

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра систем автоматизации, автоматического управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ С.В. Ченцов

« ____ » _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления
производством

Научный руководитель	_____ .06.2021	проф., д-р техн. наук В.И. Иванчура
Выпускник	_____ .06.2021	А. И. Губин заф. каф. канд. тех. наук
Рецензент	_____ .06.2021	Н. В. Титовская

Красноярск 2021

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа на тему " Автоматизация неразрушающего контроля уплотнения дорожного покрытия" содержит 55 страниц (считать с приложениями) текстового документа, 3 приложение, 31 использованных источников.

УПЛОТНЕНИЕ, КАТОК, ВАЛЕЦ, ВИБРАЦИОННЫЙ КАТОК, АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ, СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Цель диссертационной работы:

- 1) Повышение качества дорожного покрытия систем автоматизированного контроля качества дорожного покрытия.
- 2) Улучшение аппарата, изучающего качественные и прочностные характеристики асфальтобетонной смеси.
- 3) Изучение математической модели воздействия сил на вибрационный валец.
- 4) Создание имитационной модели в Matlab Simulinc
- 5) Синтез регулятора управления

Задачи диссертационной работы:

- 1) Изучить текущее состояние технологии строительства асфальтобетонных дорожных покрытий, устройство современных типов виброкатков, осуществляющих уплотнение дорожного покрытия.
- 2) Изучить рынок существующих систем автоматического управления процессом уплотнения дорожного покрытия вибрационными катками.
- 3) Рассмотреть современное состояние автоматизации процесса уплотнения асфальтобетонных покрытий.
- 4) Исследовать состояние математического моделирования процесса уплотнения асфальтобетонного покрытия вибрационными катками.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Технология строительства дорог.....	6
1.1 Основные этапы строительства дорожных покрытий.....	6
1.3 Типы катков.....	15
1.4 Используемые методы контроля качества дорожных покрытий.....	19
1.5 Используемые системы непрерывного контроля.....	20
1.6 Принцип действия систем непрерывного контроля.....	23
2 Описание рабочего процесса уплотнения.....	27
2.1 Математическое описание рабочего процесса уплотнения дорожного покрытия.....	27
2.2 Имитационное описание модели.....	30
2.2.1 Выбор среды для моделирования.....	30
2.2.1 Математическая модель.....	32
3 Методика синтеза САУ объектом высокого порядка.....	37
3.1 Методы синтеза регуляторов.....	37
3.2 Методика синтеза ПИД – регулятора.....	41
3.3 Результаты ПИД моделирования.....	43
Заключение.....	45
Список сокращений.....	46
Список использованных источников.....	47
Приложение А.....	51
Приложение Б.....	53
Приложение В.....	55

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире дорожно-транспортный комплекс является важным звеном общей транспортной системы любой страны, без которого не может функционировать ни одна отрасль экономики страны.

С течением времени все больше возрастает интенсивность дорожного движения, все чаще люди начинают использовать большегрузные автомобили. Все это приводит к увеличению нагрузки на дорожную сеть, дороги начинают быстрее изнашиваться. Вследствие этого возникает острая необходимость к увеличению в ремонтно-восстановительных дорожных работах. Что в свою очередь невозможно без значительного повышения технического уровня и улучшения эксплуатационного состояния дорог.

Уровень развития и техническое состояние дорожной сети существенно влияют на экономическое и социальное развитие как страны в целом, так и ее отдельных регионов, поскольку надежные транспортные связи способствуют повышению эффективности использования основных производственных фондов, трудовых и материально-технических ресурсов, повышению производительности труда.

Текущая дорожная ситуация в стране стоит на сложном этапе развития, когда от преимущественного строительства новых дорог дорожные организации постепенно и неуклонно переходят к повышению технического уровня и эксплуатационного состояния существующих дорог, капитальности дорожных одежд, реконструкции дорог и мостов. На первое место выдвигаются задачи повышения скорости, удобства и безопасности движения, инженерного оборудования и удобства дорог, архитектурного эстетического оформления.

В связи с ростом интенсивности движения и нагрузок на ось транспортных средств, повышаются требования к качеству уплотнения грунтовых оснований и дорожных покрытий.

Уплотнение представляет собой процесс, при котором объем воздуха в дорожном покрытии уменьшается за счет использования внешних воздействий. Многочисленные исследователи заявили, что уплотнение является наибольшим определяющим фактором в производительности плотного дорожного покрытия. Воздушные пустоты, находящиеся в грунтовом основании, могут привести к значительному сокращению срока службы дорожного покрытия.

В настоящее время для уплотнения дорожного покрытия используют дорожные катки нескольких типов, обычные и вибрационные. Последние все больше завоёвывают рынок за счет значительно более высокой вертикальной нагрузки, получаемой благодаря эксцентриковой массе вибрирующего барабана. Которая смещается концентрически относительно оси барабана, что приводит к преимущественно вертикальной нагрузке, позволяя получить более сильное уплотнение.

Существуют две основные группы вибрационных катков: грунтовые и асфальтовые. Они различаются не только количеством и видами имеющихся барабанов, но и требованиями к динамке. Пока частота колебаний и, следовательно, вертикальная сила, получаемая от вращающегося дисбаланса, малы, ролик действует как линейная система. Как только частота вибрации сильно увеличивается каток начинает терять контакт с поверхностью, которую уплотняет. Машина начинает периодически подпрыгивать. Потеря контакта с поверхностью превращает линейное поведение в нелинейное. Такие режимы работы используется при уплотнении грунта.[1]

1 Технология строительства дорог

1.1 Основные этапы строительства дорожных покрытий

Существует различное множество типов дорог от грунтовых сельских до широкополосных городских магистралей. Вне зависимости от типа дороги, требуется достижение необходимых качественных показателей, которые зависят от применяемых материалов, технологий и условий строительства. [2]

Из-за с увеличением массы и скоростей транспортных средств, накладываемые нагрузки на дорожную сеть постоянно увеличиваются. Поэтому необходимо увеличить требования к уплотнению дорожного покрытия, что, влияет на развитие теоретических исследований в этом направлении и совершенствование на их основе конструкций дорожных катков, технологии уплотнения смеси и самого дорожного покрытия.

Технология создания асфальтобетонных покрытий состоит из: подготовительных работы, транспортировки и укладке асфальтовой смеси и процесса ее уплотнения.

Весь процесс строительства асфальтобетонной дороги начинается с разметки территории [2]. Определяется толщина щебеночного основания, а также состав покрытия они зависят от уровня испытываемых нагрузок дороги и ее назначения.

Толщина покрытия определяется от предполагаемой эксплуатации дороги. Примерная минимальная толщина слоя должна составляет 3-5 см. Если дорога будет интенсивно использоваться покрытие кладут в несколько слоев, с использованием разной зернистости. Сначала кладут крупнозернистый слой асфальтобетона, ближе к концу зернистость снижается и в конце кладётся мелкозернистый слой. Для сцепления слоев в послойной укладке используется растопленный битум. Перед нанесением последующих слоев предыдущие поливают битумом. [3]

Существуют несколько различных подходов к укладке асфальтобетонного покрытия: укладка на холодную и укладка на горячую. Укладка на холодную в основном используется при ямочном ремонте дорожного покрытия. При этом покрытие понемногу теряет свою прочность. Поэтому сразу необходимо данное место уплотнить.

Когда происходит строительство новой дороги, или же капитальный ремонт старой прибегают к способу укладки асфальта на горячую. Укладываемая асфальтобетонная смесь должна быть высокой температуры. Поэтому на место стройки ее доставляют машинами сразу с асфальтобетонных заводов (АБЗ). В зависимости от марки и типа используемых машин одна такая машина может привести до 20 тонн горячего материала. Из 1 тонны такого материала может получить до 10 квадратных метров покрытия небольшой толщины. В идеале на место стройки должен идти постоянный поток машин с горячим материалом, дабы обеспечить бесперебойную работу по укладке асфальтобетонного покрытия. [4]

Сам процесс постройки дороги состоит из этапа его укладки на уплотненную грунтовую подушку и последующим его уплотнением вибрационными катками. Процесс уплотнения асфальтобетонного покрытия состоит в том, что поверхность материала должна накапливать в себе остаточные деформации. То есть Частицы одного слоя уплотняемого покрытия должны из-за сильной на них нагрузки извне проникать между частицами другого слоя. Возможность таких проникновений частиц между слоями возникает в материале в тот момент, когда усилие давления, трамбуемого вибровальца превышает прочность сдвига.

Возможность сопротивления материала деформации зависит от вязкости материала, его сдвиговой прочности, температуры при которой происходит деформация, и скорости с которой она действует. [5]

По мере уплотнения частицы вещества все чаще проникают друг в друга что увеличивает плотность поверхности, поэтому для дальнейшего уплотнения

необходимо увеличить действующие нагрузки, чаще всего это делается путем замены катка на более массивный.

1.2 Значимость уплотнения

Для обеспечения хорошего процесса уплотнения дорожного покрытия необходимо правильно выбирать технику с соответствующей уплотняющей возможностью. Под уплотняющей возможностью статического или вибрационного катка понимают толщину слоя асфальтобетонной смеси которую каток может своими воздействиями за определенное количество повторных проходов (6 – 10 раз) сможет уплотнить до требуемых норм качества.

Степень уплотнения достаточно сильно влияет на физико-механические показатели асфальтобетона. Для уплотнения смеси применяют легкие, средние и тяжелые катки статического действия с металлическими вальцами, вибрационные катки или катки на пневмо-шинах. Утрамбовку асфальта необходимо начинать легкими катками от края проезжей части к середине с перекрытием следа. Количество проходов зависит от типа смеси, вязкости битума и толщины уплотняемого слоя. [6] Не так давно стали распространены вибрационные катки с массой вальца от 1,5 до 8 т, по эффекту уплотнения они способны заменить собой статические катки массой от 10 до 15 т.

Когда асфальтобетонное покрытие установлено, берутся образцы, по которым вычисляется толщина данного слоя, его физико-механические показатели и коэффициент уплотнения.

Проводя сравнительный анализ технических параметров и особенностей используемых катков, было выявлено несколько отрицательных моментов, сказывающихся на качестве асфальтобетона.

Основной минус состоит в том, что на протяжении длительного периода времени модели и типы катков создавались методом проб и ошибок, то есть экспериментально.

Так же технологии трамбования и их средства заключаются в вольном или невольном игнорировании влияния толщины уплотняемого слоя асфальтобетона и применяемой техники на итоговый результат их работы.

При устройстве асфальтобетонных покрытий оптимальных толщин не определяют, в связи с тем, что толщина слоя строго задается проектом и контрактом. [7]

Когда статическая технология была единственной, задача качественного уплотнения асфальтобетона заключалась в замене легкого катка на более тяжелый, в результате увеличения упругих свойств уплотняемого материала.

Похожая смена производилась на каждой из трех стадий уплотнения (предварительная, основная, заключительная).



