

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра строительных материалов и технологии строительства

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись

«_____» _____ 2020г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Совершенствование рабочего процесса виброплиты при
уплотнении грунта»**

08.04.01 «Строительство»

08.04.01.07 «Комплексная механизация и автоматизация строительства»

Научный руководитель _____ доц., канд. техн. наук А.П. Прокопьев

подпись

Выпускник _____ ст. гр. СФ18-07М Б.И. Эстемиров

подпись

Рецензент _____ проф., д-р. техн. наук В.И. Иванчура

подпись

Нормоконтролер _____ доц., канд. техн. наук Т.С. Турышева

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Совершенствование рабочего процесса виброплиты при уплотнении грунта» содержит 81 страницу текстового документа, 4 таблицы, 42 иллюстрации, 2 приложения и 76 использованных источников.

ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛИТЫ, ДИНАМИКА, РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС, МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА, MATLAB/Simulink.

Объект исследования – процесс уплотнения грунта вибрационными плитами.

Предмет исследования – закономерности процесса уплотнения дорожно-строительных материалов.

Целью работы является повышение эффективности процесса уплотнения дорожно-строительных материалов вибрационными плитами за счет выбора рациональных режимов работы и автоматического управления.

В результате были поставлены и решены следующие задачи:

- изучить рабочий процесс, устройство, исследования вибрационных плит в строительстве. Обосновать пути совершенствования процессов.

- разработать математическую модель в пространстве состояний процесса уплотнения грунта вибрационной плитой и исследовать в программной среде MATLAB/Simulink.

- выполнить проектирование ПИД-регулятора системы с объектом высокого порядка.

- провести экспериментальные исследования процесса уплотнения грунта вибрационной плитой. Разработать рекомендации по совершенствованию.

Научная новизна заключается в подходах к изучению, с использованием актуальных методов и программных комплексов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Состояние вопроса	6
1.1 Технология уплотнения материалов вибрационными плитами	6
1.2 Устройство вибрационных плит	10
1.3 Навесные экскаваторные виброплиты	16
1.4 Анализ теоретических исследований вибрационного процесса уплотнения материалов	20
2 Теоретические исследования	25
2.1 Математическая модель в пространстве состояний процесса уплотнения материала виброплитой	25
2.2 Моделирование процесса с использованием программы MATLAB/Simulink	31
3 Проектирование системы управления	37
3.1 Типовые автоматические регуляторы	37
3.2 Методика синтеза ПИД-регулятора системы высокого порядка	40
3.3 Синтез системы управления объектом четвертого порядка	45
4 Экспериментальное исследование	51
4.1 Методика эксперимента	51
4.2 Результаты эксперимента	63
Заключение	67
Список сокращений	68
Список использованных источников	69
Приложение А Листинг программы на языке MATLAB	78
Приложение Б Публикации	81

ВВЕДЕНИЕ

Современные уплотняющая техника российского и зарубежного производства имеют достаточно эффективные конструкции, постоянно совершенствуются. Для применения в конкретных условиях дорожного строительства можно подобрать наиболее подходящий вариант оборудования. Настройка режимов работы оборудования при уплотнении грунта и асфальтобетонной смеси осуществляется на основе методических рекомендаций, но учитывая разнообразие конкретных площадок строительства, требуется автоматическая регулировка рабочих режимов.

На сегодняшний день всеми ведущими компаниями, выпускающими вибрационные катки, предлагаются автоматизированные системы управления (АСУ) для своих моделей, грунтовых и асфальтовых. АСУ вибрационных катков реализуют технологию интеллектуального уплотнения (intelligent compaction – IC) посредством автоматической установки скорости катка, частоты и амплитуды вальцов таким образом, чтобы обеспечить оптимальность данных параметров для уплотняемого материала. Имеются предложения АСУ для вибрационных плит зарубежного производства (напр. AMMANN).

Применение АСУ в оборудовании для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей значительно упрощает работу машиниста и позволяет обеспечить заданные параметры качества с максимальной производительностью и минимальными затратами.

Для российской дорожной отрасли наличие предложений АСУ зарубежных компаний не является привлекательным из-за большой стоимости техники с АСУ. Разработки АСУ для дорожных катков российского производства пока не дали положительных результатов. Поэтому разработка АСУ для дорожных катков и других уплотнителей с применением относительно недорогих технических средств автоматизации является актуальной задачей.

Процессы уплотнения различных дорожно-строительных материалов исследовались многими учеными. Имеется значительный объем экспериментальной информации, но применительно к конкретным видам уплотняющего оборудования с целью получения информации для разработки автоматизированной системы управления требуются дополнительные экспериментальные исследования. В Сибирском федеральном университете в течение нескольких лет в инициативном порядке проводится работа по научному направлению «Комплексная автоматизация технологических процессов строительства дорожных покрытий».

Объект исследования – процесс уплотнения грунта вибрационными плитами.

Предмет исследования – закономерности процесса уплотнения дорожно-строительных материалов.

Целью работы является повышение эффективности процесса уплотнения дорожно-строительных материалов вибрационными плитами за счет выбора рациональных режимов работы и автоматического управления.

Для достижения поставленной цели реализованы следующие задачи:

- Изучить рабочий процесс, устройство, исследования вибрационных плит в строительстве. Обосновать пути совершенствования процессов.
- Разработать математическую модель в пространстве состояний процесса уплотнения грунта вибрационной плитой и исследовать в программной среде MATLAB/Simulink.
- Выполнить проектирование ПИД-регулятора системы с объектом высокого порядка.
- Провести экспериментальные исследования процесса уплотнения грунта вибрационной плитой. Разработать рекомендации по совершенствованию.

Научная новизна заключается в подходах к изучению, с использованием актуальных методов и программных комплексов.

1 Состояние вопроса

1.1 Технология уплотнения материалов вибрационными плитами

Виброуплотнение является наиболее эффективным методом для уплотнения несвязных материалов [60]. В ходе вибрирования, частицы материала разъединяются ввиду колебательного движения, вследствие чего между ними уменьшаются силы сцепления и трения, облегчается процесс уплотнения. В случае действия между частицами интенсивных сил сцепления, при вибрировании они не разъединяются, и не реализуется ключевое преимущество данного метода. Таким образом, при уплотнении связных материалов метод вибрирования является малоэффективным.

Среди вибрационных машин для уплотнения грунта выделяют поверхностные вибрационные плиты и катки (прицепные и самоходные).

Присутствует возможность изготовления вибрационных катков с решетчатыми, кулачковыми и гладкими вальцами. Вибрационные катки с решетчатыми вальцами используют для уплотнения мерзлых грунтов, связных грунтов (преимущественно переувлажненных) и техногенных отходов. Использование вибрационных катков с гладкими вальцами эффективно исключительно на несвязных и слабосвязных грунтах с небольшим содержанием глинистых грунтов. Возможно уменьшение массы вибрационного катка по сравнению со статическим катком примерно в пять раз при уплотнении песков, в два раза – при супесях, и всего на 10-30% – суглинков.

Вибрационные плиты представляют собой поверхностные уплотняющие машины в виде жесткого металлического поддона (плиты), на котором располагается центробежный возбудитель колебаний. Вращение эксцентрика обуславливает развитие центробежной силы, под воздействием которой производятся колебания вибрационной плиты.

Поскольку изменение колебаний силы во времени осуществляется по синусоидальному закону, соответственно, рабочим органом поверхностной

вибромашины также должны совершаться гармонические колебания (рисунок 1). Тем не менее, эти колебания ограничиваются поверхностью грунта, которая изменяет их характер. Следует отметить, что эффективность вибрационного уплотнения значительно обуславливается содержанием в грунте глинистых частиц (рисунок 2).

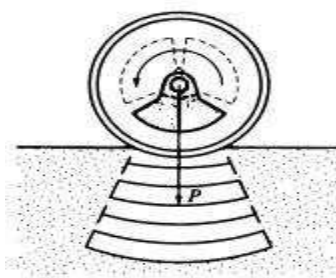


Рисунок 1 – Эпюры напряжения в грунте при его вибрационном уплотнении

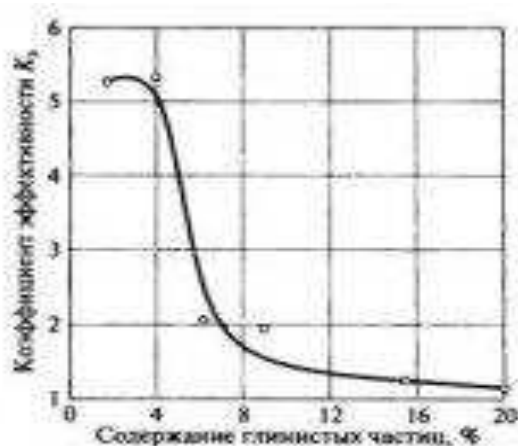


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эффективности от содержания в грунте глинистых частиц

Поверхность контакта между вибрационными плитами и грунтом – это плоскость. Применение вибрационных плит широко распространено при уплотнении как крупнозернистых грунтов и мелкозернистых несвязных. В случае уплотнения грунтов в стесненных условиях производства, при небольших объемах работ, используются легкие вибрационные плиты (рисунок 3).

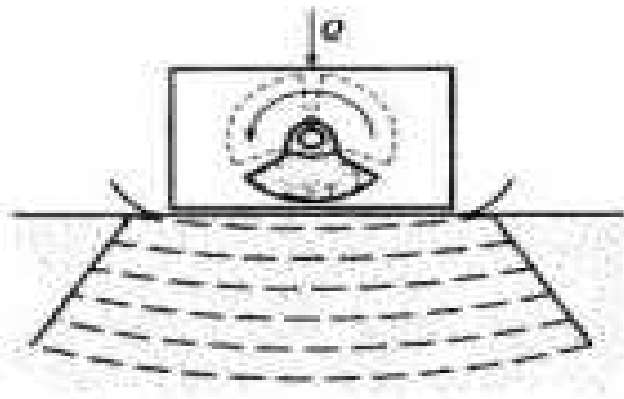


Рисунок 3 – Эпюры напряжений в грунте при использовании вибрационных плит

В ходе уплотнения грунтов посредством вибрирования, масса вальца (плиты) приводится в состояние колебательных движений за счет встроенного в него возбудителя колебаний. В результате, за счет его кинетической энергии последнего, расположенные в зоне контакта частицы грунта вводятся в состояние колебательных движений. Данные частицы оказываются под воздействием инерционных сил, которые пропорциональны их массам. Разность в силах инерции в местах контактов частиц обуславливает возникновение напряжений сдвига, которые уравниваются силами сцепления между частицами до известного предела. После того, как эти пределы превышаются, возникают взаимоперемещения данных частиц. Напряжения сдвига являются пропорциональными инерционным силам, которые определяются массами и ускорениями, развивающимися в ходе колебательных движений вальцов.

