использованием Mathcad.

В передаточной функции системы в разомкнутом состоянии $W_p(s) = W_{\Gamma\Pi}(s) \cdot W_{\text{PO}}(s) \cdot W_{\text{Oy}}(s) \cdot W_{\text{ВД}}(s) \cdot W_{\text{пр.}}(s)$ сделаем замену переменной s на $j\omega$. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика определяется по формуле (17), фазовая частотная характеристика – по формуле (18):

$$L_p(\omega) = 20 \cdot \lg(|W_p(j\omega)|); \quad (17)$$

$$\varphi_p(\omega) = \arg W_p(j\omega) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (18)$$

Полученная диаграмма Бode нескорректированной разомкнутой системы представлена на рисунке 14:

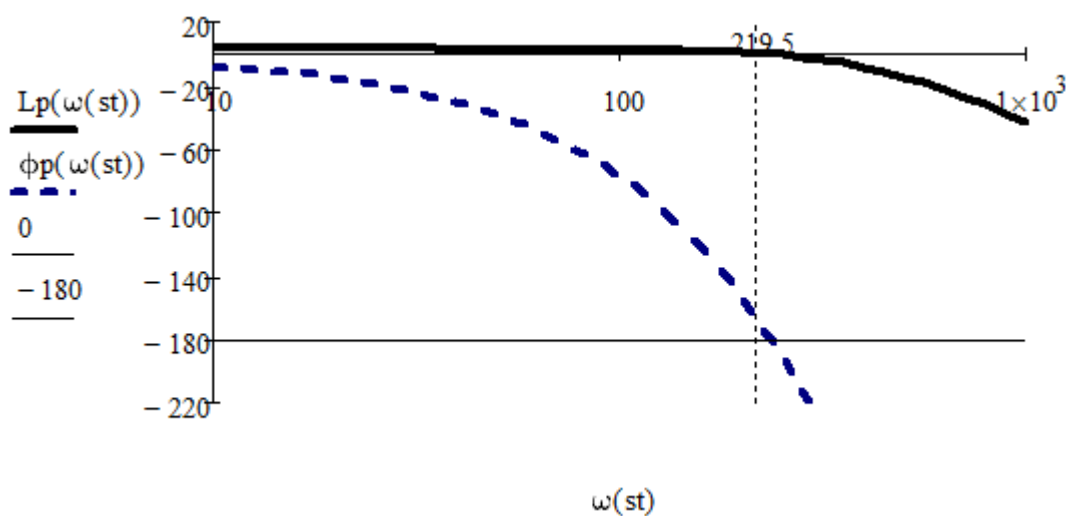


Рисунок 14 – Диаграмма Бode нескорректированной системы $W_p(j\omega)$

Частота среза разомкнутой системы: $\omega_{\text{ср0}} = 219,5$ рад/с;

Запас по фазе в градусах:

$$\gamma_0 = \varphi_p(\omega_{\text{ср0}}) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} + 180^\circ = 12,2^\circ.$$

Выводы предварительного анализа

Исходная система в замкнутом состоянии устойчива, но запас по фазе небольшой. Кроме того, без регулятора система является статической – наблюдается значительная статическая ошибка. В динамике происходит колебательный процесс со временем регулирования и перерегулированием, превышающим допустимые значения.

Таким образом, необходимо исследовать, при каких параметрах ПИД-регулятора могут быть обеспечены заданные требования системы. Исследование будем проводить по методике аналитического синтеза в частотной области. Синтез осуществляем в линейном варианте без учета нелинейности. Уточнение параметров регулятора проводим имитационным моделированием с учетом нелинейности.

3.3 Исследование характеристик САУ с применением частотного метода

Определим параметры ПИД-регулятора по методике аналитического синтеза в частотной области и исследуем поведение САУ при различных запасах по фазе: $\gamma_1 = 45^\circ$, $\gamma_2 = 60^\circ$, $\gamma_3 = 75^\circ$, $\gamma_4 = 90^\circ$.

Расчет ПИД-регулятора будем осуществлять при помощи Mathcad, исследование характеристик – в MATLAB&Simulink.