Рисунок 1 – Влияние статического вала катка на материал при его уплотнении

Мерой силы уплотнения статического катка является его линейная нагрузка, в месте контакта вальца с материалом, зависящая от веса катка.

При статическом уплотнении рисунок 1 каток своим весом давит на обрабатываемый материал.

Однако уплотнение этого типа распространяется в слой лишь на относительно небольшую глубину. Динамическая технология укладки является альтернативой статического уплотнения. Вместо смены легкого типа статического катка на более тяжелые модели используется вибрационный каток. Виброкаток с различными режимами вибрации, с точки зрения силового воздействия на уплотняемый материал, являет собой совокупность нескольких статических катков в одной конструкции – статический (без вибрации), вибрационный с различными режимами амплитуды и частоты колебаний вальца.

Когда воздействие на материал является динамическим по сравнению со статическим вязкие свойства материала сильнее пробуждаются у активных минералов материала. [8] Что позволяет дать материалу более жесткую плотность и меньшую водонепроницаемость.

Существующие виброкатки не предусматривают плавное или же дискретное изменение центробежной силы вибровозбудителей совместно с изменением плотности, а также прочности асфальтобетонного покрытия и снижению его температуры как это возможно место при использовании статических катков и их смене.

В первой фазе уплотнения виброкатком с наивысшей центробежной силой воздействия вальцов катка, является излишним что ведет к разрушению уплотняемой поверхности, а также к сдвигам приповерхностной зоны слоя.

Со временем развития вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонного покрытия стали пригодными и катки использующие динамический метод укладки. Вибрационное уплотняющее оборудование использует вибрирующий механизм, который обычно состоит из вращающегося эксцентрикового груза. Вибрационные уплотняющие катки используют комбинированные типы работы с динамической и статической

нагрузкой рисунок 2. В таких режимах используются быстро идущие друг за другом удары см. рисунок 3 на уплотняемую поверхность. Там же вибрация передается нижележащему слою материала, дабы его частицы перешли в движение. [9]

Такой режим сильно снижает трение внутри и позволяет частицам материала перейти состояние, в котором образуется достаточно мало пустот и достигается высокая плотность.

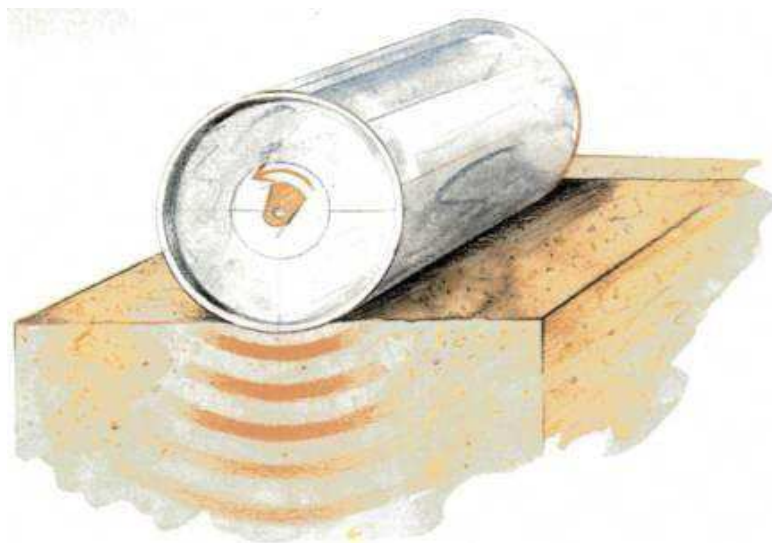


Рисунок 2 – Влияние вибровальца при уплотнении

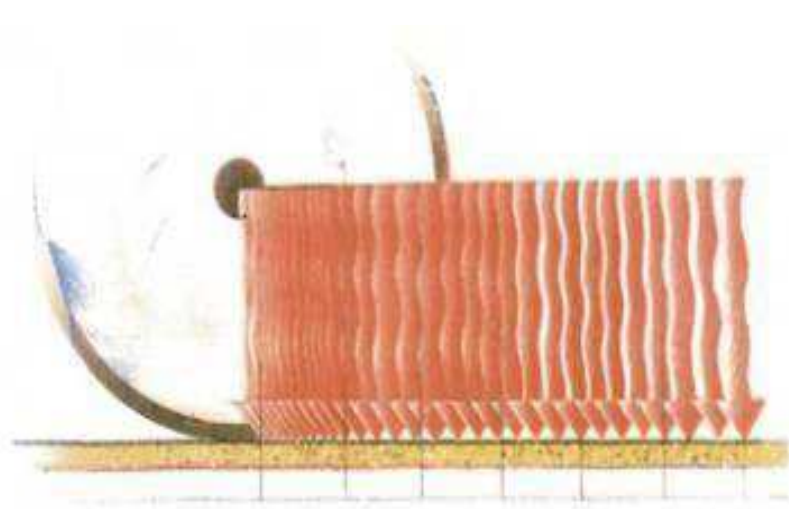


Рисунок 3 – Влияние вибровальца при уплотнении

Вибрация вибровальца достигается вращающимся небалансным грузом внутри вала. Частота вращения данного груза соответствует частоте вибрации. Дисбаланс состоит из нескольких частей: неподвижной и подвижной. Положение последней зависит от направления вращения вала, который возбуждает вибрации рисунок 4. В зависимости от типа вращения эффективная масса груза уменьшается или увеличивается, благодаря чему валец может колебаться с несколькими разными амплитудами.

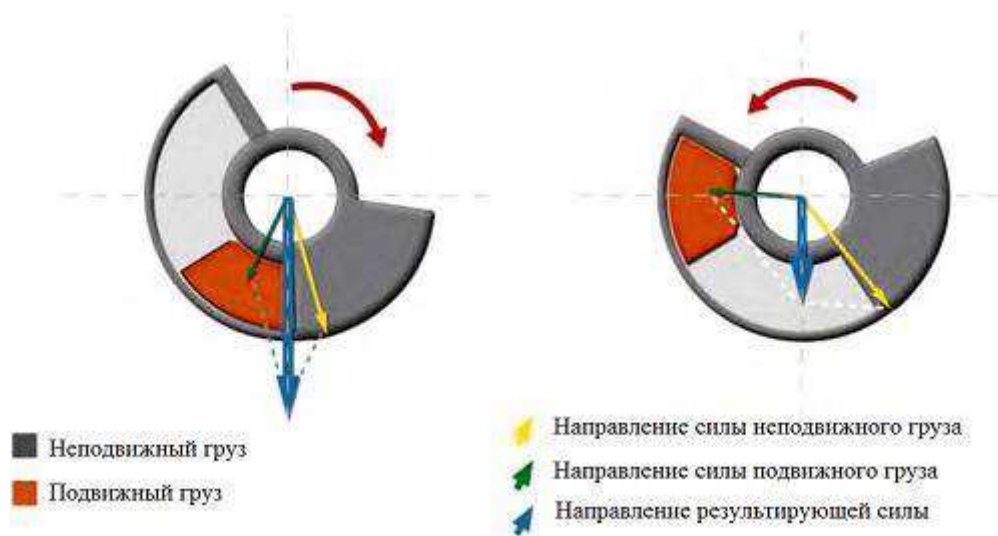


Рисунок 4 – Направление сил, действующих на валец

От изменения направления вращения вибровала эффективная масса дисбаланса в вальце изменяется.

При уплотнении с использованием вибрационных катков достигается более высокая плотность при меньшем числе проходов. На данный момент вибрационные катки занимают около 70 % рынка.[10] В настоящее время дорожное строительство испытывает отдельные трудности, связанные с технологией строительства автодорог, а именно с проблемой выбора и реализацией рационального режима работы вибрационных катков.

Для наилучшего уплотнения покрытия нужно правильно выбирать такие параметры процесса как:

- 1) с какой скоростью двигается каток;
- 2) с какой частотой вибрирует вибровалец;
- 3) с какой амплитудой колеблется вибровальца;
- 4) какая статическая линейная нагрузка.

Амплитуда колебания – это величина наибольшего отклонения от положения равновесия рисунок 5. Чем выше амплитуда колебания, тем больше сила с которой происходит уплотнение.

От амплитуды, устанавливаемой в машине зависят частоты. Ориентировочно принимается: наименьшая амплитуда - наибольшая частота, и наоборот.



Рисунок 5 – Воздействие вальца на уплотняемую поверхность

В пособии по уплотнению, от фирмы «НАММ», написано следующее - амплитуды больше 1,0 мм подходят для уплотнения слабо связанных материалов и более толстых слоев. Амплитуды меньше, в свою очередь лучше использовать для материалов с большей связностью и на тонких слоях.[11]

Чем меньше толщина уплотняемого слоя, тем меньше амплитуда должна использоваться, дабы не вызвать разрушения материала.

При уплотнении же грунтовых покрытий виброкатками амплитуда должна варьироваться в пределах от 0,5 до 2,0 мм. По сути большая амплитуда при той же массе дисбаланса должна означать лучшее уплотнение и на большую глубину. При увеличении уплотнения материала, вибровалец начинает отскакивать. Что в свою очередь никак не влияет на увеличения плотности поверхности, даже при увеличении количества проходов. Отскакивания вибровальца можно избежать, уменьшив амплитуду, что в свою очередь может повысить плотность уплотняемой поверхности.[12]

Частота колебаний или же количество оборотов дисбаланса внутри вальца за 1 секунду времени так же оказывает большое влияние на скорость уплотнения. Выбор частоты с которой будет работать вибровалец основывается на текущей амплитуде колебания. На рисунке 6 представлена примерное отношение частоты и амплитуды.

Кроме того, на частоту колебания влияет еще и скорость с которой движется каток.

Из работ, Серебренникова В.С. «Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей» можно сделать вывод, что для улучшения уплотняющей способности катка при увеличении скорости необходимо увеличивать частоту, с которой колеблется валец.[13]

Это связано с тем, что с повышением скорости понижается время контакта вибровальца с уплотняемой поверхностью и, для наилучшего уплотнения необходимо повысить количество ударов, для чего необходимо повысить частоту вибрации. Большие частоты, создают меньшее расстояние между ударами, что предотвращает образование неровностей.

Так же не маловажным параметром, влияющим на эффективность процесса уплотнения, является скорость с которой движется каток в ходе уплотнения. Правильно подобранная скорость позволит создать необходимую

величину контакта, за которую деформации уплотняемой поверхности успеют сойтись более полно.

Если вдруг скорость с которой движется каток слишком большая относительно установленной рабочей частоты колебаний, точки влияния отдельных ударов вальца на уплотняемую поверхность будут располагаться слишком далеко друг от друга.



Рисунок 6 – Распределение ударных импульсов при движении катка

Наилучшими действующими скоростями можно считать скорость движения катка в промежутке от 2 до 7 км/ч.[14] Первый проход делается на малой скорости в промежутке от 1 до 3 км/ч и с выключенной вибрацией, предохраняя смесь от саморазрушения потому что нет необходимости в увеличении уплотняющей способности катка. Маленькая скорость в диапазоне от 2 до 3 км/ч применяется, если слой уплотнения большой толщины и необходимо получить высокий коэффициент уплотнения.