Скорость наступления относительных перемещений частиц тем быстрее, чем больше различаются массы отдельных частиц, которые составляют грунт, и чем слабее между ними силы связей. Соответственно, посредством вибрирования хорошо уплотняются слабосвязные и несвязные грунты.

Частицы, которые совершают колебательные движения и находятся под действием сил тяжести, стремятся к занятию положения, соответствующего их наименьшему потенциалу, т.е. перемещаются вниз. При интенсивном

вибрировании в состоянии относительных перемещений находится основная масса частиц грунта. Более крупные частицы перемещаются на большее расстояние, чем обуславливается заполнение межзернового пространства мелкими частицами и уплотнение грунта.

Следует отметить, что на связных грунтах относительного перемещения грунтовых частиц практически не происходит, ввиду чего резко уменьшается эффективность использования на них вибрационных машин.

Для определения характера колебаний рабочего органа вибрационной машины применяется соотношение вынуждающей силы и его массы, а также частоты и свойств уплотняемого грунта. Когда значение вынуждающей силы P значительно ниже массы вибратора Q , для его колебаний свойственен гармонический характер. По мере увеличения отношения P/Q происходит возрастание амплитуды колебаний вибратора. Характер его колебаний пока близок к гармоническому, однако уже наблюдается отрыв рабочего органа от поверхности грунта. В случае очень больших соотношений P/Q , нарушается гармонический характер колебаний машины. Для колебаний при этом характерны периодические удары о поверхность грунта. Удар о грунт может соответствовать двум, трем и более оборотам дебалансного вала. Эти колебания можно назвать ударными, а режим колебаний — виброударным. В этом режиме материалом наряду с вибрационным воздействием воспринимается также ударный импульс. Благодаря виброударному режиму работы предоставляется возможность использования вибрационных машин также для грунтов средней вязкости.

Несмотря на то, что переход на ударные колебания обуславливает снижения числа ударов вибратора о грунт в единицу времени, при этом значительно повышается размах его колебаний в момент удара и интенсивность воздействия вибратора на грунты (в некоторых случаях интенсивность вибрационного воздействия может снижаться). Такая переменная эффективность воздействия вибромашины на грунт может объясняться

зависимостью между характером колебаний и величиной соотношения P/Q (рисунок 4).

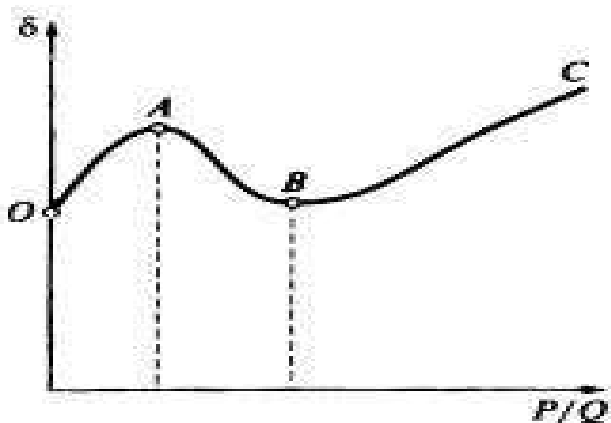


Рисунок 4 – Зависимость плотности грунта от относительного значения возмущающей силы

Участок OA характеризуется гармоническими колебаниями вибратора; благодаря росту вынуждающей силы увеличивается получаемая в итоге плотность грунта. В качестве следствия возрастания амплитуды колебаний грунта и развивающихся при этом инерционных сил выступает рост его плотности. На участке AB гармонический характер колебаний вибратора (плиты, вальца) нарушается. Колебания становятся ударными, однако импульсы ударов, которые возникают при этом, еще малы и не способны компенсировать потери эффекта, связанные со снижением инерционных сил грунта, развивающихся при гармонических колебаниях. На участке BC в ходе последующего увеличения вынуждающей силы, наблюдается интенсификация удара, возрастают контактные давления и развивающиеся напряжения в грунтах. Все это обуславливает постепенный рост эффекта уплотнения.

1.2 Устройство вибрационных плит

В 21 веке прогресс не стоит на месте и инновационные технологии входят во все сферы. Универсальным оборудованием в строительстве является

виброплита. Применение такого рода техники облегчает процесс строительства дорог и уплотнения грунта, сокращает время работы, экономит средства [61].

Машины зачастую используют при небольших объемах работы или небольших площадках. Высокий эффект и качество работы обеспечено тем, что на грунт или асфальт оказывается воздействие массой самой машины, а также вибрациями, благодаря чему достигается максимальная плотность.



Рисунок 5 – Вибрационная плита

Существуют несколько критериев, по которым можно разделить виброплиты на категории. Первый из них, это способ питания. Выделяют:

- бензиновые;
- дизельные;
- электрические виброплиты.

Конечно, каждый тип имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор оборудования зависит от выполняемой работы.

Бензиновая виброплита является наиболее универсальным инструментом. Широкое применение получила за счёт ряда преимуществ: низкая стоимость, компактная и мобильная машина, не требует дорогостоящего обслуживания. Часто используют подобный инструмент при строительстве парковок, дорожек, дворовых территорий. Заправляется агрегат самым обычным бензином АИ-92

или 95. Воздушное охлаждение избавляет от необходимости добавления масел в топливо.

Дизельные виброплиты, как правило, незначительно дороже бензиновых, но стоит учитывать тот факт, что дизель дешевле, чем бензин, поэтому эта разница в цене компенсируется. Также стоит переплатить за мощность и производительность, которые в дизельных аппаратах выше.

Преимуществом электрической виброплиты является то, что она гораздо проще в обслуживании, ремонт такой машины обойдется гораздо дешевле. Но и главный недостаток весомый: постоянная зависимость от электричества. Во-первых, это привязанность к электрической сети. Во-вторых, невысокий уровень безопасности. Также недостатком электрической плиты является фиксированная частота вибраций, которую можно регулировать в жидкотопливных агрегатах.

Виброплиты по принципу работы



Рисунок 6 – Вибрационная плита и вибрационная трамбовка

По принципу работы плиты можно разделить на две категории:

- реверсивные;
- прямоходные.

Реверсивные виброплиты отличаются способностью двигаться одинаково как назад, так и вперед. Это позволяет утрамбовывать грунт даже на самых небольших территориях. Прямоходным же необходимо место для разворота.

Так как при любом строительстве укладка дорожек, асфальта или подготовка площадки ведётся в несколько этапов, вибротрамбовки применяют после насыпания каждого слоя. Вибрации максимально надёжно утрамбовывают грунт и асфальт, повышая плотность. Наиболее актуально применение виброплиты при выравнивании территории, ведь площадку засыпают грунтом, камнями, щебнем, т.е. «пористым» составом, которой обязательно надо утрамбовать для избежания проседания сооружения в будущем.

Даже при больших объёмах строительства используют вибротрамбовки для уплотнения труднодоступных мест, где каток не может выполнить работу достаточно качественно. Для подготовки площадки зачастую используют отбойные молотки.

Вес виброплиты



Рисунок 7 – Вибрационная плита

По такому критерию как масса также можно разделить плиты на категории:

- до 90 кг. Применение виброплит малого веса актуально в домашнем строительстве, обустройстве придворовой территории, в сельском хозяйстве;
- лёгкие плиты до 200 килограмм применяют для укладки асфальта, уплотнения грунтов с крупными камнями, щебнем;

– к средним относят аппараты весом до 500 кг, которые способны повышать плотность грунта и асфальта больших слоёв;

– тяжёлое оборудование используют при необходимости сильного уплотнения.

В зависимости от работы выбирают ту или иную виброплиту. Так, например, машины до 200 кг подойдут для слоя грунта не более 15 сантиметров. Средние и лёгкие машины применяют для уплотнения слоя до 25 сантиметров и утрамбовки тротуарной плитки. Более тяжёлое оборудование применяют для ремонта и укладки дорожного покрытия, засыпки траншей, глубокого уплотнения грунта.

На выбор влияет не только вес машины, но и вибрационное усиление или центробежная сила. Этот показатель является очень важным, так как машины с силой менее 10 кН, например, не подойдут для асфальта. Применение виброплиты с меньшей площадью основания является наиболее частым, так как в таком случае сила удара распределяется равномерно.

Характеристики виброплиты



Рисунок 8 – Вибрационная плита со снятым кожухом

- масса (в килограммах);
- вид двигателя;
- мощность (кВт);

- расход топлива или энергии (литров или кВт в час);
- размеры опорной плиты (указывается ширина и длина в миллиметрах);
- размеры всей машины (в мм);
- частота вибраций (в Гц, может регулироваться во многих машинах);
- амплитуда вибраций (в мм);
- скорость движения (м/мин).

Также в описании или инструкции применения виброплиты можно найти объём топливного бака, уровень вибрации на руки оператора, модель двигателя и так далее.

В зависимости от назначения плиты немного отличается принцип работы. Если агрегат используется для трамбовки асфальта, в машине предусмотрена система подачи воды, чтобы опорная плита (ровная с закругленными краями) не прилипала к рабочей поверхности. Для уплотнения гравия используют более тяжёлые машины с рельефной плитой.

Конструкция виброплит



Рисунок 9 – Конструкция вибрационной плиты

Основной частью и рабочей поверхностью является сама основная плита. Дальнейшая конструкция выстраивается именно по рабочей плите.

Вибровозбудитель приводит плиту в действие. Состоит он из одного или нескольких валов и цилиндрического корпуса. В одновальных конструкциях предусмотрено движение машины только в одном направлении. Двухвальные являются реверсивными. Также к плите крепится моторная рама, на которую устанавливается двигатель. Если машина предназначена для трамбовки асфальта, то конструкция будет дополнена баком с водой.

В большинстве моделей управление выполняется вручную, то есть конструкция предполагает наличие ручки. Чтобы работа была безопасной, а вибрация в руки оператора — безопасной, на ручке обязательно должна быть виброзащитная накладка. Машины без ручки управляются дистанционно.

Виброплита устроена максимально просто и требует должно ухода, потому что работа в экстремальных и сложных условиях может быстро вывести агрегат из строя.

1.3 Навесные экскаваторные вибрационной плиты

При уплотнении грунтов обратных засыпок в траншеях, пазухах фундаментов, вокруг колодцев, над трубопроводами и в других «узких местах» используются навесные экскаваторные виброплиты (НВП), крепящиеся на стрелу экскаватора, что позволяет использовать их для уплотнения грунтов как на горизонтальных, так и на наклонных поверхностях (откосах выемок и насыпей) [51]. Данное оборудование имеет гидравлический привод от гидросистемы экскаватора и реализует круговые колебания с одним или двумя значениями вынуждающей силы.