Запас по фазе: $\gamma_1 = 45^\circ$:

Требуемое время регулирования $t_p = 0,1$ с;

По соотношению (14) принимаем частоту среза $\omega_{cp1} = 80$ рад/с;

Модуль и аргумент разомкнутой системы на частоте среза ω_{cp1} :

$$|W_p(\omega_{cp1})| = 1,42; \arg(W_p(\omega_{cp1})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -61,8^\circ;$$

Аргумент корректирующего устройства на частоте среза ω_{cp1} :

$$\theta = -180^\circ + \gamma_1 - \arg(W_p(\omega_{cp1})) \frac{180^\circ}{\pi} = -73,2^\circ;$$

Пропорциональный коэффициент K_{P1} :

$$K_{P1} = \frac{\cos \theta}{|W_p(\omega_{cp1})|} = 0,203;$$

Принимаем интегральный коэффициент $K_{I1} = 60$;

Дифференциальный коэффициент K_{D1} :

$$K_{D1} = \frac{\sin \theta}{\omega_{cp1} \cdot |W_p(\omega_{cp1})|} + \frac{K_{I1}}{\omega_{cp1}^2} = 9,7 \cdot 10^{-4};$$

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_{ПИД1}(s) = K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s} + K_{D1}s = 0,203 + \frac{60}{s} + 9,7 \cdot 10^{-4}s.$$

Диаграмма Боде скорректированной разомкнутой системы $W_{p1}(s)$ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 15:

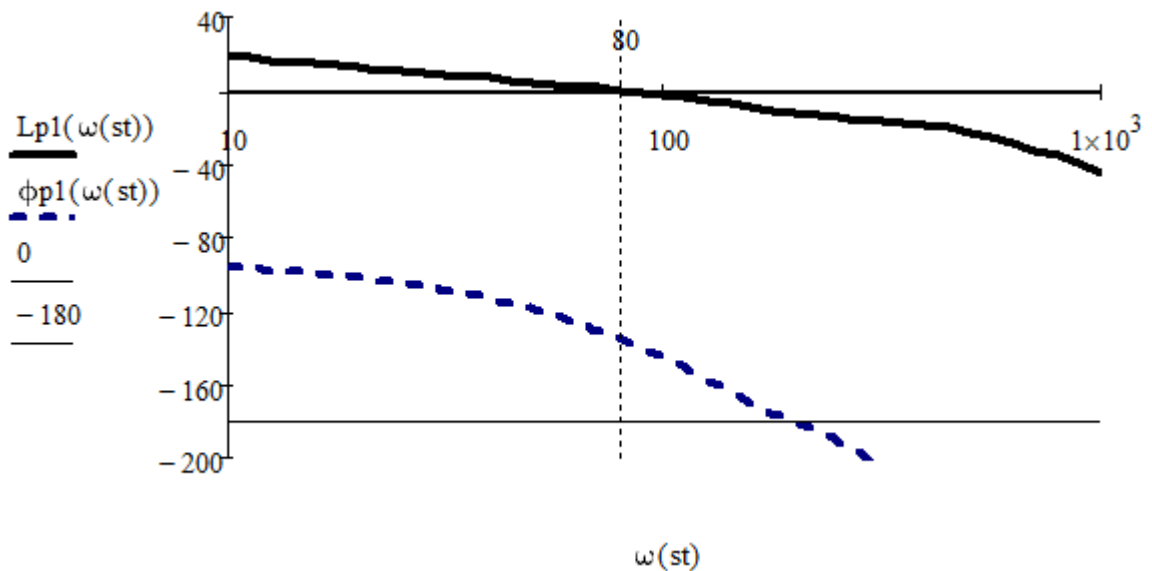


Рисунок 15 – Диаграмма Бode скорректированной системы $W_{p1}(s)$

Запас по фазе и частота среза скорректированной системы соответствуют заданным. Таким образом, для обеспечения запаса по фазе $\gamma_1 = 45^\circ$ принимаем и вводим в модель (Рисунок 12) значения коэффициентов передачи ПИД-регулятора: пропорциональной части $K_{P1} = 0,203$; интегральной части $K_{I1} = 60$; дифференциальной части $K_{D1} = 9,7 \cdot 10^{-4}$.

В результате моделирования получим переходную характеристику (Рисунок 16):