1.3 Типы катков

Существуют две основные группы вибрационных катков: грунтовые и асфальтовые. Они различаются не только количеством и видами имеющихся барабанов, но и требованиями к динамке. Пока частота колебаний и,

следовательно, вертикальная сила, получаемая от вращающегося дисбаланса, малы, ролик действует как линейная система. Как только частота вибрации сильно увеличивается каток начинает терять контакт с поверхностью, которую уплотняет. Машина начинает периодически подпрыгивать. Потеря контакта с поверхностью превращает линейное поведение в нелинейное. Такие режимы работы используется при уплотнении грунта.

Достижение требуемого качества асфальтобетонного покрытия при строительстве обеспечивается уплотняющими машинами. В соответствии с нормативными документами для этих целей могут быть использованы различные методы уплотнения и типы катков в зависимости от конкретных условий производства работ по устройству покрытия [11;14 – 18]. Согласно ГОСТ Р 52156-2003 все катки имеют следующую классификацию (рисунок 7)

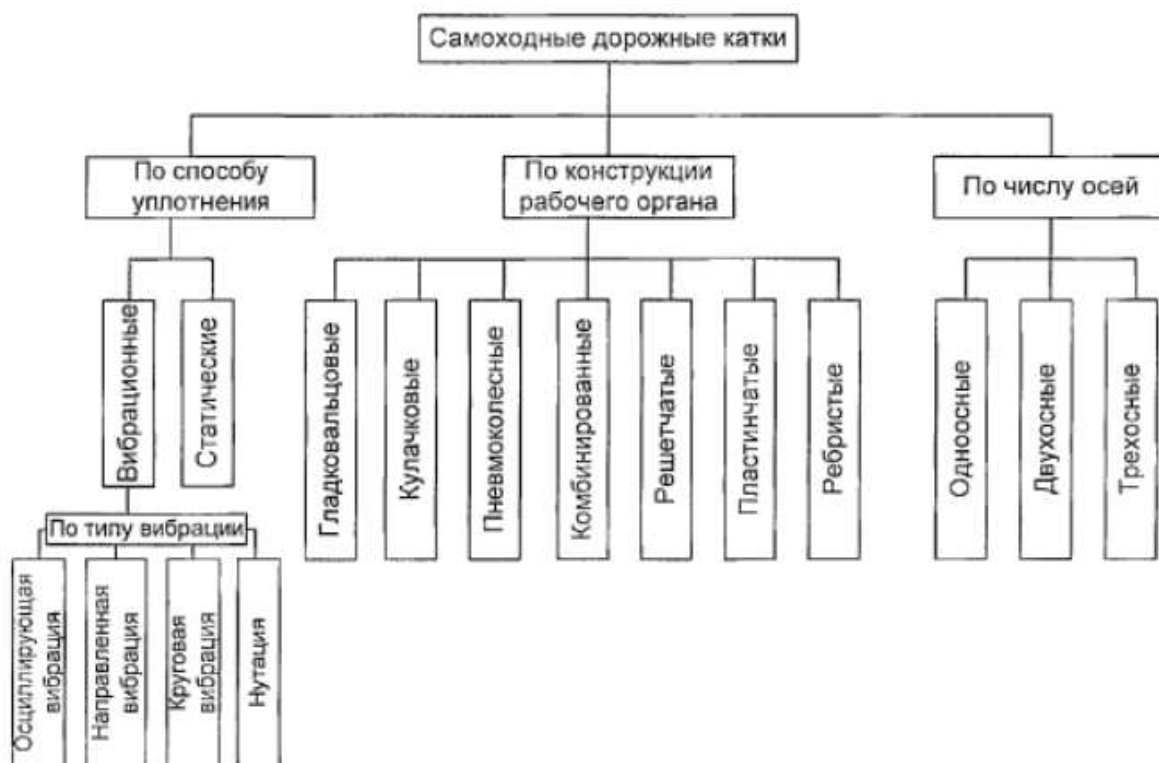


Рисунок 7 – Классификация типов катков

Наибольшее распространение получили самоходные катки с гладкими металлическими вальцами, что объясняется простотой их конструкции и надежностью. В последнее время все большее количество дорожных предприятий отдает предпочтение вибрационным каткам [1]. Вибрационный каток - это машина, сочетающая в себе статический и динамический методы воздействия на материал. Вследствие чего, имеет большую производительность, обладает значительно меньшей металлоемкостью и является эффективным средством для уплотнения дорожно строительных материалов. Под действием вибрации уменьшается трение между вальцом и асфальтобетонной смесью, что приводит к большой подвижности материала в зоне контакта и его полной укатке. Основным недостатком виброкатков является их низкая надежность, ввиду больших динамических нагрузок на агрегаты [19].

Для исследования был выбран вибрационный каток RV-9dd фирмы «РАСКАТ». Этот каток является самоходной машиной, в состав которого входят: силовая установка, стоящая на раме, вибровальцы, рама, кабина водителя, механизм для обработки асфальтобетона. Два гладких металлических вальца, с возможностью установки перфорированной поверхности, со встроенными вибрационными возбудителями являются рабочими органами виброкатка. На одной из рам катка установлена силовая установка, которая включает в себя двигатель и станцию с гидрооборудованием. Силовая установка состоит из двигателя и насоса, который необходим для перераспределения вращающего момента от двигателя, а также передачи управления от рулевого колеса.

Характеристики используемого в процессе работы виброкатка представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики катка

Масса эксплуатационная, т	9
Ширина уплотняемой полосы, мм	1700
Частота колебаний вибратора, Гц	40/55
Вынуждающая сила, кН	88,5/65
Линейное движение вальца, кг/см	26
Амплитуда гладкого вальца, мм	0,55/0,25
Преодолеваемый уклон, не менее, %	36
Двигатель	Kubota V-3800-DI-T-E2B
Мощность двигателя, кВт	70.6
Тип трансмиссии	Гидравлическая
Длина катка, мм	4900
База катка, мм	3750
Высота в рабочем состоянии, мм	2800
Диаметр вальца, мм	1200
Угол поворота вальца, град	30
Ширина катка, мм	1800
Ширина вальца, мм	1700

1.4 Используемые методы контроля качества дорожных покрытий

Для контроля степени уплотнения дорожного покрытия существуют множество методов. В настоящее время в отечественной практике используются методы точечного разрушающего контроля в соответствии со СНиП 3.06.03-85 «Автомобильные дороги». Для которых вырезанный образец асфальта (керн), проходит ряд прочностных и температурных испытаний в специализированных лабораториях, что занимает от одного до нескольких дней.

На лабораторные испытания отправляется сразу несколько образцов из разных участков, такой способ позволит получить максимально точную информацию и оценить параметры плотности дорожного покрытия в тех местах, где были изъяты образцы. Приемлемое качество можно определить в том случае, если отклонения найдены не более чем в 10 процентах проб, а все остальные полностью соответствуют стандартам. Подходящий вариант оценки подбирается индивидуально. Эксперты учитывают тип почвы, особенности будущего объекта и другие параметры. Поэтому всегда обращайтесь за помощью только к профессионалам, они смогут выполнить весь комплекс испытаний и предоставить точные данные. [20]

Особенной популярностью пользуется метод режущих колец, он зарекомендовал себя с лучшей стороны, позволяет получить наиболее точные данные. При помощи специального устройства происходит отбор проб из участка. Специалисты собирают материалы в шахматном порядке, а расстояние между точками должно составлять не менее 20 метров. Все образцы отправляются в лабораторию на исследование, сотрудники проводят измерение их массы, объема, влажности путем высушивания. Эти параметры позволяют выявить плотность и количество влаги, оценить качество выполнения подготовительных работ.

Однако существуют и методы неразрушающего непрерывного контроля уплотнения грунта (Continuous Compaction Control, CCC), которые позволяют следить за состоянием дорожного полотна во время уплотнения и оперативно реагировать в случае нахождения брака. В отличие от точечных методов контроля, методы непрерывного контроля работают на прямую с виброкатком. Барабан катка не только используется в качестве уплотнительного устройства, но и одновременно служит измерительным устройством.

1.5 Используемые системы непрерывного контроля

Системы непрерывного контроля уплотнения материала и управления этим процессом устанавливаются на своих катках ряд мировых производителей. Каждый из них постарался внести свои инновации. Основным принципом такой системы является оценка жесткости грунта путем оценки поведения барабана в движении. Всего на данный момент в мире используются множество системы непрерывного контроля, однако первыми разработанными системами являются: Compactometer, ACE (Ammann Compaction Expert), Terrameter.

Система непрерывного контроля “Compactometer”, представленная в 1978 году Dr. Heinz Thurner совместно с Dr. Åke Sandström и Dr. Lars Forssblad. Данная система основывается на быстром преобразовании Фурье величины, полученной путем измерения вертикального ускорения в подшипнике вибрационного барабана. Была выведена зависимость между соотношением долей на частоте возбуждения, двукратной частоте возбуждения и жесткости грунта.[22] Что позволяет, считывая параметры с вальца барабана при постоянном контакте с поверхностью рассчитать полученную жесткость. Если при этом виброкаток будет работать в режиме “Double Jump” при котором временно теряется контакт с поверхностью то данная система может перейти в режим расчета другого параметра, который так же определяет жесткость уплотняемой поверхности. При работе катка в других режимах данная система

не способна показать корректные результаты расчета. Данная система была первой системой непрерывного контроля и все еще используется рядом производителей.

Система непрерывного контроля “ACE” (Ammann Compaction Expert) введенная в 1999 году рассчитывает параметры путем анализа вертикальных ускорений во временной области.[23] Важным моментом на диаграмме силы смещения для оценки является переход от фазы загрузки к фазе разгрузки, где смещение имеет максимум. Данная система имеет два различных уравнения для расчета параметров, в зависимости от режима работы катка. Одно уравнение рассчитывает параметры при непрерывном режиме работы, при котором каток не теряет контакта с уплотняемой поверхностью. Второе уравнение используется в случае периодической потери контакта. Однако система чувствительна к изменению частоты и амплитуды барабана.

Система непрерывного контроля “Terrameter” представленная в 1982 году анализирует равновесие сил на барабане в вертикальном направлении.[25] Необходимые параметры рассчитывается от вертикального ускорения при рассмотрении статической нагрузки, силы возбуждения, массы барабана и эксцентриситета массы. Так же на систему меньше всего влияет изменение параметров уплотнения. Кроме того, это единственная система, которая учитывает геометрию вибрационного барабана (диаметр и ширину). Поэтому системы “Terrameter” на разных роликах с большей вероятностью дадут сопоставимые результаты.