Известны зависимости от массы для экскаваторных вибрационных плит. Используются обозначения: P – вынуждающее (центробежное) усилие, кН; B – ширина основания НВП, м; L – длина основания НВП, мм; F – частота колебаний, Гц; M – эксплуатационная масса НВП, кг; Msr – усредненная масса экскаватора, т; Q – расход масла, л/мин.

Таблица 1 – Статистические модели для экскаваторных вибрационных плит

Функция	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R ²
$P = f(M)$	$P = 16,326 + 0,0110 * M^{1,281}$	0,699
$F = f(M)$	$F = 46,512 - 0,008 * M$	0,136
$Q = f(M)$	$Q = 26,948 + 0,139 * M$	0,745
$Msr = f(M)$	$Msr = 1,556 + 0,020 * M$	0,583
$L = f(M)$	$L = 582,929 + 1,311 * M^{0,895}$	0,706
$B = f(M)$	$B = -149,727 + 69,764 * M^{0,378}$	0,842
$P/Q = f(M)$	$P/Q = -391,644 + 411,106 * M^{0,004}$	0,0732

Анализ значений вынуждающего усилия НВП в зависимости от их массы (рисунок 10) показывает, что вынуждающее усилие P вибровозбудителя НВП примерно в 10 раз превышает её вес Q .

Это свидетельствует о том, что в процессе работы основание виброплиты периодически должно терять контакт с грунтом, а затем снова его восстанавливать, причем длительность периода потери контакта с грунтом, скорость НВП в момент восстановления контакта и количество оборотов, совершаемых валом вибровозбудителя в процессе потери контакта (кратность колебаний) будут зависеть от массы верхней и нижней частей НВП, количества и характеристик связывающих их амортизаторов, частоты и вынуждающего усилия вибровозбудителя, прижимного усилия стрелы экскаватора и свойств грунта.

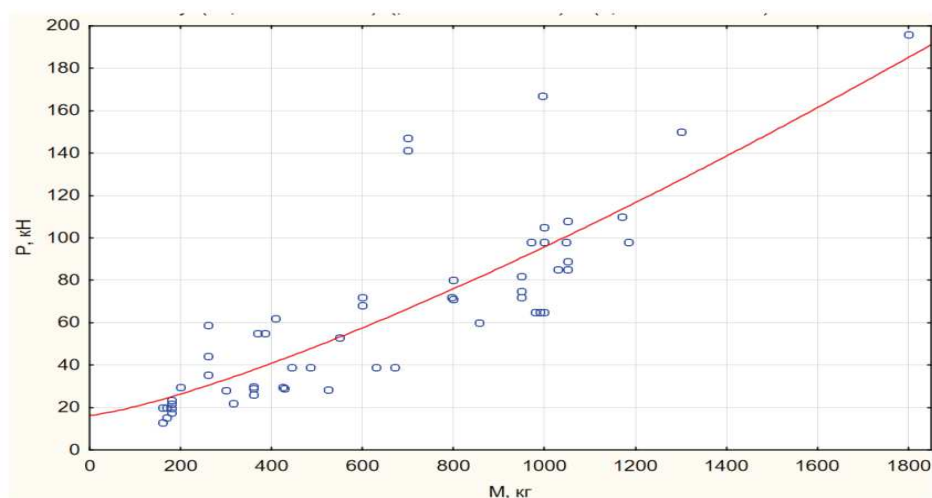


Рисунок 10 – Результаты обработки значений вынуждающего усилия для различных масс НВП

Если рассматривать не абсолютное, а относительное вынуждающее усилие, рассчитываемое как отношение вынуждающего усилия к весу НВП, то диапазон значений относительного вынуждающего усилия для НВП составляет в основном $P/Q = 6...18$ (рисунок 2) ($P/Q = 4...23$ по граничным точкам диапазона), что в среднем несколько меньше значений относительного вынуждающего усилия для самоходных виброплит $P/Q = 10...20$ [50] ($P/Q = 10...22$ по данным [38] и $P/Q = 16...24$ по данным [20]), но больше соответствующих значений для вибрационных катков $P/Q = 2...5,5$ [49].

Таким образом, режим работы НВП ближе к режиму работы самоходных виброплит, чем к вибрационным каткам. В то же время возможность дополнительного пригруза НВП стрелой экскаватора создает условия, препятствующие отрыву основания НВП от грунта. Это создает предпосылки для возможности применения известной [48; 62] классификации режимов работы вибрационных катков [постоянный контакт (двойной прыжок (double jump), частичный отрыв (partial uplift), continuous contact) и др.] и для НВП.

Однако условия перехода НВП в различные режимы колебаний требуют дополнительных исследований. Вышеуказанные соображения позволяют сделать вывод о необходимости учета возможности работы НВП в отрывных режимах при разработке математической модели взаимодействия НВП с уплотняемым грунтом, в то время как многие исследователи рассматривают безотрывный режим [20; 26; 37; 47; 41].

Анализ частоты колебаний виброплит в зависимости от их массы (рисунок 3) характеризуется очень низким значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,136$ (таблица 1).

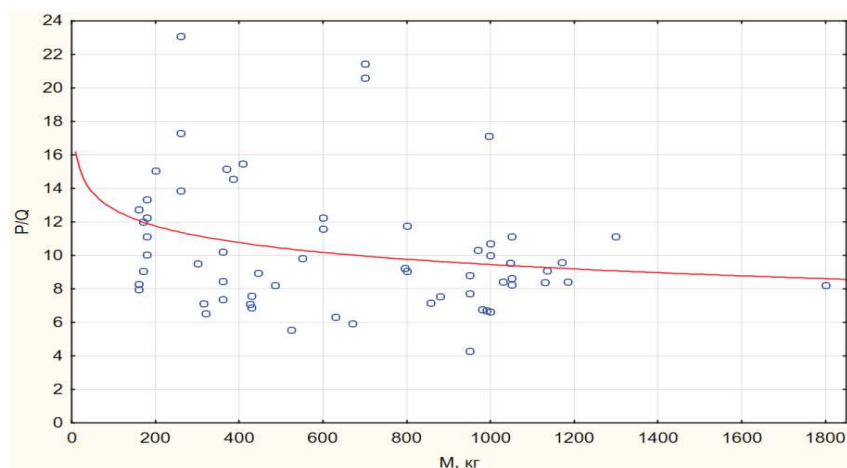


Рисунок 11 – Результаты обработки значений относительного вынуждающего усилия для различных масс НВП

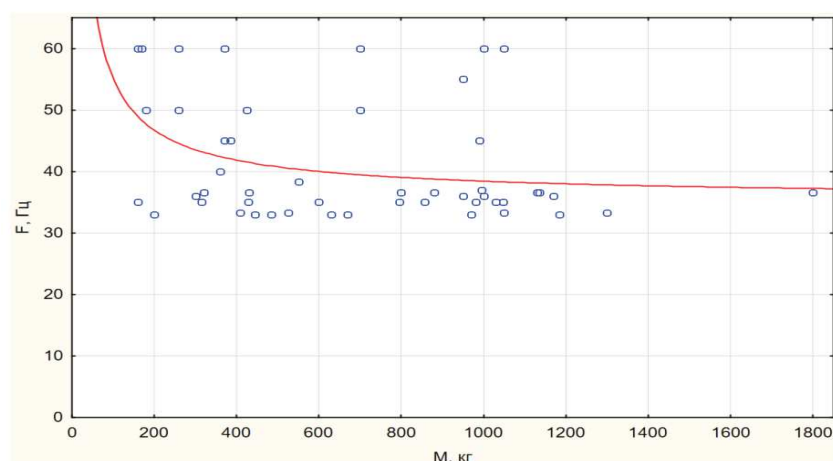


Рисунок 12 – Результаты обработки значений частоты колебаний НВП для различных масс НВП

Частота колебаний, как и относительное вынуждающее усилие, является одним из главных технических характеристик НВП. Однако отсутствие как у отечественных, так и у зарубежных производителей методики оценки влияния технических характеристик НВП на результаты уплотнения грунта в конкретных технологических условиях не позволяет обосновать рациональные значения этих параметров, что отражается в низком значении коэффициента детерминации этих параметров от массы НВП. В то же время наблюдается некоторое предпочтение производителей НВП диапазону частот 30...40 Гц. При этом диапазон частот колебаний НВП находится несколько ниже

диапазона частот колебаний самоходных виброплит (50...100 Гц) [50], но несколько выше диапазона частот колебаний вибрационных катков (25...40 Гц) [38]. Данные результаты также подтверждают позиционирование НВП по режимам работы между самоходными виброплитами и вибрационными катками, что позволяет использовать для разработки математической модели уплотнения грунта при помощи НВП подходы, применяемые как для вибрационных катков [52], так и для самоходных виброплит [53].

Имеющиеся регрессионные зависимости вынуждающего усилия и частоты колебаний НВП, а также размеров основания НВП, массы экскаватора и требуемого расхода масла для работы НВП должны учитываться при разработке методики определения результатов уплотнения НВП грунта в конкретных технологических условиях, а также могут быть использованы производителями при проектировании и модернизации конструкций НВП.

1.4 Анализ теоретических исследований вибрационного процесса уплотнения материалов

Классификация виброплит осуществляется по следующим основным параметрам: общей массе, величине возмущающей силы вибратора, типу привода, наличию реверсивного передвижения. В качестве наиболее распространенных следует выделить бензиновые нереверсируемые виброплиты, которые перемещаются исключительно вперед. Существуют виброплиты и с дизельным двигателем.

В настоящее время на отечественном рынке представлен достаточно широкий ассортимент бензиновых нереверсируемых вибрационных плит: ТЕС (Чехия), Wacker Neuson (Германия), Weber (Германия), BOMAG (Германия), ПВ (Россия), Дунарас (Швеция), Plato (Китай), Splitstone (Россия), Top Machine (Китай), Champion (Китай), GROST (Россия), СО (Беларусь).

Следует отметить, что в СССР многие учёные исследовали технологические процессы строительства асфальтобетонных покрытий,

вопросы вибрационного перемещения, проектирования новых конструкций дорожной вибрационной уплотнительной техники.

Огромный вклад в область основ вибрационного перемещения и вибрационной уплотнительной техники был внесен благодаря исследованиям следующих отечественных учёных: А.А. Шестопапов, Н.Я. Харкута, М.П. Зубанов, И.И. Блехман, А.Я. Башкарёв, Д.Д. Баркан и пр. [59; 57; 56; 5; 3]. Среди зарубежных исследователей следует выделить труды по вибрационному уплотнению грунтов S. Xu, S. Ryan, A. Jonsson и C. Adam [73; 72; 68; 63]. Колоссальная работа в изучении вибрации и вопросов вибрационного демпфирования была проделана британским учёным C. F. Beards [67].