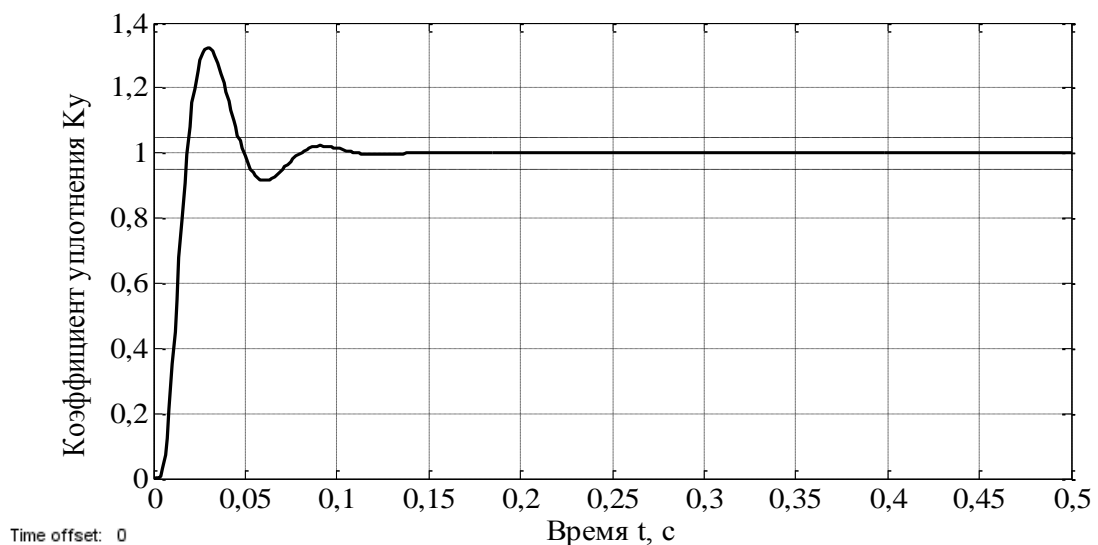


Рисунок 16 – Переходная характеристика с синтезированными параметрами регулятора: $K_{P1} = 0,203$, $K_{I1} = 60$, $K_{D1} = 9,7 \cdot 10^{-4}$

Временные показатели качества характеристики:

Установившееся значение: $y_{уст} = 1$;

Максимальное значение: $y_{max} = 1,28$;

Установившаяся или статическая ошибка в %:

$$E_{ст.} = \frac{1 - y_{уст.}}{1} \cdot 100\% = 0\%;$$

Время переходного процесса: $t_p = 0,07$ с;

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст.}}{y_{уст.}} \cdot 100\% = 28\%.$$

В полученной характеристике обнаружилось перерегулирование выше допустимой нормы, что неблагоприятно для гидравлических систем. В остальном же полученные параметры ПИД-регулятора обеспечивают заданные требования.

Запас по фазе: $\gamma_2 = 60^\circ$:

Требуемое время регулирования $t_p = 0,1$ с;

По соотношению (14) принимаем частоту среза $\omega_{cp1} = 50$ рад/с;

Модуль и аргумент разомкнутой системы на частоте среза ω_{cp2} :

$$|W_p(\omega_{cp2})| = 1,47; \arg(W_p(\omega_{cp2})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -38,7^\circ;$$

Аргумент корректирующего устройства на частоте среза ω_{cp2} :

$$\theta = -180^\circ + \gamma_2 - \arg(W_p(\omega_{cp2})) \frac{180^\circ}{\pi} = -81,3^\circ;$$

Пропорциональный коэффициент K_{P2} :

$$K_{P2} = \frac{\cos \theta}{|W_p(\omega_{cp2})|} = 0,102;$$

Принимаем интегральный коэффициент $K_{I2} = 34$;

Дифференциальный коэффициент K_{D2} :

$$K_{D2} = \frac{\sin \theta}{\omega_{cp2} \cdot |W_p(\omega_{cp2})|} + \frac{K_{I2}}{\omega_{cp2}^2} = 1,5 \cdot 10^{-4};$$

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_{\text{ПИД2}}(s) = K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} + K_{D2}s = 0,102 + \frac{34}{s} + 1,5 \cdot 10^{-4} s.$$

Диаграмма Боде скорректированной разомкнутой системы $W_{p2}(s)$ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 17:

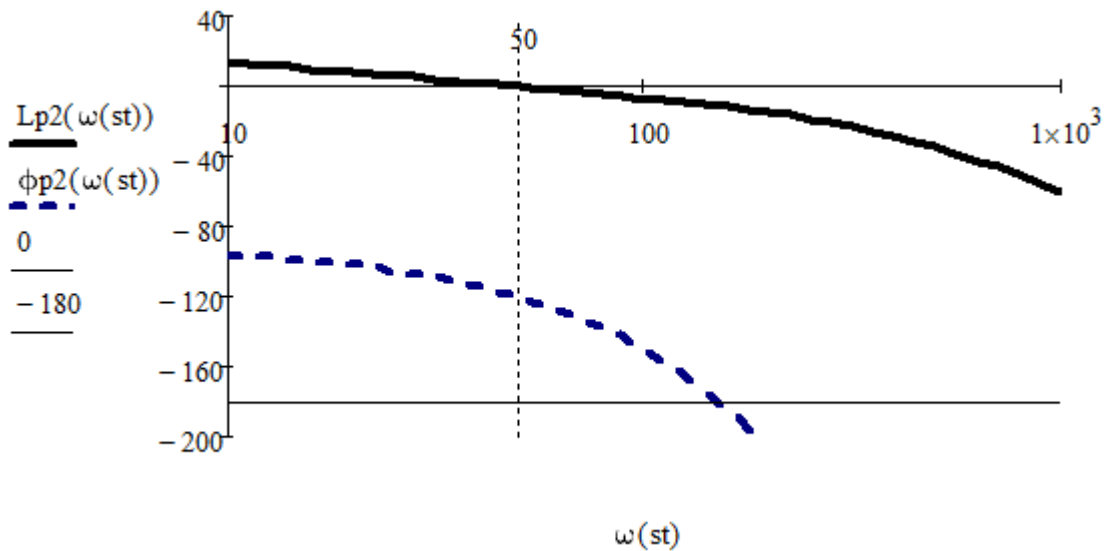


Рисунок 17 – Диаграмма Бode скорректированной системы $W_{p2}(s)$

Запас по фазе и частота среза скорректированной системы соответствуют заданным. Таким образом, для обеспечения запаса по фазе $\gamma_2 = 60^\circ$ принимаем и вводим в модель (Рисунок 12) значения коэффициентов передачи ПИД-регулятора: пропорциональной части $K_{P2} = 0,102$; интегральной части $K_{I2} = 34$; дифференциальной части $K_{D2} = 1,5 \cdot 10^{-4}$.

В результате моделирования получим переходную характеристику (Рисунок 18):

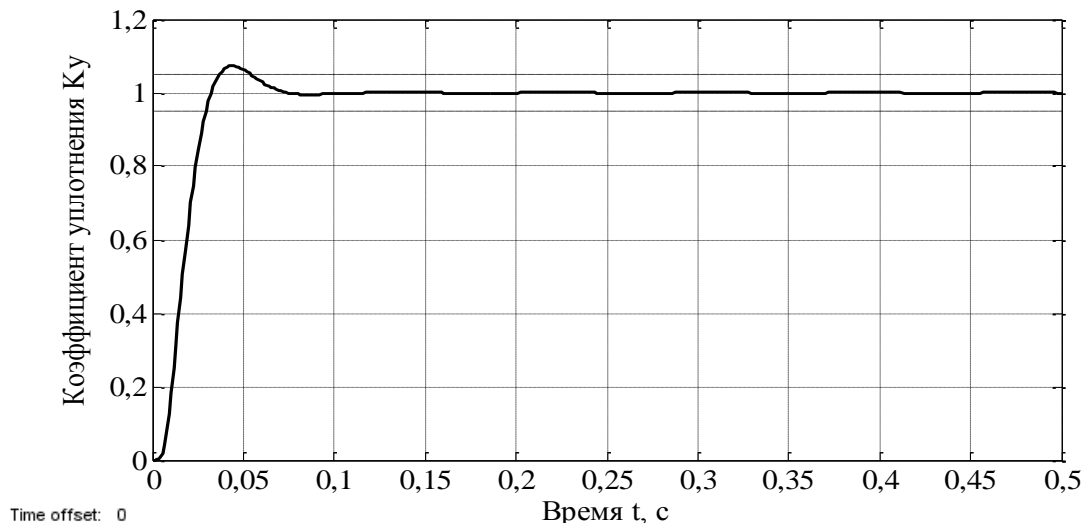


Рисунок 18 – Переходная характеристика с синтезированными параметрами регулятора: $K_{P2} = 0,102$, $K_{I2} = 34$, $K_{D2} = 1,5 \cdot 10^{-4}$

Временные показатели качества характеристики:

Установившееся значение: $y_{уст} = 1$;

Максимальное значение: $y_{max} = 1,07$;

Установившаяся или статическая ошибка в %:

$$E_{ст.} = \frac{1 - y_{уст.}}{1} \cdot 100\% = 0\%;$$

Время переходного процесса: $t_p = 0,05$ с;

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст.}}{y_{уст.}} \cdot 100\% = 7\%.$$

В характеристике наблюдается небольшое превышение перерегулирования. Остальные требования к системе выполняются, причем лучше, чем при запасе по фазе 45° .