Таблица 2 – Сравнение систем непрерывного контроля разных производителей

Производитель	Наименование системы	Автоматическое управление вибрацией
AMMANN / CASE	ACE (Ammann Compaction Expert)	+
BOMAG	Terrameter / VarioControl	+
CATERPILLAR	AccuGrade Compaction	-
DYNAPAC	DCA (Dynapac Compaction Analyzer)	+
HAMM	HCQ (Hamm Compaction Quality)	-
SAKAI	Sakai	-
VOLVO	CompAnalyzer, CompGauge	-

Автоматизированные системы непрерывного контроля уплотнения могут позволить сильно повысить производительность и качество работы катков прежде всего за счет предоставления оператору возможности в реальном времени контролировать процесс уплотнения и все главные показатели работы катка. Позволяет получить полный, а не частичный контроль результатов уплотнения по всей площади уплотняемой поверхности.

Позволяет полностью исключить не нужные проходы катка, что позволяет уменьшить затрачиваемое время уплотнения и расхода топлива.

Процесс уплотнения происходит равномерно и последовательно, нет мест с сильным или слабым уплотнением, так как энергия уплотнения от вибровальца выдаться в соответственно с типом уплотняемого материала.[24] Кроме того, места где была неправильно уплотнена грунтовая подушка вследствие проведения неподобающих работ по подготовки почвы или несоответствие в составе уплотняемой смеси вовремя выявляются, тем самым можно предоставить необходимое качество уплотнения. Асфальтобетонное покрытие обязательно будет создано высококачественным, гладким и долговечным.

Увеличивается срок службы виброкатка, так как машина всегда будет работать в оптимальном режиме работы, кроме того водитель катка будет вовремя предупрежден о переходе катка в опасные режимы работы.

1.6 Принцип действия систем непрерывного контроля.

На всех современных дорожный катках коэффициент CMV находится с помощью прибора под названием акселерометр, который устанавливается на вибровалец и позволяет измерять ответную реакцию грунта на вибрацию по мере его уплотнения. Данный прибор позволяет измерять ускорение вибровальца с которым тот отскакивает от уплотняемой поверхности. Чем

уплотняемый материал будет жестче, тем выше будет ускорение, с которым отскочит вибровалец.

Датчик акселерометр на выход выдает сигнал, который поступает на вход электронной системе расчёта. Электронная система в свою очередь анализирует входящее изменение ускорения вибровальца с помощью анализа спектра вертикальных ускорений. Данные которые электронная система на основе CMV выводит оператору на бортовой компьютер являются безразмерными. Данная система используется на катках для уплотнения грунта с гладкой поверхностью вибровальца.

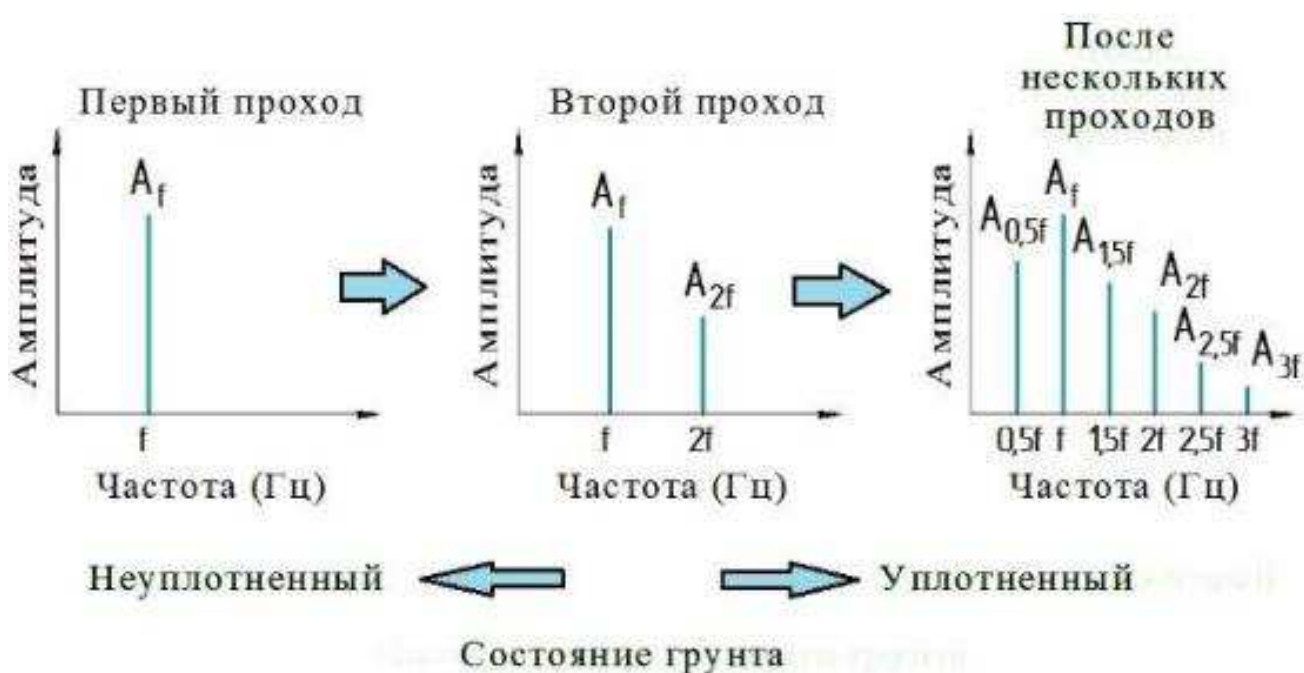


Рисунок 8 – Изменение спектра вертикальных ускорений от количества проходов катком

Коэффициент CMV показывает способность материала сопротивляться деформации под действием перегрузки, или же твердость (жесткость) материала. [25] В свою очередь, плотность уплотняемой смеси – это степень пористости поверхности, чем меньше в поверхности останется пор с воздухом, тем больше будет плотность материала.

Коэффициент CMV на прямую зависит от типа используемого вибрационного катка, скорости с которой он едет, частоты и амплитуды вибрации, действующего вынуждающего усилия, а так же от текущей плотности грунта. Другими словами, для более точного определения данного коэффициента требуется на месте работы предварительно провести полную калибровку приборов и датчиков для текущей уплотняемой поверхности.

Калибровка приборов и датчиков так же может проводиться на специально подготовленном полигоне, где заранее создана уплотненная полоса поверхности, а также ее плотность и жёсткость были измерены другими приборами. Во время работы в поле, что бы коэффициент CMV правильно определял степень уплотнённости поверхности водителю вибрационного катка необходимо следить за скоростью катка, амплитудой и частотой колебания вальца что бы не выйти за рамки измерения коэффициента.

Если во время работы катка хотя бы один из перечисленных параметров измениться и за этим не проследит оператор вибрационного катка, это повлияет на остальные параметры, что в свою очередь приведет к не правильному определению коэффициента. Или же грубо говоря коэффициент CMV будет определяться с большой погрешностью.

Анализ изменения спектров ускорения вибровальца так же лежит в основе другого коэффициента плотности, который используется в дорожном строительстве – это коэффициент RMV (Resonance Meter Value) так же еще иногда называющийся BV (Bouncing Value).

По мере уплотнения поверхности, виброкаток начинает все чаще отпружинивать от уплотняемой поверхности после вибрационного удара. Коэффициент RMV как раз и измеряет величину этого отскока от уплотняемой поверхности. Чем выше будет происходить отскок от уплотняемой поверхности, тем ниже будет правильность определения коэффициента CMV . Их этого можно сделать вывод, что благодаря контролю RMV водитель

вибрационного катка может определить с какой точностью определяться коэффициент CMV .

Сегодня чаще всего при строительстве дорог используются системы непрерывного контроля, основанные на измерении данных показателей RMV и CMV .

Системы, основанные измерениями этих показателей есть не только плюсы, но и не мало минусов. Один из основных минусов данных систем это то что они основываются на измерении косвенных показателей прочности уплотняемой поверхности. То есть анализ спектра вибрационных ускорений вальца виброкатка не дает полной картины происходящего с дорожным покрытием с точки зрения его плотности и жесткости.

Именно поэтому разработки в данной сфере не остановились и продолжаться до сих пор.

2 Описание рабочего процесса уплотнения

2.1 Математическое описание рабочего процесса уплотнения дорожного покрытия

Информационное моделирование в сфере строительных объектов позволяет быстрее развиваться системам САУ (система автоматического управления) в сфере дорожного строительства.

До внедрения САУ на реальный объект необходимо провести теоретическое исследование в определенной области, подразумевающее анализ и синтез системы и компьютерное моделирование. Для выполнения данной задачи необходимо создать математическую модель (ММ) исследуемого процесса как объекта управления. При разработке ММ в современных условиях необходимо обращать внимание на особенности используемого программного обеспечения для проведения исследований.

Исследования в области управления вибрационным уплотнением дорожного покрытия рассматриваться уже не первый год не только русскими, но и зарубежными учеными в области дорожного строительства.

Ученые рассматривают не только влияние вибрационных катков на асфальтобетонные смеси, но и на другие уплотняемые поверхности, в том числе грунт.

Один из основных недостатков, ранее разработанных ММ по данной теме являются вычислительные трудности при решении задач теории автоматического управления, а также исследования многомерных и сложных систем, к которым относится рассматриваемый объект управления.

Для того что бы убрать данные недостатки и повысить эффективность изучения данного объекта управления при использовании программного обеспечения рекомендовано использования методов пространства состояний, которые в свою очередь могут позволить осуществить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур.

Использование для описания модели методов пространства состояния позволяет исследовать в системе такие свойства, которые невозможно обнаружить при использовании классических методов и описания в терминах «ВХОД–ВЫХОД».

Запись в форме матрицы применяемая в данном методе позволяет получить преимущество при численном решении системы. В свою очередь математические формулы и проводимые решения никак не страдают от использования многомерных систем, описывающих поведение сложных производственных комплексов.

С точки зрения физики, строительной механики и сопротивления материалов, классическое понимание процесса уплотнения асфальтобетона вальцом дорожного катка сводится к обычному его деформированию штампом, но криволинейной формы, под воздействием статических или динамических сил с накоплением остаточных деформаций асфальтобетона за определенное количество повторяющихся таких воздействий.

При взаимодействии вибрационного вальца со средой в зависимости от плотности среды движение может быть периодическим или хаотическим. К нормальному условию процесса уплотнения относится периодическое движение вальца, которое может быть с постоянным контактом, периодическим отрывом, двойным «прыжком», покачиванием. Оптимальным условием процесса уплотнения является периодическое движение вальца с постоянным контактом.

Основными параметрами колебаний вальца и частиц уплотняемой среды являются частота, амплитуда, скорость, ускорение. Амплитуда колебаний любого уплотнителя зависит от физико-механических свойств уплотняемого материала и изменяется в процессе его уплотнения. Поэтому предлагаемые значения амплитуд колебаний в технических характеристиках уплотняющих машин следует корректировать с учетом реологических свойств уплотняемого материала.