Теоретические и эмпирические зависимости, полученные указанными авторами, представляют собой хороший фундамент для последующего успешного исследования этой отрасли. В работе китайских учёных Zhongxi Feng и Yunshi Yao [74] нашёл отражение новый принцип разработки вальца катка на основе двойной частоты. Устанавливаемым на валец двухчастотным вибратором обеспечивается дополнительный компонент резонансной частоты в процессе уплотнения.

Учёными K. Kaufmann и R. Anderegg [65; 64] проведены исследования различных режимов вибраций во время уплотнения. Ими созданы системы управления с обратной связью в автоматическом уплотнении и контроле уплотнением.

Кроме того, следует выделить отечественных исследователей, которые занимаются предложением и разработкой новых устройств для уплотнения. В частности, Е.А. Безбородов, Е.И. Кромский и О.А. Ефимов [28] предложили уплотняющую машину для реализации более эффективного технологического процесса, применяющего преимущественно сдвиговые деформации уплотняемого материала при малых усилиях сжатия.

Е.И. Кромский и Е.Р. Маньков [28] разработали технические предложения, направленные на расширение потребительских свойств малогабаритных погрузчиков посредством нового навесного оборудования

(секционная виброплита), которое может применяться для уплотнения разных дорожно-строительных материалов.

В проведенных Л.И. Гендлиной, С.Я. Левенсоном и Ю.И. Еременко [16] исследованиях проанализирован новый способ нагружения дисперсного материала, предоставляющий принципиальную возможность получения высоких показателей уплотнения в течение одного захода оборудования. А.Ф. Иткин и А.Г. Маслов [36] в своих исследованиях поспособствовали развитию теории вибрационного уплотнения цементобетонных смесей, что послужило основой к созданию целого ряда двухчастотных виброплощадок с пространственными колебаниями.

Учёными Б.В. Лушниковым, А.С. Федоренко и И.Я. Федоренко [32; 54] внесен свой вклад в исследование движения в системах с сухим вибропреобразованным трением. Такие учёные как Н.Г. Малич и В.С. Блохин занимались изучением особенностей уплотнения среды вальцами катков [35]. В качестве результата проведенных ими работ выступило выделение зависимости между толщиной уплотняемого слоя и размерами площадки контакта. В работах В.В. Дубкова, В.С. Серебренникова и В.В. Пермякова [44; 43; 42] приведено аналитическое описание процесса уплотнения посредством вибрационного катка асфальтобетонной смеси.

Г.Г. Бурый и С.В. Савельев [7; 8; 9; 10; 11; 12] рассмотрели проблемы распространения по толщине грунтового слоя волн от вальца вибрационного катка, а также инновационное устройство контроля за качеством уплотнения грунта посредством дорожных катков. В.Н. Богомаз и К.Ц. Главицкий [17] рассматривали модернизацию катков динамического и статического действия. Указанными исследователями была предложена конструкция виброконтура для интенсификации работы уплотняющих машин каткового типа. В.П. Ложечко и А.А. Шестопапов предложили технологию уплотнения горячих асфальтобетонных смесей укаткой с одновременным вакуумированием. Данная технология выступила в качестве основы для разработки новых рабочих

органов к асфальтоукладчику, дорожным каткам, иным машинам, а также средства контроля за качеством осуществляемых работ [29; 30; 58].

Профессорско-преподавательский состав БГТУ, МАДИ, ВГАСУ, СПбГАСУ, СибАДИ, СФУ, СПбПУ, ЯГТУ и специалисты ЗАО «ПО «Ирмаш» (г. Брянск), ЗАО СоюзДорНИИ (г. Москва), ОАО «Раскат» (г. Рыбинск), ООО «Завод ДМ» (г. Москва), ООО «Завод Дорожных машин» (г. Рыбинск), занимаются изучением процессов взаимодействия вальцов дорожных машин с уплотняемым материалом, а также разработкой новых и совершенствованием существующих конструкций малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнителей. При этом стоит отметить, что недостаточной изученностью процесса вибрационного перемещения ограничивается возможность проектирования более совершенных новых малых средств механизации.

Несмотря на всю кажущуюся простоту принципа вибрационного передвижения, его описание представляет собой достаточно сложную математическую задачу из области нелинейных колебаний, что обуславливается, в первую очередь, наличием сил сухого трения.

В течение многих лет конструирование осуществлялось на основе данных, которые были получены в результате эксплуатации аналогичных машин зарубежного и отечественного производства [5]. Изучение данного вопроса продемонстрировало, что вопрос теоретического обоснования движения виброплит исследовался лишь немногими учёными. Следует отдельно выделить работы А.И. Новожилова [39; 40], в которых исследователем рассматриваются режимы работы виброплиты – вибротрамбование и вибрирование. Основательная экспериментальная проверка проведённых теоретических исследований продемонстрировала, что виброплита наиболее устойчиво работает в режиме вибрирования, когда её возмущающая сила меньше по сравнению с весом. Д.Д. Барканом рассматривался вопрос передвижения самоходных вибрационных плит. Для расчёта вертикальных колебаний в своей работе [4] он использовал методику

исследования вибромолотов и принимал во внимание влияние безинерционной пригрузки.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали, что скорость передвижения пропорциональна кинетическому моменту эксцентриков, рабочей частоте и обратно пропорциональна весу виброплиты. Автором предлагается избегать создания виброплит с большими скоростями передвижения, поскольку это приводит к росту числа проходов по одному месту для достижения высокой степени уплотнения. Аналогичной теме посвящалась работа И.И. Блехмана и Г.Ю. Джанелидзе [6], в которой авторами было предложено использование аналогии между задачами о движении вибрационного уплотнителя и движения твёрдой частицы по вибрирующей шероховатой поверхности, что предоставило возможность получения дифференциальных уравнений движения самоходной виброплиты.

2 Теоретические исследования

Рассмотрен подход к моделированию процесса вибрационного уплотнения дорожно-строительной смеси при проектировании систем управления объектами высокого порядка. Для учета динамики технологического процесса объекта используется метод пространства состояний. Определена математическая модель на примере трехмассовой системы вибрационной плиты асфальтоукладчика.

При математическом моделировании для рассматриваемого рабочего процесса вибрационная плита представляет собой сложную динамическую систему, на которую действуют управляющие и возмущающие внешние воздействия, имеющие стохастическую природу.

2.1 Математическая модель в пространстве состояний процесса уплотнения материала виброплитой

Применение метода пространства состояний позволяет осуществить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур [27].

Вибрационная плита обеспечивает улучшение структуры дорожного покрытия и фиксацию достигнутой степени уплотнения покрытия. Процесс уплотнения смеси выполняется с постоянным контактом вибрационной плиты со смесью.

Основными динамическими параметрами колебаний плиты и частиц уплотняемой среды являются частота, амплитуда, скорость, ускорение. Амплитуда колебаний любого уплотнителя зависит от физико-механических характеристик 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 [55].

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 [57], т.е.

$$\sigma_m < \sigma_k \leq [\sigma_{np}], \quad (2.1)$$

где σ_T – предел текучести уплотняемого материала;

σ_{np} – предел прочности уплотняемого материала;

σ_k – величина контактных напряжений в течение процесса уплотнения;

$$\sigma_k = (0,95-0,98) \sigma_{np}.$$

При разработке математической модели процесса уплотнения приняты следующие допущения:

- элементы конструкции машины имеют абсолютную жесткость;
- уплотняющий вибрационный агрегат укладчика работает в безударном режиме с колебаниями гармонического характера;
- уплотняемый слой обладает упруго-вязкими свойствами;
- упруго-вязкие свойства амортизаторов линейны;
- рассматривается только вертикальная составляющая вибрации;
- учитываются инерционные свойства уплотняемой среды.

Динамическая модель взаимодействия вибрационной плиты со смесью представлена на рисунке 13. Полученная модель позволяет выйти на определение амплитуды колебаний вальца и динамических параметров уплотнения среды.

На рисунке 13 использованы следующие обозначения:

m_p – масса вибрационной плиты, кг;

m_f – масса рамы, кг;

F_e – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н;

m_s – масса уплотняемой среды под вибрационной плитой, кг;
 k_s – коэффициент упругого сопротивления уплотняемой среды под плитой, Н/м;
 c_s – коэффициент демпфирования уплотняемой среды под плитой, Н с/м;
 k_f – коэффициент упругого сопротивления амортизаторов, Н/м;
 c_f – коэффициент демпфирования амортизаторов вибратора, Н с/м;
 z_s, z_p, z_f – перемещение элементов рабочего органа, соответственно, м.

Для теоретического описания уплотняемой среды используется упруго-вязкая модель Кельвина-Фойгта.

В результате анализа процесса уплотнения смеси вибрационным рабочим органом укладчика (рисунок 14) составлена математическая модель, которая отражает одновременно как динамику колебаний элементов конструкции, так и реологические свойства уплотняемой среды.