Запас по фазе: $\gamma_3 = 75^\circ$:

Требуемое время регулирования $t_p = 0,1$ с;

По соотношению (14) принимаем частоту среза $\omega_{срз} = 40$ рад/с;

Модуль и аргумент разомкнутой системы на частоте среза $\omega_{срз}$:

$$|W_p(\omega_{срз})| = 1,48; \quad \arg(W_p(\omega_{срз})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -30,9^\circ;$$

Аргумент корректирующего устройства на частоте среза $\omega_{срз}$:

$$\theta = -180^\circ + \gamma_3 - \arg(W_p(\omega_{срз})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -74,1^\circ;$$

Пропорциональный коэффициент K_{P3} :

$$K_{P3} = \frac{\cos \theta}{|W_p(\omega_{cp3})|} = 0,185;$$

Принимаем интегральный коэффициент $K_{I3} = 26$;

Дифференциальный коэффициент K_{D3} :

$$K_{D3} = \frac{\sin \theta}{\omega_{cp3} \cdot |W_p(\omega_{cp3})|} + \frac{K_{I3}}{\omega_{cp3}^2} = 1,3 \cdot 10^{-5};$$

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_{\text{ПИД3}}(s) = K_{P3} + \frac{K_{I3}}{s} + K_{D3}s = 0,185 + \frac{26}{s} + 1,3 \cdot 10^{-5} s.$$

Диаграмма Бode скорректированной разомкнутой системы $W_{p3}(s)$ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 19:

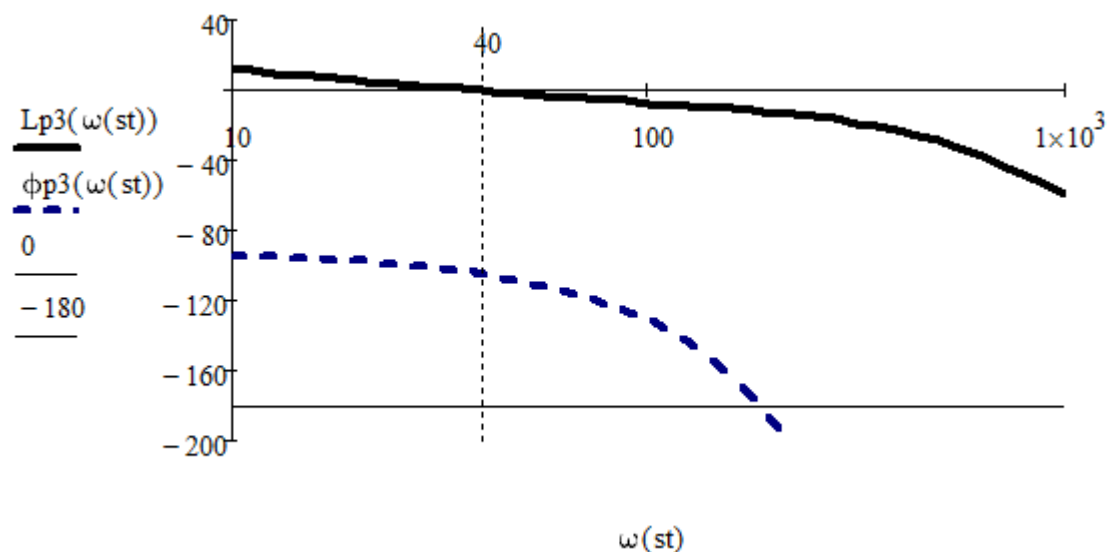


Рисунок 19 – Диаграмма Бode скорректированной разомкнутой системы $W_{p3}(s)$

Запас по фазе и частота среза скорректированной системы соответствуют заданным. Таким образом, для обеспечения запаса по фазе $\gamma_3 = 75^\circ$ принимаем и вводим в модель (Рисунок 12) значения коэффициентов передачи ПИД-регулятора: пропорциональной части $K_{P3} = 0,185$; интегральной части $K_{I3} = 26$; дифференциальной части $K_{D3} = 1,3 \cdot 10^{-5}$.

В результате моделирования получим переходную характеристику (Рисунок 20):