Процесс уплотнения дорожно-строительных материалов по исследованиям проф. Н.Я. Хархуты заключается в накоплении материалом остаточных деформаций. Для эффективного уплотнения необходимо соблюдать условие, при котором контактные давления, возникающие под рабочим органом – вальцом не должны превышать предела прочности материала, т.е.

$$\sigma_T < \sigma_K \leq [\sigma_{пр}],$$

где σ_T и $\sigma_{пр}$ – соответственно пределы текучести и прочности уплотняемого материала; σ_K – величина контактных напряжений в течение процесса уплотнения; $\sigma_K = (0,95-0,98) \sigma_{пр}$ [5].

При составлении математической модели процесса уплотнения вибрационным катком приняты следующие допущения:

- 1) элементы конструкции машины имеют абсолютную жесткость;
- 2) вибрационный рабочий орган работает в безударном режиме с колебаниями гармонического характера;
- 3) уплотняемый слой обладает упруго-вязкими свойствами;
- 4) упруго-вязкие свойства амортизаторов линейны;
- 5) рассматривается только вертикальная составляющая вибрации;
- 6) учитываются инерционные свойства уплотняемой среды.

Расчетная схема модели вибрационного катка с использованием реологических параметров уплотняемой упруго-вязкой среды представлена на рисунке 9. Полученная модель позволяет выйти на определение амплитуды колебаний вальца и мощности на уплотнение среды.

2.2 Имитационное описание модели

2.2.1 Выбор среды для моделирования

Для создания имитационной модели динамического процесса существует различные программные продукты.

Matlab – одна из немногих систем, позволяющих автоматизировать математические расчёты. Matlab – является это коллекцией программ численных методов компьютерной математики, сочетаемое с мощными средствами графической визуализации и анимационной графики.

Simulink – это среда для динамического междисциплинарного моделирования сложных технологических систем что позволяет ее выбирать в качестве инструмента для модельно-ориентированного проектирования.

Основным интерфейсом Simulink является графическая среда для создания диаграмм и набор библиотечных блоков, которые можно настраивать. Данная среда моделирования предлагает тесную интеграцию с остальными средами MATLAB и может либо использовать MATLAB, либо создавать сценарии из него. Кроме того, Simulink может широко использоваться в автоматическом управлении и цифровой обработке сигналов для моделирования и проектирования на основе моделей.

Вместе с другими продуктами продуктами Matlab модуль Simulink позволяет автоматически создавать программный код на языке C для реализации систем в режиме реального времени. Так как эффективность и гибкость кода со временем улучшается, Simulink все сильнее распространяется для производственных систем. Кроме того, данный модуль является инструментом для разработки встроенных систем из-за его гибкости и способности к быстрой итерации.

Так же модуль программы Simulink предназначен для моделирования и симуляций, что в свою очередь дает возможность разработчику производить

всестороннее исследование разрабатываемой системы не меняя среду проектирования.

Моделирование и симуляции проверяют поведение системы в критических условиях или в аварийных сценариях. Это снижает стоимость дорогих физических прототипов. Контроль концепции выполняется с поддержкой полунатурного прогнозирования и быстрого прототипирования.

Кроме того, шаблоны Simulink поддерживают автоматическую генерацию кода промышленного качества на языках C, C++ и HDL. Сгенерированный код и результаты шаблона идентичны. Алгоритмы, созданные в MATLAB, не нуждаются в переработке для повторного использования в Simulink. Код MATLAB добавлен в блок Simulink или Stateflow как есть.

MATLAB также используется для создания входных наборов данных для моделирования системы. Моделирование масштабируется в кластеры для ускорения инженерных задач, таких как перечисление или оптимизация параметров, затем результаты анализируются и отображаются в MATLAB.

Для создания имитационной модели был выбран продукт Matlab и в частности модуль Simulink.

2.2.1 Математическая модель

На схеме, рисунке 10, использованы следующие обозначения: m_f – масса рамы катка; m_d – масса вибрационного вальца; m_s – масса уплотняемой среды; k_{df} – коэффициент упругого сопротивления амортизаторов, установленных между рамой и вальцом, Н/м; c_{df} – коэффициент демпфирования амортизаторов, Н с/м; k_s – коэффициент упругого сопротивления уплотняемой среды, Н/м; c_s – коэффициент демпфирования уплотняемой среды, Н с/м; y_f, y_d, y_s – перемещение элементов системы, соответственно. .

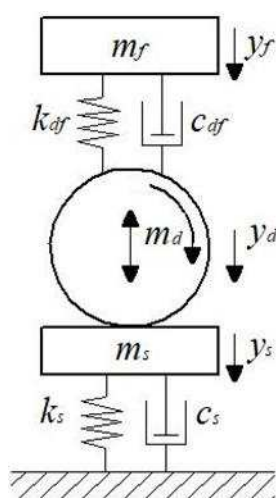


Рисунок 8 – Расчетная схема модели вибрационного катка

Для теоретического описания уплотняемой среды используется модель Кельвина-Фойгта.

В результате анализа процесса уплотнения смеси вибрационным катком, рисунок 8, была составлена его математическая модель, которая одновременно отражает как динамику колебаний вибрационного вальца, так и реологические свойства уплотненной среды. Получены дифференциальные уравнения трехмассовой колебательной системы «вибрационная смесь барабана» в виде системы

$$m_f \cdot \ddot{y}_f - k_{df} \cdot (y_d - y_f) - c_{df} \cdot (\dot{y}_d - \dot{y}_f) = m_f \cdot g;$$

$$(m_d + m_s) \cdot \ddot{y}_d + k_s \cdot y_d + k_{df} \cdot (y_d - y_f) + c_s \cdot \dot{y}_d + c_{df} \cdot (\dot{y}_d - \dot{y}_f) = (m_d + m_s) \cdot g + F_e \cdot \sin(\omega \cdot t);$$

$$F_e = m_e \cdot r_e \cdot \omega^2; \dot{y}_s = \dot{y}_d; y_s = y_d; \text{ при } t=0, \dot{y}_d = \dot{y}_s = 0; y_d = y_s = 0,$$

где $y_f, \dot{y}_f, \ddot{y}_f$ – перемещение, скорость, ускорение рамы катка, соответственно; $y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d$ – перемещение, скорость, ускорение вибрационного вальца, соответственно; g – ускорение свободного падения, м/с²; F_e – возмущающая сила вибровозбудителя, Н; t – время, с; m_e – масса дебаланса вибратора, кг; r_e – радиус эксцентриситета дебаланса вибратора, м; ω – угловая частота вращения вала вибровозбудителя, рад/с.

Метод пространства состояний позволяет представлять систему управления в виде системы уравнений [2, 8]:

$$\dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t); \quad (2)$$

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \quad (3)$$

где $x(t), y(t), u(t)$ – вектор состояния, компонентами которого являются переменные состояния системы n -го порядка; $y(t)$ – вектор выхода, компонентами которого являются выходные переменные системы; $A(t)$ – матрица коэффициентов системы ($n \times n$); $B(t)$ – матрица входа ($r \times n$), где r – число воздействий; $u(t)$ – вектор входа, компонентами которого являются входные переменные системы; $C(t)$ – матрица выхода ($n \times p$), где p – число выходных величин; $D(t)$ – матрица обхода, определяющая прямую зависимость выхода от входа. [15]

Для упрощения исследования модели объекта, система уравнений (1) приводится к системе дифференциальных уравнений первого порядка в нормальной форме Коши.

Система уравнений (1) в форме Коши

$$\begin{aligned}\ddot{y}_f &= \frac{1}{m_f} [k_{df} \cdot (y_d - y_f) + c_{df} \cdot (\dot{y}_d - \dot{y}_f) + m_f \cdot g]; \\ \ddot{y}_d &= \frac{1}{(m_d + m_s)} \left[-k_{df} \cdot (y_d - y_f) - c_{df} \cdot (\dot{y}_d - \dot{y}_f) - \right. \\ &\quad \left. -k_s \cdot y_d - c_s \cdot \dot{y}_d + (m_d + m_s) \cdot g + F_e \cdot \sin(\omega \cdot t) \right]; \\ F_e &= m_e \cdot r_e \cdot \omega^2.\end{aligned}\tag{4}$$

Определены переменные состояния системы: z_1 – вертикальное перемещение рамы, $z_1 = y_f$; z_2 – скорость вертикального движения рамы, $z_2 = \dot{y}_f$; z_3 – вертикальное перемещение вальца, $z_3 = y_d$; z_4 – скорость вертикального движения вальца, $z_4 = \dot{y}_d$.

Система уравнений (4) после преобразований

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2; \\ \dot{z}_2 &= \frac{1}{m_f} [k_{df} \cdot (z_3 - z_1) + c_{df} \cdot (z_4 - z_2) + m_f \cdot g]; \\ \dot{z}_3 &= z_4; \\ \dot{z}_4 &= \frac{1}{(m_d + m_s)} [-k_{df} \cdot (z_3 - z_1) - c_{df} \cdot (z_4 - z_2) - k_s \cdot z_3 - c_s \cdot z_4 + (m_d + m_s) \cdot g + F_e \cdot \sin(\omega \cdot t)].\end{aligned}\tag{5}$$

Перемещение этих параметров в соответствующий векторы и матрицы позволяют получить следующие результаты модели в пространстве состояний

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= [\dot{z}_1 \quad \dot{z}_2 \quad \dot{z}_3 \quad \dot{z}_4]^T; Z = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4]^T; \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s + k_{df}}{m_d + m_s} & -\frac{c_s + c_{df}}{m_d + m_s} & \frac{k_{df}}{m_d + m_s} & \frac{c_{df}}{m_d + m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_{df}}{m_f} & \frac{c_{df}}{m_f} & -\frac{k_{df}}{m_f} & -\frac{c_{df}}{m_f} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_f} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_d + m_s} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} m_f \cdot g \\ m_e \cdot r_e \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) + m_d \cdot g + m_s \cdot g \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Исследование математической модели. Для оценки адекватности математической модели процесса выполнены вычисления в программе

MATLAB. Имитационная модель исследуемого процесса представлена на рисунке 10.

Для моделирования процесса использованы исходные данные из работы

```

%% Коэффициент упругого сопротивления
kdf=2.2*10^6;% Коэффициент упругого сопротивления амортизатора, Н/м
ks=58*10^6;% Коэффициент упругого сопротивления смеси под вальцом, Н/м

eta=0.16; % Коэффициент
f=40;% Частота вибрации, Гц
omega=2*pi*f;% Угловая частота вращения дебаланса вибратора, рад/с
P=88500; %Амплитуда

cdf=kdf*eta/omega;% Коэффициент демпфирования амортизаторов, Нс/м
cs=70*10^3;% Коэффициент демпфирования смеси под вальцом, Нс/м

mf=5000;% Масса рамы катка, кг
md=3500;% Масса вальцов, кг
ms=0.2*md;% Масса смеси участвующая в динамической системе, кг

g=9.81;% Ускорение свободного падения, м/с2

```

Рисунок 9 – Данные моделирования

В результате компьютерного моделирования получены параметры рабочего процесса вальца и рамы: перемещение; скорость; ускорение, рисунок 11.