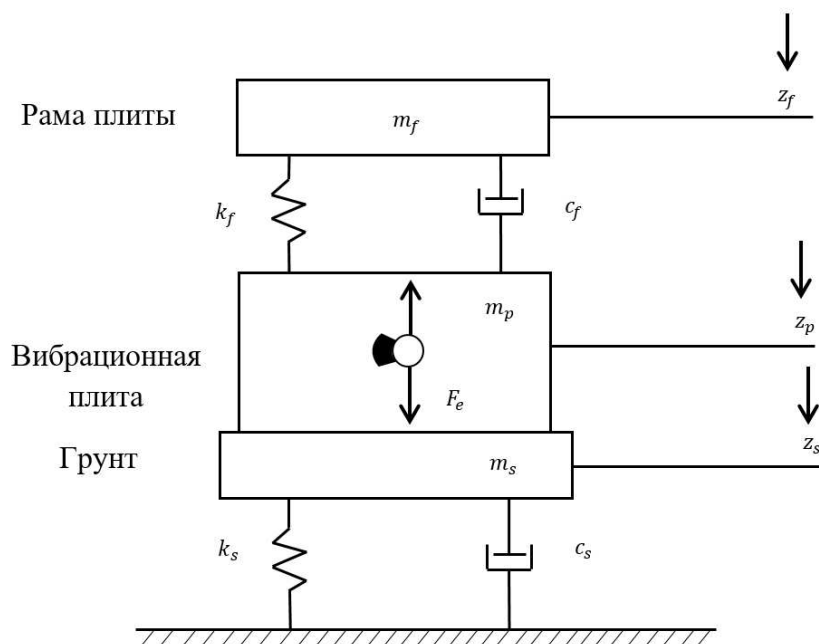


Рисунок 13 – Динамическая модель взаимодействия вибрационной плиты с грунтом

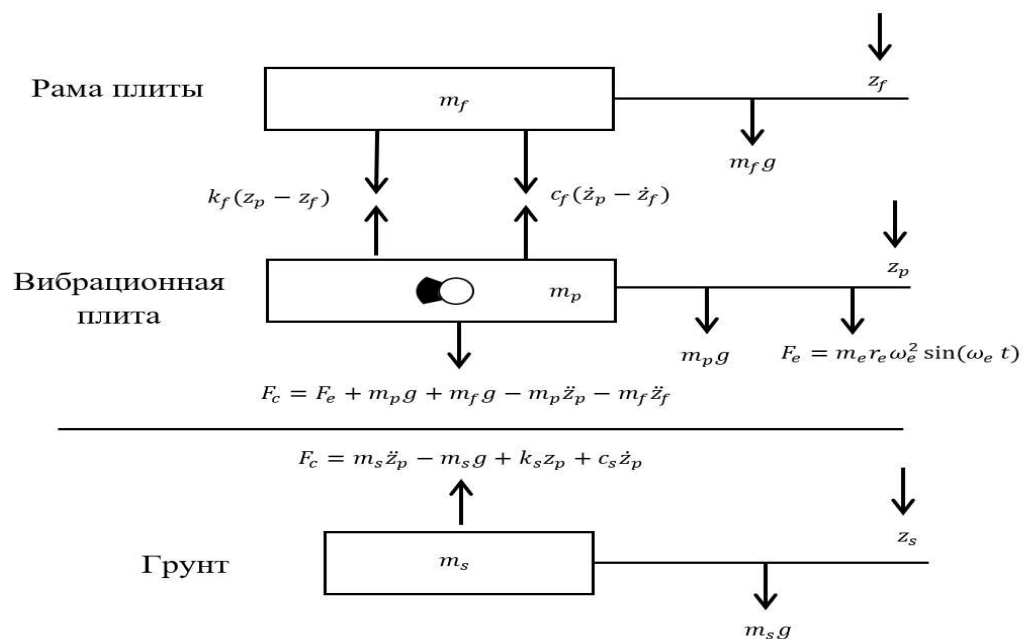


Рисунок 14 – Расчетная схема модели процесса уплотнения грунта

Получена система дифференциальных уравнений описывающая движение уплотняющих агрегатов колебательной системы «вибрационная плита – смесь»:

$$\begin{cases} (m_s + m_p) \cdot \ddot{z}_p + c_s \cdot \dot{z}_p + k_s \cdot z_p + c_f \cdot (\dot{z}_p - \dot{z}_f) + k_f \cdot (z_p - z_f) = \\ = (m_s + m_p) \cdot g + m_e \cdot r_e \cdot \omega_e^2 \cdot \sin(\omega_e \cdot t), \\ m_f \cdot \ddot{z}_f - c_f \cdot (\dot{z}_p - \dot{z}_f) - k_f \cdot (z_p - z_f) = m_f \cdot g, \\ \dot{z}_p = \dot{z}_s; z_p = z_s, \end{cases} \quad (2.2)$$

где m_e – масса дебалансного вала, кг;

r_e – радиус эксцентриситета дебалансного вала, м;

ω_e – угловая частота вращения дебалансного вала вибратора, рад/с,

$\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f$;

f – частота колебаний дебалансного вала, Гц;

t – время, с.

Начальные условия:

$$e = 0, \dot{z}_p = \dot{z}_s = 0, z_p = z_s = 0. \quad (2.3)$$

Метод пространства состояний позволяет представлять систему управления в виде системы уравнений [27; 69]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t), \\ y(t) &= C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $x(t)$ – 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 ($r \times n$),

r – число воздействий;

$u(t)$ – вектор входа, компонентами которого являются входные переменные системы;

$C(t)$ – матрица выхода ($n \times p$), p – число выходных величин;

$D(t)$ – матрица обхода, определяющая прямую зависимость выхода от входа.

Параметры состояния динамической системы (переменные состояний) определены следующим образом: x_1 – вертикальное перемещение вибрационной плиты, $x_1 = z_p$; x_2 – скорость вертикального движения вибрационной плиты, $x_2 = \dot{z}_p$; x_3 – вертикальное перемещение рамы, $x_3 = z_f$; x_4 – скорость вертикального движения рамы, $x_4 = \dot{z}_f$.

Система уравнений (2.5) после преобразований с учетом принятых параметров состояния в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2, \\
\dot{x}_2 &= \frac{1}{m_s + m_p} \cdot \left[-c_s \cdot x_2 - k_s \cdot x_1 - c_f \cdot (x_2 - x_4) - k_f \cdot (x_1 - x_3) + \right. \\
&\quad \left. + (m_s + m_p) \cdot g + m_e \cdot r_e \cdot \omega_e^2 \cdot \sin(\omega_e \cdot t) \right], \\
\dot{x}_3 &= x_4, \\
\dot{x}_4 &= \frac{1}{m_f} \cdot (c_f \cdot (x_2 - x_4) + k_f \cdot (x_1 - x_3) + m_f \cdot g).
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Перемещение этих параметров в соответствующие векторы и матрицы позволяют получить следующие части модели в пространстве состояний:

$$\dot{X} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3 \quad \dot{x}_4]^T, X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T, \tag{2.6}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s + k_f}{m_p + m_s} & -\frac{c_s + c_f}{m_p + m_s} & \frac{k_f}{m_p + m_s} & \frac{c_f}{m_p + m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_f}{m_f} & \frac{c_f}{m_f} & -\frac{k_f}{m_f} & -\frac{c_f}{m_f} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_f} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_p + m_s} \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{2.8}$$

вектор входа (U)

$$U = \begin{bmatrix} m_e \cdot r_e \cdot \omega_e^2 \cdot \sin(\omega_e \cdot t) + (m_p + m_s) \cdot g \\ m_f \cdot g \end{bmatrix}. \tag{2.9}$$

2.2 Моделирование процесса с использованием программы MATLAB/Simulink

Исследование математической модели. Для оценки адекватности математической модели процесса выполнены вычисления в программе MATLAB. Для моделирования процесса использованы исходные данные:

$$k_s = 60 \cdot 10^6 \text{ Н / м}; k_f = 3.2 \cdot 10^6 \text{ Н / м}; c_s = 2026 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с / м}; c_f = 96 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с / м};$$

$$m_p = 16 \cdot 10^3 \text{ кг}; m_f = 32 \cdot 10^3 \text{ кг}; m_s = 0.4 \cdot m_p \text{ кг}; m_e = 32 \text{ кг} \cdot \text{м}; \omega = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \text{ рад / с}; f = 27 \text{ Гц}.$$

Имитационная модель процесса представлена на рисунке 15.

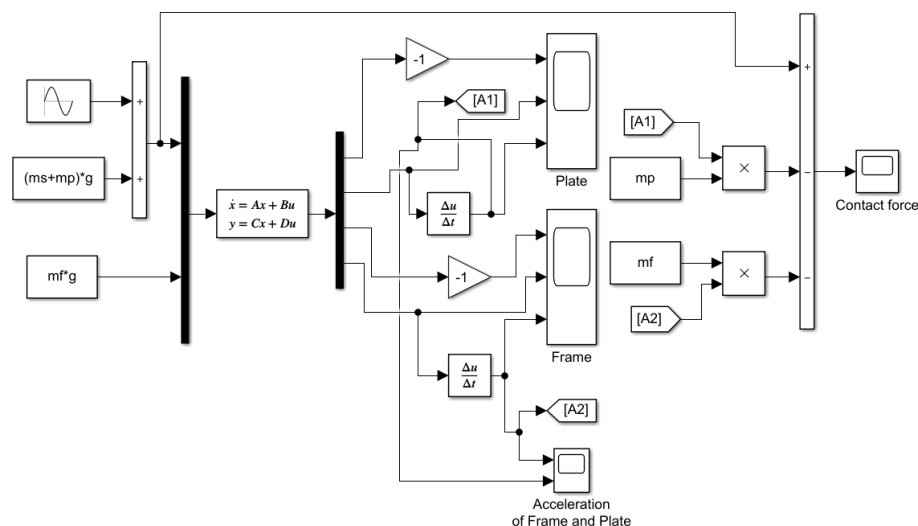


Рисунок 15 – Имитационная модель исследуемого процесса на языке MATLAB/Simulink

В результате компьютерного моделирования получены временные зависимости параметров процесса уплотнения материала вибрационной плитой, рисунок 16, рисунок 17, рисунок 18, рисунок 19.

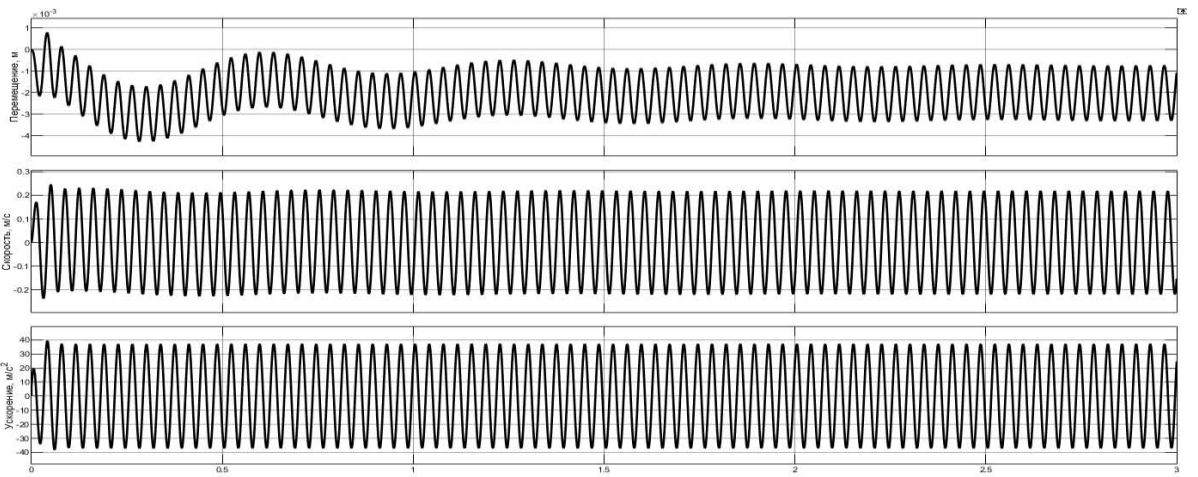


Рисунок 16 – Временные зависимости параметров колебательного процесса
вибрационной плиты