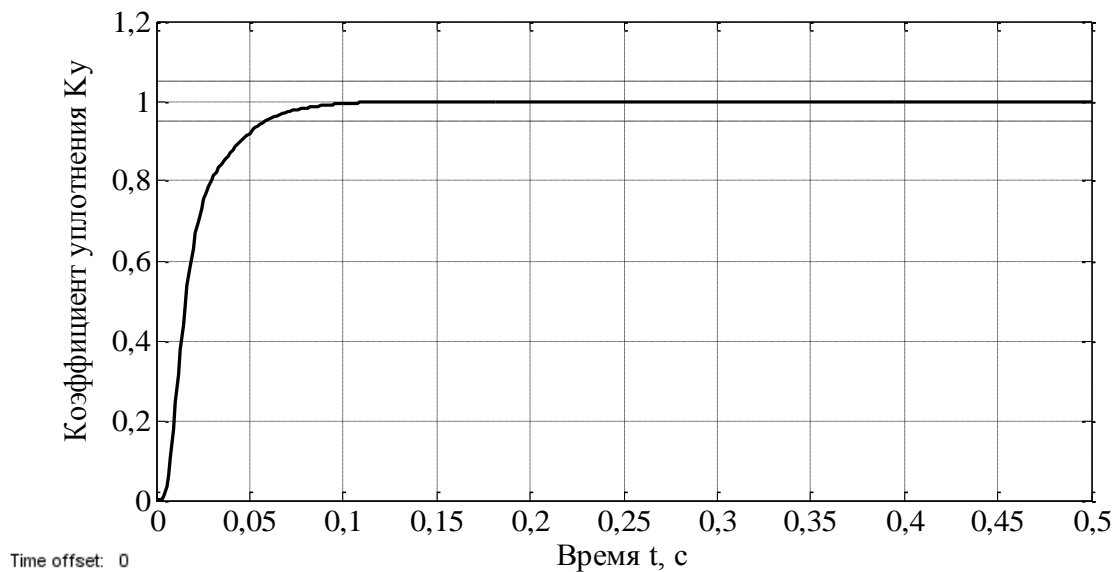


Рисунок 20 – Переходная характеристика с синтезированными параметрами регулятора: $K_{P3} = 0,185$, $K_{I3} = 26$, $K_{D3} = 1,3 \cdot 10^{-5}$

Временные показатели качества характеристики:

Установившееся значение: $y_{уст} = 1$;

Максимальное значение: $y_{max} = 1$;

Установившаяся или статическая ошибка в %:

$$E_{ст.} = \frac{1 - y_{уст.}}{1} \cdot 100\% = 0\%;$$

Время переходного процесса: $t_p = 0,06$ с;

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст.}}}{y_{\text{уст.}}} \cdot 100\% = 0\%.$$

Полученные параметры ПИД-регулятора обеспечивают все заданные требования к системе.

Запас по фазе: $\gamma_4 = 90^\circ$;

Требуемое время регулирования $t_p = 0,1$ с;

По соотношению (14) принимаем частоту среза $\omega_{\text{ср4}} = 30$ рад/с;

Модуль и аргумент разомкнутой системы на частоте среза $\omega_{\text{ср4}}$:

$$|W_p(\omega_{\text{ср4}})| = 1,49; \quad \arg(W_p(\omega_{\text{ср4}})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -23,2^\circ;$$

Аргумент корректирующего устройства на частоте среза $\omega_{\text{ср4}}$:

$$\theta = -180^\circ + \gamma_4 - \arg(W_p(\omega_{\text{ср4}})) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -66,8^\circ;$$

Пропорциональный коэффициент K_{P4} :

$$K_{P4} = \frac{\cos \theta}{|W_p(\omega_{\text{ср4}})|} = 0,265;$$

Принимаем интегральный коэффициент $K_{I4} = 20$;

Дифференциальный коэффициент K_{D4} :

$$K_{D4} = \frac{\sin \theta}{\omega_{\text{ср4}} \cdot |W_p(\omega_{\text{ср4}})|} + \frac{K_{I4}}{\omega_{\text{ср4}}^2} = 1,6 \cdot 10^{-3};$$

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_{\text{ПИД4}}(s) = K_{P4} + \frac{K_{I4}}{s} + K_{D4}s = 0,265 + \frac{20}{s} + 1,6 \cdot 10^{-3} s.$$

Диаграмма Бode скорректированной разомкнутой системы $W_{p4}(s)$ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 2:

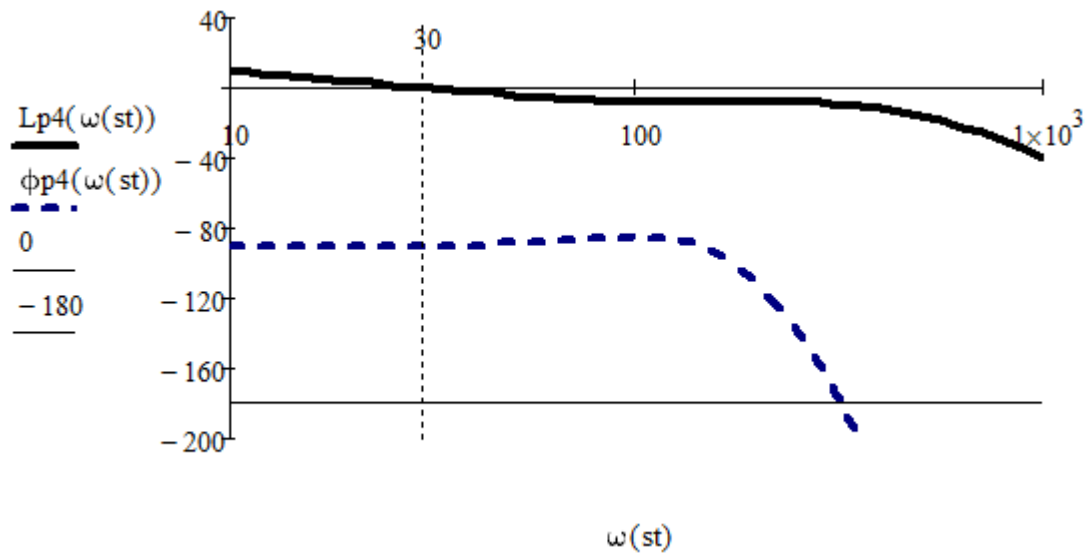


Рисунок 21 – Диаграмма Бode скорректированной системы $W_{p4}(s)$

Запас по фазе и частота среза скорректированной системы соответствуют заданным. Таким образом, для обеспечения запаса по фазе $\gamma_4 = 90^\circ$ принимаем и вводим в модель (Рисунок 12) значения коэффициентов передачи ПИД-регулятора: пропорциональной части $K_{P4} = 0,265$; интегральной части $K_{I4} = 20$; дифференциальной части $K_{D4} = 1,6 \cdot 10^{-3}$.

В результате моделирования получим переходную характеристику (Рисунок 22):

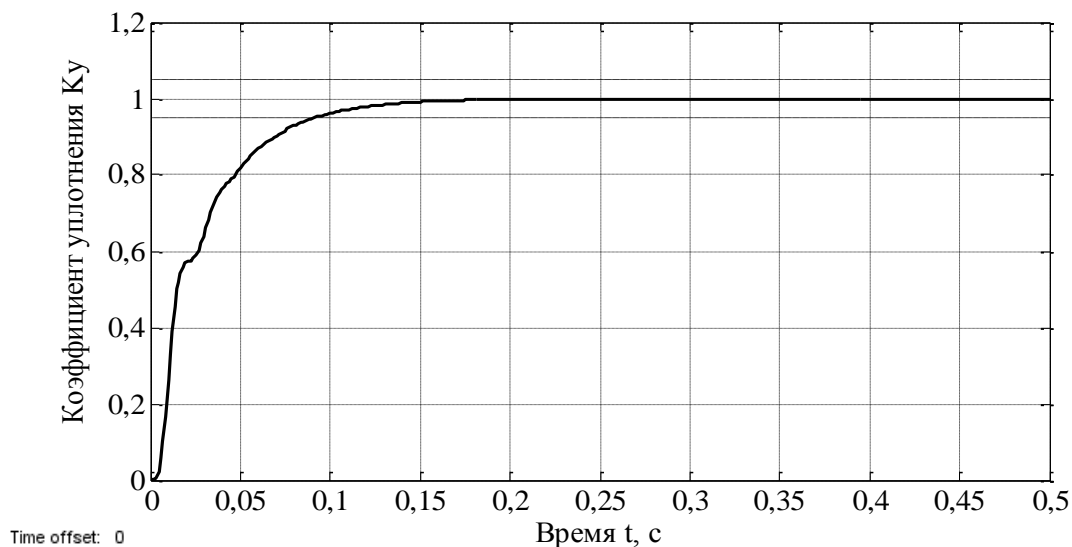


Рисунок 22 – Переходная характеристика с синтезированными параметрами регулятора: $K_{P4} = 0,265$, $K_{I4} = 20$, $K_{D4} = 1,6 \cdot 10^{-3}$

Временные показатели качества характеристики:

Установившееся значение: $y_{уст} = 1$;

Максимальное значение: $y_{max} = 1$;

Установившаяся или статическая ошибка в %:

$$E_{ст.} = \frac{1 - y_{уст.}}{1} \cdot 100\% = 0\%;$$

Время переходного процесса: $t_p = 0,09$ с;

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст.}}{y_{уст.}} \cdot 100\% = 0\%.$$

Полученные параметры ПИД-регулятора обеспечивают все заданные требования к системе.

По проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы. Во всех исследованиях процесс имел апериодический характер, что наиболее благоприятно для гидравлических систем. Но при некоторых параметрах наблюдалось перерегулирование выше допустимых значений. Точность вследствие отсутствия статической ошибки и быстроедействие процесса были полностью обеспечены. Наиболее оптимальные результаты были получены с запасом по фазе $\gamma_3 = 75^\circ$ и $\gamma_4 = 90^\circ$, где отсутствовало перерегулирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ технологии процесса уплотнения асфальтобетонной смеси трамбуящим брусом и вибрационной плитой при строительстве автомобильной дороги;

- разработаны функциональная и структурная схемы системы управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси;

- создана математическая модель системы седьмого порядка в виде передаточных функций;

- создана имитационная модель в программном пакете MATLAB&Simulink;

- разработана и применена методика аналитического синтеза ПИД-регулятора в частотной области, и обеспечены требуемые критерии качества САУ – устойчивость, точность, апериодический характер процесса, быстродействие (время регулирования не более 0,1 с.);

- проведено имитационное моделирование, и исследованы зависимости показателей качества переходной характеристики от задаваемого запаса устойчивости по фазе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Барковский, В.В. Методы синтеза систем управления / В.В. Барковский, В.Н. Захаров, А.С. Шаталов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 277 с.
- 2 Беляев, К.В. Укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей. Теория и расчет : учеб. пособие / К.В. Беляев, В.С. Серебренников. – Омск : СиБАДИ, 2015. – 208 с.
- 3 Вадутов, О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса: метод. указания по выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и микроэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / О.С. Вадутов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 10 с.
- 4 Горельшев, Н.В. Технология и организация строительства автомобильных дорог / Н.В. Горельшев. – Москва : Транспорт, 1991. – 551 с.
- 5 Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
- 6 Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №4. – С. 86-97.
- 7 Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 2 / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2008. – №1. – С. 86-99.
- 8 Дьяконов, В.П. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
- 9 Зубков, А.Ф. Технология укладки асфальтобетонных смесей при строительстве многополосных дорожных покрытий : учеб. пособие / А.Ф.

Зубков, К. А. Андрианов, А. М. Макаров, Р. В. Куприянов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 80 с.

10 Карнаухов, Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы: учеб. пособие / Н.Ф. Карнаухов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 320 с.

11 Корнилов, В.В. Гидропривод в кузнечно-штамповочном оборудовании : учеб. пособие / В.В. Корнилов. – Москва : Машиностроение, 2002. – 224 с.

12 Лещинский, А.В. Асфальтоукладчики. Конструкция и расчет : учеб. пособие / А. В. Лещинский, С.Н. Иванченко. – Екатеринбург : Строительные и дорожные машины, 2005. – 63 с.

13 Ложечко, В.П. Уплотняющие машины / В.П. Ложечко, А.А. Шестопалов, В.П. Окунев. – Рыбинск : Рыбинский дом печати, 2004. – 78 с.

14 Мелик-Багдасаров, М.С. Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий : учеб. пособие / М.С. Мелик-Багдасаров, К.А. Гиоев, Н.А. Мелик-Багдасарова. – Белгород : Транспортное строительство, 2007. – 215 с.

15 Прокопьев, А.П. Автоматизация процесса уплотнения асфальтоукладчика : учеб. пособие / А.П. Прокопьев, Р.Т. Емельянов // Известия вузов. Строительство. – 2004. – №7. – С. 53-57.

16 Прокопьев, А.П. Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий : монография / А.П. Прокопьев, Р.Т. Емельянов. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 152 с.

17 Прокопьев, А.П. Методы управления технологическими процессами строительства асфальтобетонных покрытий : монография / А.П. Прокопьев, Р.Т. Емельянов, В.И. Иванчура. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. – 256 с.

18 Ротач, В.Я. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев. – Москва : Энергоиздат, 1984. – 272 с.

19 Руппель, А.А. Анализ и синтез систем автоматизации технологических процессов : учеб. пособие / А.А Руппель. – Омск : СибАДИ, 2007. – 86 с.

20 СТО 4.2–07–2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. Взамен СТО 4.2–07–2012; дата введ. 30.12.2013. – Красноярск, 2013. – 60 с.

21 Тихонов, А.В. Автоматизация строительных и дорожных машин : учеб. пособие / А.Ф. Тихонов, С.Л. Демидов, А.Н. Дроздов. – Москва : МГСУ, 2013. – 256 с.

22 Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.

23 Черных, И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных. – Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

24 Щербаков, В.С. Модель рабочего процесса асфальтоукладчика / В.С. Щербаков, С.А. Милушенко // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2008. – № 9. – С. 85-88.