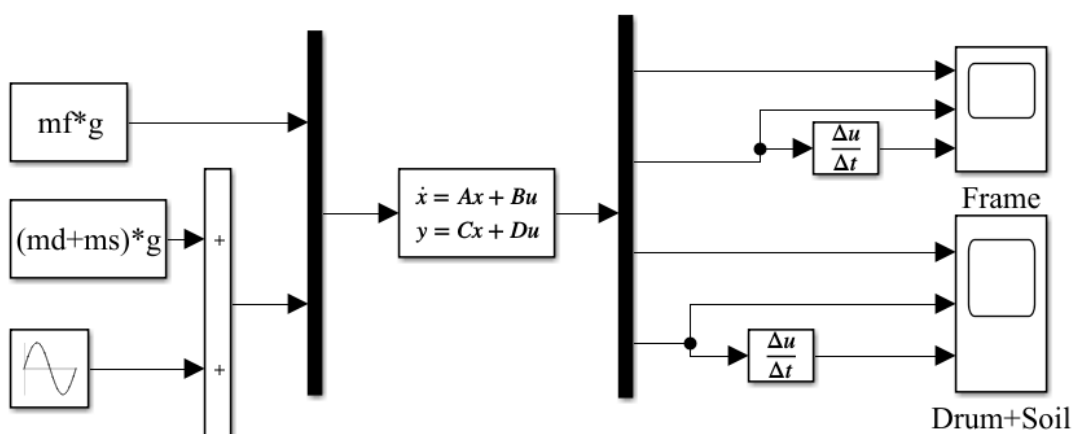


Рисунок 10 – Имитационная модель исследуемого процесса на языке MATLAB&Simulink

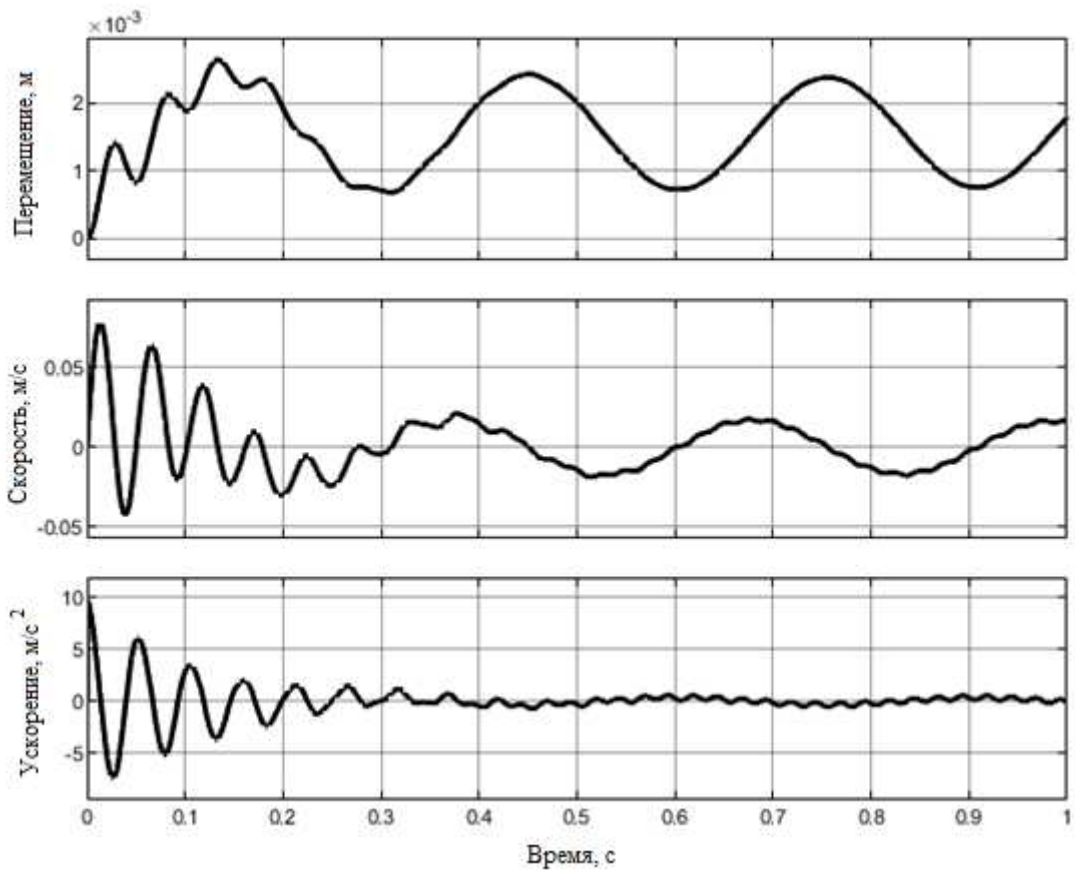


Рисунок 11 – Графические зависимости параметров рабочего процесса
вибрационного катка

3 Методика синтеза САУ объектом высокого порядка

3.1 Методы синтеза регуляторов

Под синтезом регулятора понимается работа по расчету его рациональной конструкции и оптимальных параметров отдельных элементов. При решении задачи синтеза известны части структуры системы, такие как объект управления, регулирующие органы, средства измерения и т. Д. Нормативная часть САУ неизвестна. Основная задача математического синтеза - определение оптимального алгоритма управления, или наилучшего при определенных условиях.

Эту задачу часто называют инженерным синтезом. Задачу инженерного синтеза можно считать завершенной, если расчет качества ожидаемого переходного процесса удовлетворяет системным требованиям. Не исключены случаи, когда это невозможно сделать в рамках выбранной структуры. Затем необходимо использовать дополнительные сигналы, например, возмущения от отклонения, использовать локальные обратные связи, ввести корректирующие устройства.

Имея структуру, алгоритм и его числовые параметры, можно решить третью проблему - техническую реализацию. В подавляющем большинстве случаев регулятор собирается из унифицированных узлов, поэтому под синтезом понимается более узкая задача - расчет корректирующих устройств для САУ.

ПИД-регулятор - устройство в контуре обратной связи, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизированного значения от заданного значения и выдает управляющий сигнал, который представляет собой сумму трех членов, первое из которых

пропорционально этому отклонению, второе - интегралу отклонения, а третье - пропорционально получению 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.

1) П — регулятор, пропорциональный регулятор.

Передаточная функция П — регулятор.

$$W_P(s) = K_P.$$

Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка, тем больше управляющее воздействие).

2) И — регулятор, интегрирующий регулятор. Передаточная функция И — регулятор.

$$W_I(s) = \frac{K_I}{s}.$$

Управляющее воздействие пропорционально интегралу ошибки.

3) Д — регулятор, дифференцирующий регулятор. Передаточная функция Д — регулятор.

$$W_D(s) = K_D \cdot s.$$

Д — регулятор генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины

На практике данные простейшие П, И, Д регуляторы комбинируются в регуляторы вида ПИ, ПД, ПИД.

В зависимости от выбранного вида регулятор может иметь пропорциональную характеристику (П), пропорционально-интегральную

характеристику (ПИ), пропорционально-дифференциальную характеристику (ПД) или пропорционально-интегральную характеристику с воздействием по производной (ПИД регулятор).

4) ПИ-регулятор, пропорционально-интегральный регулятор. представляет собой сочетание «П» и «И» регуляторов.

Передаточная функция ПИ — регулятора.

$$W_{PI}(s) = K_P + \frac{K_I}{s}.$$

Регулирование ПИ-регулятора происходит в два этапа: сначала пропорциональная составляющая оперативно приближает параметр к заданному значению и уменьшает основную часть ошибки регулирования до остаточной статической ошибки, а затем интегральная составляющая производит до регулирование до полного возврата параметра к заданному значению. Чтобы исключить перерегулирование, интегральную составляющую специально делают медленно действующей. Наличие пропорциональной составляющей в регуляторе обеспечивает быструю реакцию на появление ошибки регулирования, т.е. высокое быстродействие. За счет интегральной составляющей, ПИ — регулятор дает высокую точность регулирования.

5) ПД — регулятор, пропорционально — дифференциальный регулятор. ПД — регулятор представляет собой сочетание «П» и «Д» регуляторов. Передаточная функция ПД — регулятора.

$$W_{PD}(s) = K_P + K_D \cdot s.$$

Применение пропорционально — дифференциальных регуляторов дает возможность увеличивать общее усиление при сохранении устойчивости системы, что резко улучшает качество протекания переходных процессов. 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.

б) ПИД — регулятор, пропорционально — интегрально дифференциальный регулятор. ПИД — регулятор представляет собой сочетание «П», «И» и «Д» — регуляторов.

Передаточная функция ПИД — регулятора.

$$W_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s.$$

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 заданному значению, 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. Например, в регуляторе температуры выходной сигнал (мощность нагревателя) постепенно уменьшается при приближении температуры к заданной, и система стабилизируется при мощности, равной тепловым потерям. Температура не может достичь заданного значения, так как в этом случае мощность нагревателя станет равна нулю, и он начнёт остывать.

Чем больше коэффициент пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка, однако при слишком большом коэффициенте усиления при наличии задержек

(запаздывания) в системе могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость.

Интегрирующая составляющая пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Её используют для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку.

Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечиваться интегрирующей составляющей. Тем не менее, интегрирующая составляющая также может приводить к автоколебаниям при неправильном выборе её коэффициента.

Дифференцирующая составляющая пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

3.2 Методика синтеза ПИД — регулятора

Рассматривается линейная система автоматического управления с передаточной функцией (ПФ) объекта высокого (выше второго) порядка.

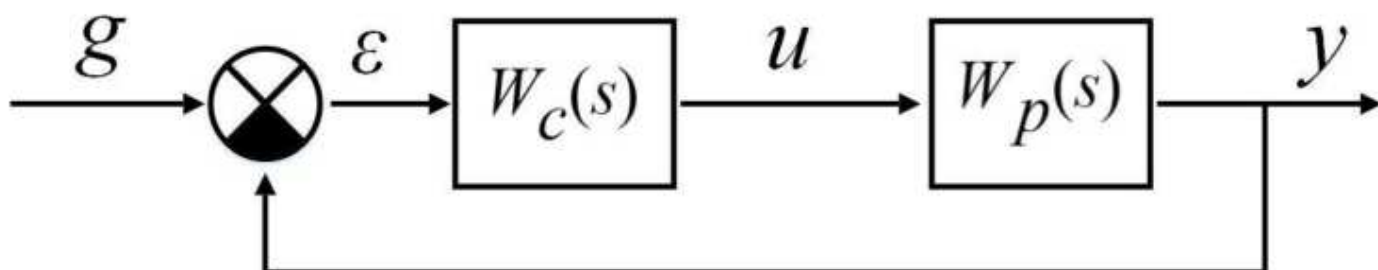


Рисунок 12 – Схема САУ с обратной связью

В общем виде передаточная функция объекта управления высокого порядка $W_p(s)$ и ПИД-регулятора $W_c(s)$ имеют вид:

$$W_p(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{N(s)}{D(s)}, m < n;$$

$$W_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s},$$

где s — оператор Лапласа; K_p , K_I и K_D — коэффициенты, соответственно, пропорциональности, интегрирования и дифференцирования.