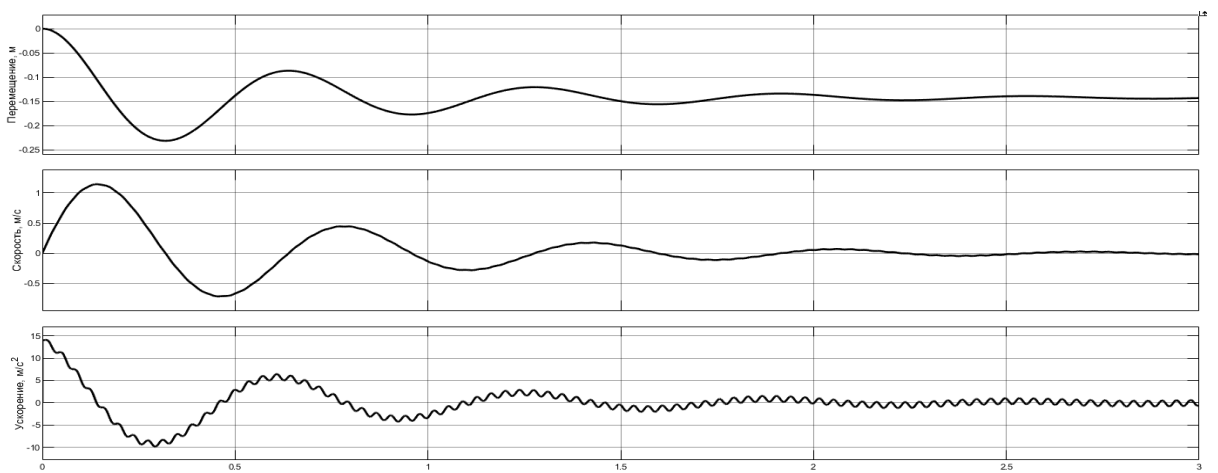


Рисунок 17 – Временные зависимости параметров колебательного процесса
рамы

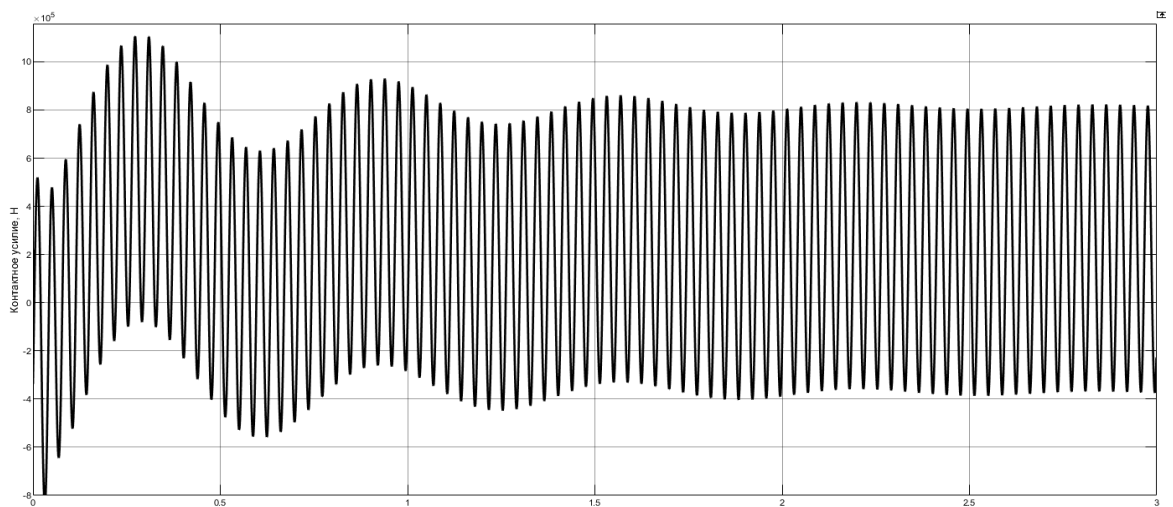


Рисунок 18 – Временная зависимость контактного усилия

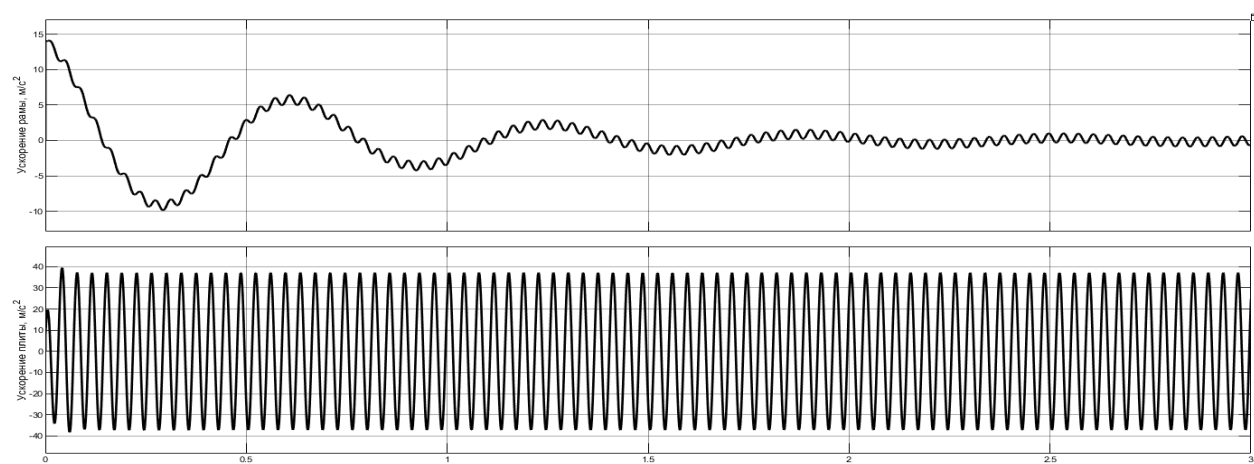


Рисунок 19 – Временные зависимости ускорения вибрационной плиты и рамы

Результаты моделирования показали хорошую воспроизводимость процесса по параметрам функциональных зависимостей перемещения, скорости, ускорения плиты и рамы, контактного усилия плиты с учетом массы уплотняемой среды.

Получена математическая модель вибрационного процесса уплотнения дорожно-строительного материала в пространстве состояний. Имитационная модель на языке программы MATLAB/Simulink позволяет исследовать влияние переменных факторов системы «вибрационная плита - среда» на перемещение, скорость, ускорение элементов конструкции при уплотнении смеси. Имеется возможность определения контактного усилия на уплотняемую среду при колебаниях вибрационной плиты. Данные о ускорении вибрационной плиты могут быть использованы для анализа уплотняющей способности при непрерывном контроле и управлении процесса уплотнения. Результаты работы являются этапом научных исследований в области автоматизации процессов уплотнения вибрационными плитами.

Передаточная функция

Устойчивость системы управления связана со способностью системы к возвращению в состояние равновесия после исчезновения внешних сил, выведших её из такого состояния.

Строго линейной не является ни одна из реальных систем автоматического управления. Для получения линейных уравнений САУ

используется специальная процедура – линеаризация. В теоремах А.М. Ляпунова [34; 46, с. 7-8] содержится обоснование законности подобной линеаризации:

– в случае наличия в характеристическом уравнении линеаризованной системы всех корней с отрицательными вещественными частями, это свидетельствует об устойчивости реальной системы. Иными словами, в этом случае малые нелинейные члены не способны к нарушению устойчивости системы;

– в случае наличия в характеристическом уравнении линеаризованной системы хотя бы одного корня с положительной вещественной частью, это свидетельствует о неустойчивости реальной системы. Иными словами, малые нелинейные члены не способны сделать её устойчивой;

– в случае наличия нулевых и чисто мнимых корней, это свидетельствует о нахождении системы на границе устойчивости. В таком случае поведение реальной системы не всегда даже качественно обуславливается её линеаризованными уравнениями. При этом даже у малых нелинейных членов присутствует возможность кардинального изменения вида переходного процесса, сделав систему неустойчивой или устойчивой.

В качестве необходимого, но недостаточного условия устойчивости системы выступает положительность всех коэффициентов характеристического уравнения. Оно является достаточным исключительно для уравнений первого и второго порядков.

Если разомкнутая система автоматического управления устойчивая, $k = 0$, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы при изменении ω от 0 до $+\infty$ не охватывала точку с координатами $[-1; j0]$

Понятие передаточная функция является наиболее важной категорией в теории автоматического управления и регулирования. Передаточная функция является своего рода математической моделью САУ, т.к. полностью характеризует динамические свойства системы.

Передаточной функцией называется отношение изображения по Лапласу выходного сигнала $X(s)$ к изображению по Лапласу входного воздействия $F(s)$ при нулевых начальных условиях, при этом оператор s равен оператору дифференцирования p , тогда:

$$W(s) = \frac{X(s)}{F(s)}, \quad (2.10)$$

где s – комплексный аргумент.

Преобразуя дифференциальное уравнение при нулевых начальных условиях, заменяя d/dt на s , получим алгебраическое уравнение для изображений:

$$A(s)X(s) = B(s)F(s). \quad (2.11)$$

Отсюда следует, что передаточная функция легко записывается по дифференциальному уравнению:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (2.12)$$

И, наоборот, по передаточной функции записывается дифференциальное уравнение.

Передаточная функция является дробно-рациональной функцией комплексной переменной, формула (2.13):

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 s^m + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + \dots + a_{n-1} s + a_n}. \quad (2.13)$$

Передаточная функция имеет порядок, который определяется порядком полинома знаменателя n . Из уравнения следует, что изображение выходного сигнала можно найти как $X(s) = W(s) \cdot F(s)$.

Для проведения исследований модели с учетом алгоритма проектирования САУ с применением программных средств блочного моделирования, выполнена задача определения передаточной функции.

Использованы команды программы MATLAB

```
sys=ss(A,B,C,D)
```

```
sys1=tf(sys)
```

В результате реализации команд MATLAB получены передаточные функции по входу с регулируемой переменной – угловой частотой вибрации:

ПФ регулируемой величины – перемещение вибрационной плиты, формула (2.14):

$$W(s) = \frac{3,125 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 9,375 \cdot 10^{-5} \cdot s + 0,003125}{s^4 + 97,73 \cdot s^3 + 1,391 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 4,922 \cdot 10^4 \cdot s + 1,339 \cdot 10^6}, \quad (2.14)$$

ПФ регулируемой величины – скорость вибрационной плиты, формула (2.15):

$$W(s) = \frac{3,125 \cdot 10^{-5} \cdot s^3 + 9,375 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 0,003125 \cdot s}{s^4 + 97,73 \cdot s^3 + 1,391 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 4,922 \cdot 10^4 \cdot s + 1,339 \cdot 10^6}. \quad (2.15)$$

Полученные ПФ соответствуют строго правильному виду, так как степень числителя меньше степени знаменателя.

3 Проектирование системы управления

3.1 Типовые автоматические регуляторы

Многочисленные источники технической и научной литературы предоставляют возможность выделения следующих методов синтеза ПИД-регуляторов: эмпирическая настройка; производные методы [18]; методы Зиглера-Никольса [36]; методы модального синтеза; алгебраические методы; методы оптимального синтеза; методы синтеза в частотной области; метод оптимальной ПФ замкнутой системы (симметричный и технический оптимумы). Ключевые тенденции, характерные для развития методов синтеза ПИ- и ПИД-регуляторов описаны в книге Aidan O'Dwyer, 2006 [70] (443 метода синтеза ПИД-регуляторов) и Aidan O'Dwyer, 2009 [71] (1731 метод синтеза ПИД-регуляторов).

Модальный метод является одним из активно развиваемых учеными методов синтеза ПИД-регуляторов [13]. В посвященных синтезу регуляторов научных работах отсутствуют соотношения, которые связывают значения переходной характеристики и коэффициентов объекта управления с учетом расположения действительных полюсов.

При теоретическом описании мобильных, строительных и дорожных, дорожно-строительных машин как объектов управления наиболее распространенными являются математические модели второго и более высокого порядка [13; 15; 31; 55; 70].

Наряду с требованиями устойчивости процессов регулирования, для работоспособности системы автоматического регулирования (САР) необходимо осуществление процесса автоматического регулирования при обеспечении определенных показателей качества процесса управления.

В случае устойчивости исследуемой САР, появляется вопрос о том, насколько качественно осуществляется регулирование в данной системе и соответствует ли оно технологическим требованиям объекта управления.

Одной из динамических характеристик объекта управления является его переходная характеристика - реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие (рисунок 6).

В качестве прямых показателей качества процесса управления, определяемых непосредственно по переходной характеристике, выступают:

- установившееся значение выходной величины $Y_{уст}$;
- степень затухания;
- время достижения первого максимума T_p ;
- время установления (регулирования) T_a ;
- ошибка регулирования $E_{ст}$ (среднеквадратическая или статистическая составляющие);
- перерегулирование u .

В частности, снятая на объекте управления при отработке ступенчатого воздействия переходная характеристика имеет колебательный вид (рисунок 20).

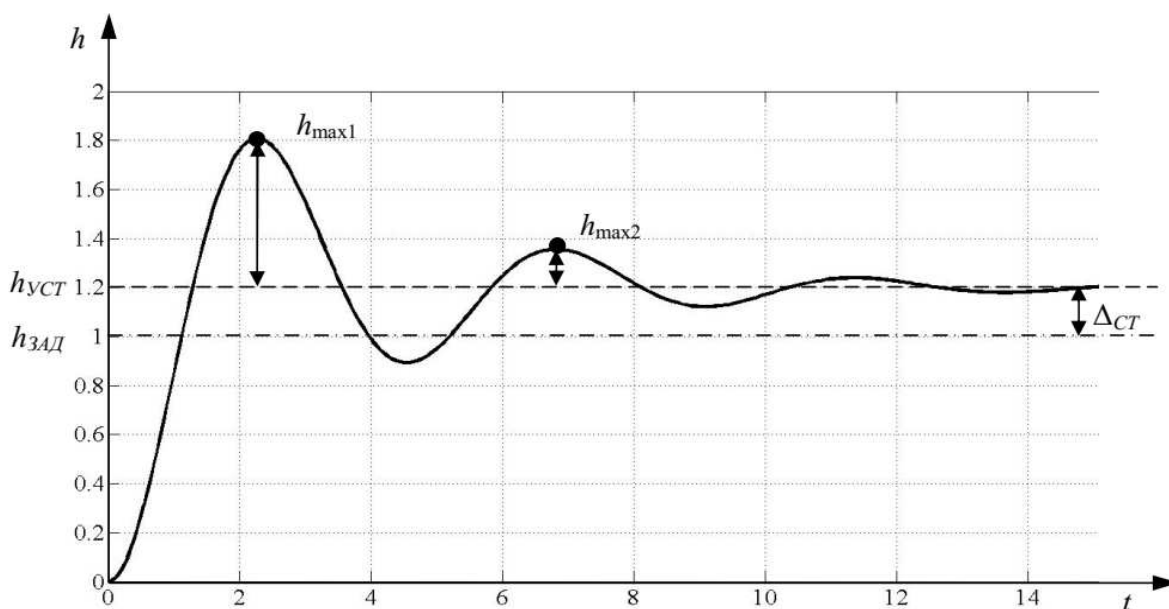


Рисунок 20 – Определение колебательности, перерегулирования и статической ошибки

Необходимо выбирать настройки регулятора, обеспечивающие минимально возможное значение общего времени регулирования или минимальное значение первой полуволны переходного процесса.

В непрерывных системах с типовыми регуляторами это время бывает минимальным при т. н. оптимальных апериодических переходных процессах. Для достижения последующего уменьшения времени регулирования до абсолютного минимума применяют специальные оптимальные по быстродействию системы регулирования.

а) Ошибка регулирования E_{cm} (статистическая или среднеквадратическая составляющие).

Статическая ошибка регулирования $E_{cm} = Y_{в} - Y_{уст}$, где $Y_{в}$ – входная величина. В некоторых САР наблюдается ошибка, не исчезающая даже после истечения длительного временного интервала. Речь идет о статической ошибке регулирования E_{cm} . Данная ошибка не должна превышать некоторой наперед заданной величины. У регуляторов с интегральной составляющей ошибки в установившемся состоянии теоретически равны нулю, однако возможно существование практически незначительных ошибок, обусловленных наличием в элементах системы зон нечувствительности.

б) Перерегулирование y .

Величина перерегулирования y обуславливается видом обрабатываемого сигнала. При отработке ступенчатого воздействия величина перерегулирования y определяется по формуле:

$$y = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} 100\%. \quad (3.1)$$

в) Степень затухания – есть величина, характеризующая затухание переходного процесса регулирования, равная отношению разности двух соседних амплитуд колебания (направленных в одну сторону) к первой из них.

Таким образом, реакцию системы на ступенчатое воздействие можно охарактеризовать двумя факторами:

- быстродействием, которое определяется временем нарастания и временем максимума;
- близостью к желаемому виду, которая определяется перерегулированием и временем регулирования.

По своей сути эти факторы являются противоречащими друг другу, что заставляет искать определенный компромисс.

3.2 Методика синтеза ПИД-регулятора системы высокого порядка

Объект исследования: система управления с обратной связью, с передаточной функцией ОУ выше второго порядка (рисунок 21).

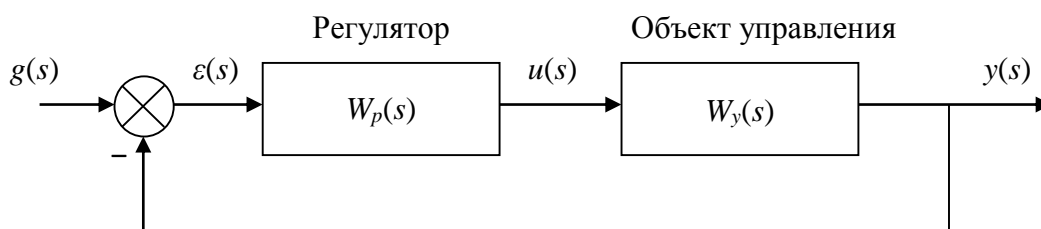


Рисунок 21 – Структурная схема системы управления

Где $W_y(s)$ – передаточная функция объекта регулирования; $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора; $g(s)$ – задающее воздействие; $\varepsilon(s)$ – ошибка регулирования; $u(s)$ – управляющее воздействие; $y(s)$ – выходная регулируемая переменная.

Известна методика синтеза параметров ПИД-регулятора (K_p , K_i , K_d) для замкнутой системы с объектом регулирования второго порядка [75].

$$W_0(s) = \frac{b_0}{a_0 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_2}, \quad (3.2)$$

и передаточной функцией ПИД-регулятора

$$W_y(s) = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s}. \quad (3.3)$$

Для передаточной функции разомкнутого контура с ПИД-регулятором характерен следующий вид:

$$W(s) = W_y(s) \cdot W_0(s) = \frac{K_d \cdot b_0 \cdot s^2 + K_p \cdot b_0 \cdot s + K_i \cdot b_0}{a_0 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s}. \quad (3.4)$$

Определение параметров регулятора по полюсам передаточной функции замкнутой системы.

Полюсы передаточной функции замкнутой системы с ПИД-регулятором в основном определяют характер ее переходной характеристики. Передаточная функция (ПФ) замкнутой системы с ПИД-регулятором в линейном варианте и единичной отрицательной обратной связью в соответствии с выражением (3.2) будет:

$$W(s) = W_y(s) \cdot W_0(s) = \frac{K_{1d} \cdot b_0 \cdot s^2 + K_{1p} \cdot b_0 \cdot s + K_{1i} \cdot b_0}{a_0 \cdot s^3 + (a_1 + K_{1d} \cdot b_0) \cdot s^2 + (a_2 + K_{1p} \cdot b_0) \cdot s + K_{1i} \cdot b_0}. \quad (3.5)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы следует из выражения (3.5):

$$D(s) = a_0 \cdot s^3 + (a_1 + K_{1d} \cdot b_0) \cdot s^2 + (a_2 + K_{1p} \cdot b_0) \cdot s + K_{1i} \cdot b_0. \quad (3.6)$$

Полюсы ПФ определяют численно по (3.6) при конкретных значениях K_i , K_p , K_d коэффициентов регулятора. Для системы третьего порядка возможны два варианта полюсов:

а) Комплексные полюсы.

Пусть корни уравнения $D(s) = 0$ имеют вид:

$$s_1 = -\eta_1, \quad s_2 = -\eta_2 + j \cdot \beta, \quad s_3 = -\eta_2 - j \cdot \beta, \quad (3.7)$$

где η_1 – степень устойчивости;

η_2 – абсолютное значение действительной части полюса;

β – обусловленная полюсами частота колебаний переходной характеристики.

Следовательно, соответствующим характеристическим уравнением принимается следующий вид:

$$D_1(s) = s^3 + (\eta_1 + 2 \cdot \eta_2) \cdot s^2 + (\beta^2 + \eta_2^2 + 2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2) \cdot s + \eta_1 \cdot (\beta^2 + \eta_2^2). \quad (3.8)$$

б) Вещественные полюсы.