При последовательном соединении ПИД-регулятора и объекта управления они образуют разомкнутую систему с ПФ следующего вида

$$W(s) = W_c(s) \cdot W_p(s).$$

Передаточная функция замкнутой системы управления с отрицательной единичной обратной связью

$$K(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}.$$

Исходными данными для аналитического синтеза параметров ПИД-регулятора САУ являются структура $R\Phi$ регулятора, $R\Phi$ объекта управления $W_p(s)$ высокого порядка и заданные показатели качества: перерегулирование и время регулирования.

Решается задача аналитического синтеза параметров K_p , K_I и K_D ПИД-регулятора замкнутой системы управления, обеспечивающих заданные показатели качества при управлении объектом управления с ПФ высокого порядка $W_p(s)$ модальным методом для двух вариантов задания значений полюсов корней характеристического уравнения замкнутой системы управления.

3.3 Результаты ПИД моделирования

Модель аналогового Пид – регулятора представлена на рисунке 13. С помощью выше описанной методике были рассчитаны параметры для данного ПИД – регулятора.

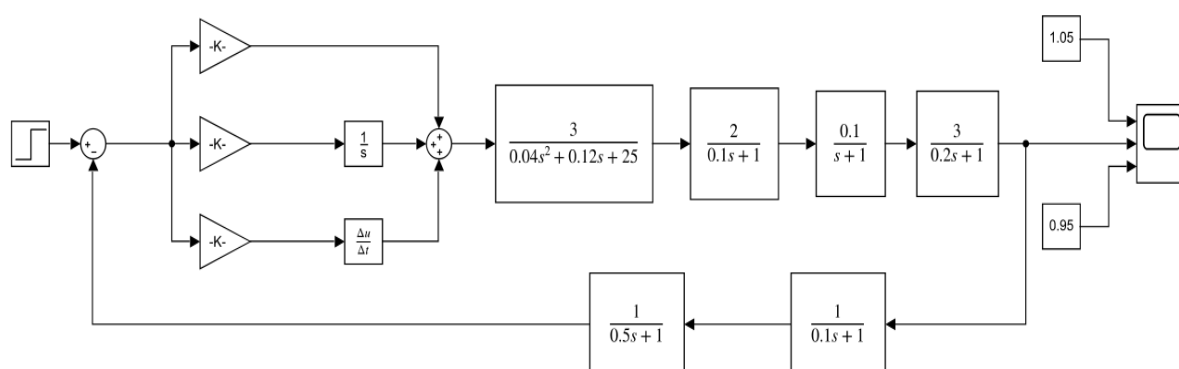


Рисунок 13 – Модель регулятора, созданного в MathLab

Результаты моделирования ПИД-регулятора в системе MATLAB выведены в виде графика рисунок 14, по данным графика можно сделать вывод, что перерегулирование отсутствует, процесс происходящий процесс апериодический.

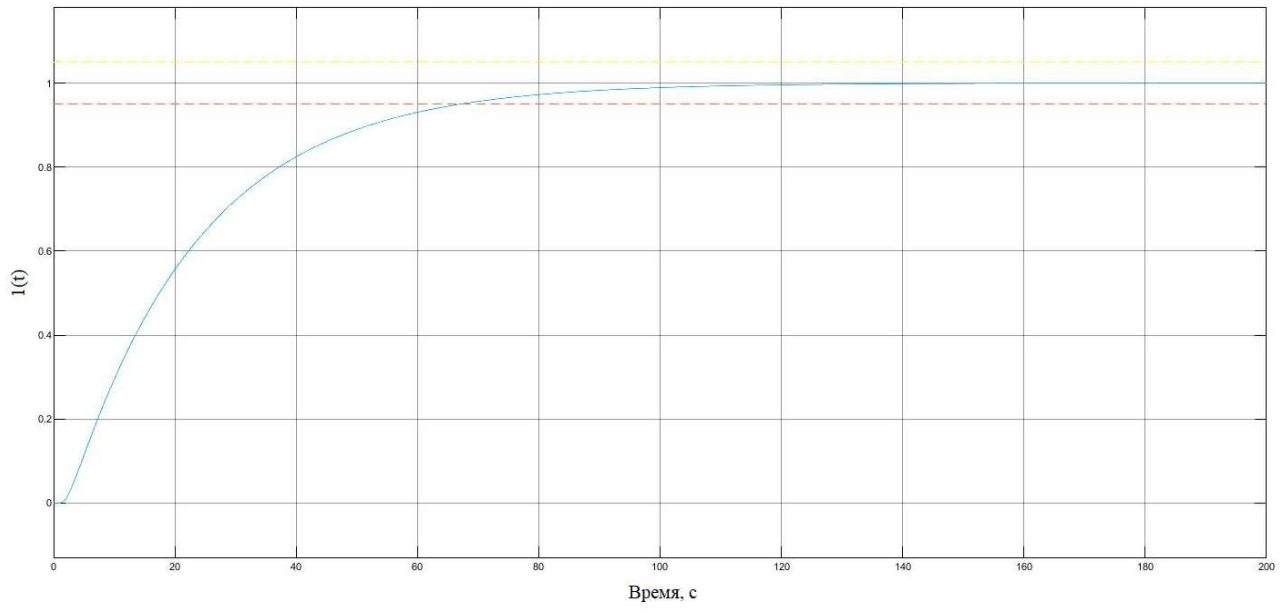


Рисунок 14 – Переходная характеристика Пид регулятора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения магистерской работы был проведен сбор материалов по данной теме, а именно – это научные публикации, научные работы, любительские записи, посвящённые задачам повышения качества дорожного покрытия, на основе улучшения управления дорожными машинами при уплотнении дорожного покрытия.

Во время проведения работы с использованием программного пакета MATLAB и в свою очередь среды моделирования Simulink были разработаны математические и имитационные модели процесса уплотнения поверхности вибрационным катком. Результаты полученного имитационного моделирования совпадают с примерами в работах других людей, проводивших подобные исследования до меня.

Так же был синтезирован ПИД регулятор, для проверки адекватности передаточной функции, используемой для создания имитационной модели.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ACE – Ammann Compaction Expert;

BV – Bouncing Value;

CCC – Continuous Compaction Control;

CMV – Compaction Meter Value;

RMV – Resonance Meter Value;

САУ – система автоматизированного управления;

ММ – математическая модель;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вадутов, О.С. Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов / О. С. Вадутов // Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии. – 2014. – Т. 325. – №5. – С.16-22.
- 2 Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
- 3 Строительство асфальтобетонных покрытий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://woodroads.ru/tehnologiyastroitelstvaporokrytii/79asfaltobetonstroitelstvodorog.html>.
- 4 Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А. А. Воронов. – Москва: Энергия, 1980. – 309 с.
- 5 Асфальтные работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://krasnodar.pulscen.ru/products/asfaltnyye_raboty_13960414.
- 6 Лукас, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – Москва: Недра, 1990. – 416 с.
- 7 O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules/A. O'Dwyer. – London: Imperial College Press, 2006. – 564 p.
- 8 Процесс укладки асфальта. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://roadworker.ru/process-ukladki-asfalta.html>.
- 9 O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules/A. O'Dwyer. – London: Imperial College Press, 2009. – 623 p.
- 10 Иванчура, В. И. Синтез ПИД-регулятора для объектов второго порядка с учетом расположения полюсов / В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов // Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 1. – С. 50-60.

- 11 Замятин, Д. В. Методика синтеза оптимальных по быстродействию систем / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2005. – № 4. – С. 28-30.
- 12 Замятин, Д. В. Определение параметров корректирующего устройства для системы четвертого порядка, оптимальной по быстродействию / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2006. – № 4. – С. 18-20.
- 13 Замятин, Д. В. Синтез оптимальных по быстродействию систем высокого порядка / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 2. – С. 24-28.
- 14 Иванчура, В.И. Оптимизация следящей системы автоматического управления / В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев // Вестник СибГАУ. – 2011. № 5. – С. 44-49.
- 15 Иванчура, В. И. Методика синтеза регуляторов для объектов второго порядка / В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, Л. В. Скурихин // Вестник Сибирского аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 17. – № 3. – С. 618-624.
- 16 Ефимов, С. В Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования / С. В. Ефимов, С. В. Замятин, С. А. Гайворонский // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 102-107.
- 17 Пермяков, В.Б. Комплексная механизация строительства: учебник для вузов / В.Б. Пермяков. – Москва: Высшая школа, 2005. – 383 с.
- 18 Атаев, С. С. Технология, механизация и автоматизация строительства / С.С. Атаев, А.Ф. Тихонов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 598с.
- 19 Воробьев, В.А., Автоматизация технологических процессов, оборудования и машин в строительстве / В.А. Воробьев, А.М. Васьковский, В.П. Попов. – Москва: ГазНИИпроект, 1999. – 570с.

20 Тихонов, А.Ф. Автоматизация и роботизация технологических процессов и машин в строительстве / А.Ф. Тихонов. – Москва: АСВ, 2005. – 463с.

21 Артемьев, К.А. Дорожные машины. Ч. 1: Машины для земляных работ: учебник для вузов / К.А. Артемьев, [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1972. – 504 с.

22 Артемьев, К.А. Дорожные машины. Ч. 2: Машины для устройства дорожных покрытий: учебник для вузов / К.А. Артемьев [и др.]. – Москва: Машиностроение. 1982. – 397 с.

23 Варганов, С.А. Машины для уплотнения грунтов и дорожностроительных материалов / С. А. Варганов, Г. С. Андреев. – Москва: Машиностроение, 1981. – 240 с.

24 ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ. 01.01.1999. – Москва: ГУП ЦПП, 1999. – 54 с.

25 ГОСТ Р 52156-2003 Самоходные дорожные катки. Общие технические условия. – Введ. 01.01.2003. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 14 с.

26 Иванченко, С.Н. Асфальтоукладчики Конструкция и расчёт учеб. пособие / С.Н. Иванченко. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. – 104 с.

27 Ксоврели, П.И. Влияние параметров и режимов укладки на уплотняемость асфальтобетонной смеси / П.И. Ксоврели // Тр. Союз-дор НИИ. – Москва, 1980. – С. 126 – 133.

28 Методические рекомендации по укладке и уплотнению асфальтобетонных смесей различного типа при использовании высокопроизводительных асфальтоукладчиков и катков / Б.С. Барышев, Б.М. Слепая, М.А. Либерман, Л.М. Кириллова, Э.Б. Островский. – Москва: СоюздорНИИ, 1984. – 12 с.

29 Серебренников, В.С. Обоснование режимных параметров

вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей: дис. канд. техн. наук: 05.05.04 / Серебренников Виктор Сергеевич. – Омск, 2008. – 170 с.

30 Параметрический синтез ПИД-регуляторов для систем пятого порядка / А. П. Прокопьев, М. В. Халалеев, А. И. Губин, П. А. Вахрушев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33: сб. тр. XXXII междунар. науч. конф.: в 12т. Т.3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Санкт-Петербург.: Изд-во Политезн. ун-та, 2020. - С. 11-15. ISSN 2587-9049 (Т. 3).

31 Идентификация динамической системы контроля уплотнения дорожно-строительных материалов / А. П. Прокопьев, А. И. Шведов, А. И. Губин, М. В. Халалеев// Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33: сб. тр. XXXII междунар. науч. конф.: в 12т. Т.8; под общ. ред. А.А. Большакова. – Санкт-Петербург: Изд-во Политезн. ун-та, 2020. - С. 33-37. ISSN 2587-9049 (Т. 8).

32 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. 09.01.2014. – Красноярск, 2014. – 60с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме магистерской диссертации

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Institute of Hydrodynamics Academy of Sciences of the Czech Republic
Ангарская государственная техническая академия
Астраханский государственный технический университет
Белгородский государственный технологический университет
Белорусский государственный аграрный технический университет
Белорусский государственный университет
Белорусский государственный технологический университет
Белорусский национальный технический университет
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Донской государственный технический университет
Ивановский государственный химико-технологический университет
Институт вычислительной математики РАН
Институт проблем управления РАН
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Московский политехнический университет
Пензенская государственная технологическая академия
Российский химико-технологический университет
Рязанский государственный радиотехнический университет
Самарский государственный технический университет
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Тамбовский государственный технический университет
Тверской государственный технический университет
Ярославский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

СБОРНИК ТРУДОВ

МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2020

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ПЯТОГО ПОРЯДКА

А.П. Прокопьев¹, Х.М. Халалеев², А.И. Губин³, П.А. Вахрушев⁴

Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, ¹ prok1@yandex.ru

² halaleev@mail.ru, ³ gubin.a@list.ru, ⁴ pvakhrushev@yandex.ru

Аннотация. Предлагается способ параметрического синтеза ПИД-регулятора для систем пятого порядка. В качестве теоретической основы подхода использован модальный метод для линейных систем с учетом задания корней характеристического полинома корректируемой системы управления. Предусмотрено задание условия положительных значений коэффициентов ПИД-регулятора. Проверка работоспособности предложенного способа синтеза ПИД-регулятора выполнена на примере синтеза регулятора системы с объектом пятого порядка.

Ключевые слова: управление, параметрический синтез, ПИД-регулятор, полином системы, желаемый полином, переходная характеристика.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF PID CONTROLLERS FOR FIFTH-ORDER SYSTEMS

A.P. Prokopyev¹, M.V. Halaleev², A.I. Gubin³, P.A. Vakhruшев⁴

Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, ¹ prok1@yandex.ru

² halaleev@mail.ru, ³ gubin.a@list.ru, ⁴ pvakhrushev@yandex.ru

Abstract. In the paper the method of parametric synthesis of PID controller for systems above the second order is proposed. As a theoretical basis of the approach, the modal method for linear systems is used, taking into account the setting of the roots of the characteristic polynomial of the corrected control system. It is provided to set the condition of positive values of the pid-regulator coefficients. The efficiency check of the proposed method of PID controller synthesis is performed on the example of system controller synthesis with the object of the fifth order.

Keywords: control, parametric synthesis, PID controller, polynomial of the system, the desired polynomial, transient response.

Внедрение технологий информационного моделирования строительных объектов (концепция BIM-технологии) предполагает использование автоматизированных строительных и дорожных машин (СДМ). С учетом особенностей динамики рабочего процесса СДМ в научных работах по параметрическому синтезу систем автоматического управления (САУ) появились новые идеи в этой прикладной области [1, 2 и др.].

Основные тенденции развития методов синтеза ПИ- и ПИД-регуляторов рассмотрены в книге Aidan O'Dwyer, 2006 [3] (443 метода синтеза ПИД-регуляторов) и в Aidan O'Dwyer, 2009 [4] (1731 методов синтеза ПИД-регуляторов).

Математические модели рабочих процессов СДМ в зависимости от принятых допущений приводят к моделям выше второго порядка [5, и др.]. Разработка методов проектирования регуляторов для объектов высокого (выше второго) порядка является актуальной научной задачей.

Рассматривается линейная система автоматического управления с обратной связью, с передаточной функцией (ПФ) объекта выше второго порядка, структурная схема которой показана на рис. 1.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: e – сигнал ошибки, равный разнице задающего g и регулируемого y сигналов; u – управляющий сигнал.

Исходными данными для синтеза параметров модели ПИД-регулятора являются ПФ модели объекта управления выше второго порядка, ПФ модели регулятора и заданные показатели качества системы: перерегулирование и время регулирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Публикации по теме магистерской диссертации

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Institute of Hydrodynamics Academy of Sciences of the Czech Republic
Ангарская государственная техническая академия
Астраханский государственный технический университет
Белгородский государственный технологический университет
Белорусский государственный аграрный технический университет
Белорусский государственный университет
Белорусский государственный технологический университет
Белорусский национальный технический университет
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Донской государственный технический университет
Ивановский государственный химико-технологический университет
Институт вычислительной математики РАН
Институт проблем управления РАН
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Московский политехнический университет
Пензенская государственная технологическая академия
Российский химико-технологический университет
Рязанский государственный радиотехнический университет
Самарский государственный технический университет
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Тамбовский государственный технический университет
Тверской государственный технический университет
Ярославский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

СБОРНИК ТРУДОВ

МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 8

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2020

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ²

А.П. Прокопьев¹, А.И. Шведов², А.И. Губин³, М.В. Халалеев⁴

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, prok1@yandex.ru

² Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, arkasha.shvedov@mail.ru

³ Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, gubin.a@list.ru

⁴ Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, halaleev_2011@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены результаты теоретического описания методом пространства состояний модели динамической системы контроля уплотнения дорожно-строительных материалов. Вибрационный уплотнитель включает валец с дебалансным валом. Математическая модель процесса взаимодействия динамической системы с дорожно-строительным материалом учитывает массы основных элементов конструкции и массу уплотняемого материала. Для описания свойств уплотняемого материала используется упруго-вязкая реологическая модель. Экспериментально получено подтверждение адекватности полученной математической модели по результатам имитационного моделирования системы в среде программы MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: математическая модель, вибрационный уплотнитель, валец, процесс уплотнения, дорожно-строительный материал, реологическая модель, метод пространства состояний.

IDENTIFICATION DYNAMIC SYSTEM COMPACTION CONTROL FOR ROAD CONSTRUCTION MATERIALS

A.P. Prokopev¹, A.I. Shvedov², A.I. Gubin³, M.V. Halaleev⁴

¹Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, prok1@yandex.ru

²Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, arkasha.shvedov@mail.ru

³Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, gubin.a@list.ru

⁴Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, halaleev_2011@mail.ru

Abstract: The results of a theoretical description model of a dynamic compaction control system for road construction materials using the state space method are considered. A vibratory compactor includes a drum with the unbalanced shaft. The mathematical model of the interaction of a dynamic system with road construction material takes into account the mass of the main structural elements and the mass of the compacted material. An elastic-viscous rheological model is used to describe the properties of the compacted material. Experimental confirmation of the adequacy of the obtained mathematical model based on the results of simulation of the system in the environment of the MATLAB/Simulink program was obtained.

Keywords: mathematical model, vibration compactor, drum, compaction process, road-building material, rheological model, method of state space.

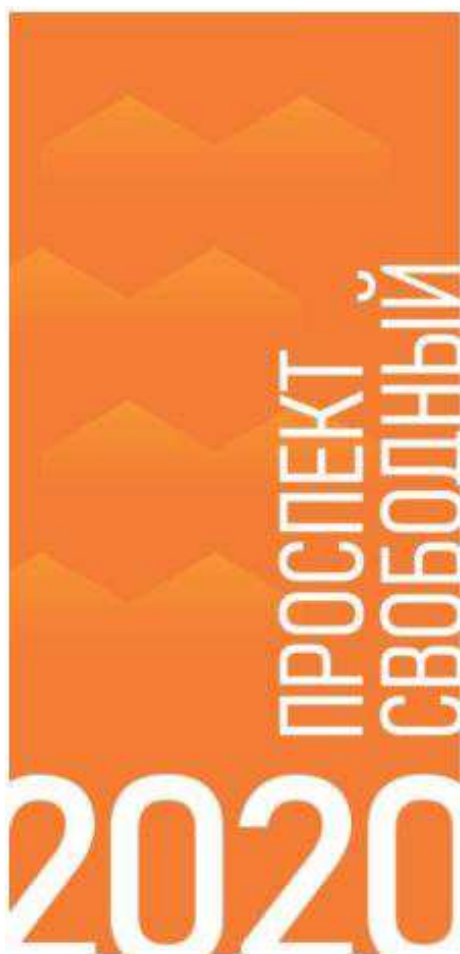
Цифровизация является одним из приоритетных направлений развития общества. В дорожно-строительной отрасли это связано с развитием проектирования кибер-физических систем, технологий неразрушающего контроля уплотнения, технологий интеллектуального уплотнения (intelligent compaction – IC) [1, 2], непрерывного контроля уплотнения (continuous compaction control – CCC) [3-5]. Усовершенствование физических объектов с учетом уровня развития цифровизации, интеллектуализации, автоматизации – асфальтоукладчиков, вибрационных дорожных катков, как основных элементов кибер-физических систем в технологическом дорожно-строительном комплексе, является актуальным научным направлением.

Работа посвящена разработке математической и имитационной модели взаимодействия вибрационного уплотнителя с дорожно-строительным материалом. Теоретические исследования уплотнения дорожно-строительных материалов (грунтов, асфальтобетонных смесей) рассмотрены многими российскими [6, 7 и др.] и

² Результаты работы являются этапом научно-исследовательской работы в области проектирования кибер-физических дорожно-строительных систем.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Участие в конференциях



XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ – 2020», посвященная Году памяти и славы (75-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов)

Институт: Инженерно-строительный институт

Секция: Строительные материалы и инновационные технологии строительства

СЕРТИФИКАТ

 очного участия
в конференции

Губин Андрей Иванович

участник Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект Свободный – 2020», составившейся в формате Digital (онлайн) с 20 апреля по 18 мая 2020 года. г. Красноярск

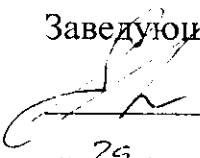
Секретарь конференции

С.К. Франчук

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра систем автоматизации, автоматического управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

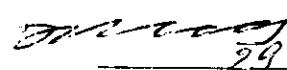
 С.В. Ченцов

« 29 » 06 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления
производством

Научный руководитель  29.06.2021

проф., д-р техн. наук

В.И. Иванчура

Выпускник  29.06.2021

А. И. Губин

заф. каф. канд. тех. наук

Рецензент  29.06.2021

Н. В. Титовская

Красноярск 2021