Пусть корни уравнения $D(s) = 0$ имеют следующий вид:

$$s_1 = -\eta_1, \quad s_2 = -\eta_2, \quad s_3 = -\eta_3. \quad (3.9)$$

И соответствующее характеристическое уравнение примет вид:

$$D_1(s) = s^3 + (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \cdot s^2 + [\eta_3 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + \eta_1 \cdot \eta_2] \cdot s + \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3. \quad (3.10)$$

При сравнении выражений (3.6), (3.8) и (3.6), (3.10), получаем:

$$\begin{aligned}
\frac{a_1 + K_{1d} \cdot b_0}{a_0} &= \eta_1 + 2 \cdot \eta_2, \\
\frac{a_1 + K_{1d} \cdot b_0}{a_0} &= \eta_1 + \eta_2 + \eta_3, \\
\frac{a_2 + K_{1p} \cdot b_0}{a_0} &= \beta^2 + \eta_2^2 + 2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2, \\
\frac{a_2 + K_{1p} \cdot b_0}{a_0} &= \eta_3 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + \eta_1 \cdot \eta_2, \\
\frac{K_{1i} \cdot b_0}{a_0} &= \eta_1 \cdot (\beta^2 + \eta_2^2), \\
\frac{K_{1i} \cdot b_0}{a_0} &= \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Отсюда находим значения коэффициентов регулятора, которые выражены через значения полюсов передаточной функции замкнутой системы с ПИД-регулятором.

В случае комплексных полюсов:

$$\begin{aligned}
K_p &= \frac{(\beta^2 + \eta_2^2 + 2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_2}{b_0}, \\
K_i &= \frac{\eta_1 \cdot (\beta^2 + \eta_2^2) \cdot a_0}{b_0}, \\
K_d &= \frac{(\eta_1 + 2 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_1}{b_0}.
\end{aligned} \tag{3.12}$$

В случае действительных (вещественных) полюсов:

$$\begin{aligned}
K_p &= \frac{[\eta_3 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + \eta_1 \cdot \eta_2] \cdot a_0 - a_2}{b_0}, \\
K_i &= \frac{(\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3) \cdot a_0}{b_0}, \\
K_d &= \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \cdot a_0 - a_1}{b_0}.
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Выражения (3.12) и (3.13) предоставляют возможность сформулировать очевидный вывод об определении искомым коэффициентов ПИД-регулятора

как параметрами корректируемого объекта согласно выражению (3.2), так и полюсами передаточной функции замкнутой системы с ПИД-регулятором.

Таким образом, задача исследования сводится к замене объекта высокого порядка (3.14) эквивалентным объектом второго порядка (3.2).

$$W_y(s) = \frac{k}{a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (3.14)$$

С целью определения параметров системы второго порядка эквивалентной системам высокого порядка, считаем, что установившиеся значения их переходных характеристик совпадают, а полюса ПФ системы второго порядка определяются некоторыми средними значениями полюсов ПФ системы четвертого порядка. Для этого выполним следующие операции. Составить характеристическое уравнение разомкнутой системы:

$$B(s) = a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_n. \quad (3.15)$$

Найти полюсы характеристического уравнения (3.15). Все полюсы характеристического уравнения замкнутой системы влияют на характер ее динамических процессов, причем влияние полюсов расположенных ближе к мнимой оси оказывается более значительным, чем расположенных далее от мнимой оси. Поэтому этот факт нужно учитывать при выборе двух полюсов эквивалентной системы второго порядка.

Следующий шаг – найти среднеарифметическое значение полюсов. В случае если среднеарифметическое значение - комплексное число, то подбирается комплексно сопряженное ему число и по ним восстанавливается характеристическое уравнение. Если среднеарифметическое значение вещественное число, то оно дублируется.

Установившееся значение эквивалентной ПФ определяется по следующей формуле:

$$b_0 = \frac{k}{a_{n-1}}.$$

(3.16)

Эквивалентирование заключается в том, что начальные и конечные показатели этих характеристик совпадают. На начальном участке эквивалентность этих характеристик определяется скоростью их изменения. А конечным – является установившееся значение.

Формула предельного перехода из области изображения по Лапласу в область времени:

$$h(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot h(p) = b_0. \quad (3.17)$$

Синтезировать ПИД-регулятор по полученному эквивалентному уравнению ПФ.

Таким образом, для синтеза ПИД-регулятора систем высокого порядка необходимо выполнить следующие шаги:

- а) по характеристическому уравнению ПФ объекта регулирования найти полюса;
- б) найти среднее значение полюсов. Если некоторые полюсы находятся значительно дальше от мнимой оси, чем другие, ими можно пренебречь;
- в) по полученному среднему значению восстановить характеристическое уравнение, полученное уравнение второго порядка будет являться знаменателем эквивалентной ПФ;
- г) найти установившееся значение объекта регулирования высокого порядка, как отношение свободных членов числителя и знаменателя.

3.3 Синтез системы управления объектом четвертого порядка

Получить объект регулирования 4 порядка можно следующими способами:

- соединив параллельно или последовательно два колебательных звена;
- соединив параллельно или последовательно одно колебательное и два апериодических звена;
- соединив параллельно или последовательно четыре апериодических звеньев.

Рассмотрим второй случай, соединив последовательно два колебательных звена.

Исходными данными являются:

$$K_2 = 0.1; K_3 = 3; T_2 = 0.2; T_3 = 0.15; \xi_2 = 0.3; \xi_3 = 0.6,$$

$$W_2(s) = \frac{K_2}{T_2^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_2 \cdot T_2 \cdot s + 1} = \frac{0.1}{0.04 \cdot s^2 + 0.12 \cdot s + 1},$$

$$W_3(s) = \frac{K_3}{T_3^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_3 \cdot T_3 \cdot s + 1} = \frac{3}{0.0225 \cdot s^2 + 0.18 \cdot s + 1}.$$

Выделим передаточную функцию объекта управления:

$$W_{23}(s) = W_2(s) \cdot W_3(s) = \frac{0.1}{0.04 \cdot s^2 + 0.12 \cdot s + 1} \cdot \frac{3}{0.0225 \cdot s^2 + 0.18 \cdot s + 1} =$$

$$= \frac{3000}{9 \cdot s^4 + 99 \cdot s^3 + 841 \cdot s^2 + 3000 \cdot s + 10000}.$$

Выделим характеристическое уравнение:

$$D(s) = 9 \cdot s^4 + 99 \cdot s^3 + 841 \cdot s^2 + 3000 \cdot s + 10000.$$

Переходная характеристика разомкнутой системы объекта показана на рисунке 22.

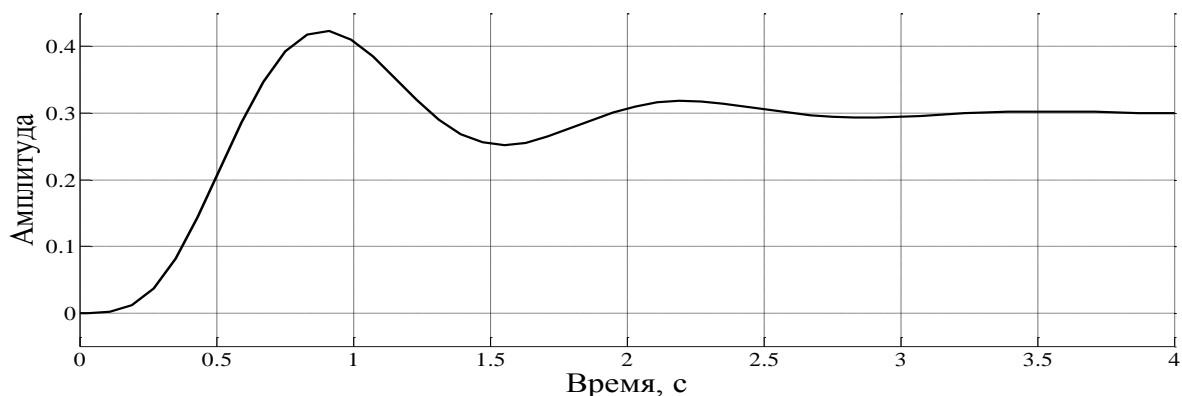


Рисунок 22 – Переходная характеристика

Найдем корни уравнения:

$$v = \begin{pmatrix} 10000 \\ 3000 \\ 841 \\ 99 \\ 9 \end{pmatrix}.$$

Определим полюса ПФ по полученным корням:

$$s_1 = -4 + i \cdot 5.333; s_2 = -4 + i \cdot 5.333; s_3 = -1.5 - j \cdot 4.77; s_4 = -1.5 + j \cdot 4.77.$$

Устойчивость системы определяется расположением всех полюсов в левой полуплоскости.

Определим показатели качества процесса управления:

$$\text{степень устойчивости: } \eta_{23} = \min(-\operatorname{Re}(s_1), -\operatorname{Re}(s_2), -\operatorname{Re}(s_3), -\operatorname{Re}(s_4)) = 1.5,$$

$$\text{колебательность: } \mu_{23} = \max\left(\frac{\operatorname{Im}(s_1)}{\operatorname{Re}(s_1)}, \frac{\operatorname{Im}(s_2)}{\operatorname{Re}(s_2)}, \frac{\operatorname{Im}(s_3)}{\operatorname{Re}(s_3)}, \frac{\operatorname{Im}(s_4)}{\operatorname{Re}(s_4)}\right) = 3.18,$$

$$\text{перерегулирование: } \sigma_{23} = e^{\frac{-\pi}{\mu_{23}}} \cdot 100 = 37.235,$$

время регулирования:

$$t_{p23} = 3 \frac{1}{\eta_{23}}. \quad (3.18)$$

Для определения параметров системы второго порядка, которая эквивалентна рассматриваемой системе четвертого порядка, считаем, что установившиеся значения их переходных характеристик совпадают, а полюса ПФ системы второго порядка определяются некоторыми средними значениями полюсов ПФ системы четвертого порядка. Для этого выполним следующие операции.

1 Вычисление среднего значения полюсов системы четвертого порядка:

$$s_{11} = \frac{-4 + i \cdot 5.333 + (-1.5 + i \cdot 4.77)}{2} = -2.75 + i \cdot 5.051.$$

Выбираем отрицательное значение, поскольку по условию устойчивости действительная часть полюсов должна являться отрицательной.

2 Вычисляем характеристическое уравнение системы второго порядка для среднего значения полюсов посредством математического пакета Mathcad:

$$[s - (-2.75 + j \cdot 5.051)] \cdot [s - (-2.75 - j \cdot 5.051)] \text{ collect, } s \rightarrow s^2 + 5.5 \cdot s + 33.075101.$$

3 Приводим характеристическое уравнение системы второго порядка к виду, чтобы свободный член был равен единице

$$\frac{s^2 + 5.5 \cdot s + 33.075101}{33.0751101} = 0.03023 \cdot s^2 + 0.166288 \cdot s^2 + 1.$$

Получаем, что искомая ПФ имеет вид:

$$W_y(s) = \frac{b_0}{0.03s^2 + 0.166s + 1},$$

где b_0 – установившееся значение системы управления четвертого порядка ($b_0=0.3$).

Проверяем корректность полученной эквивалентной ПФ посредством пакета MATLAB (рисунок 23).

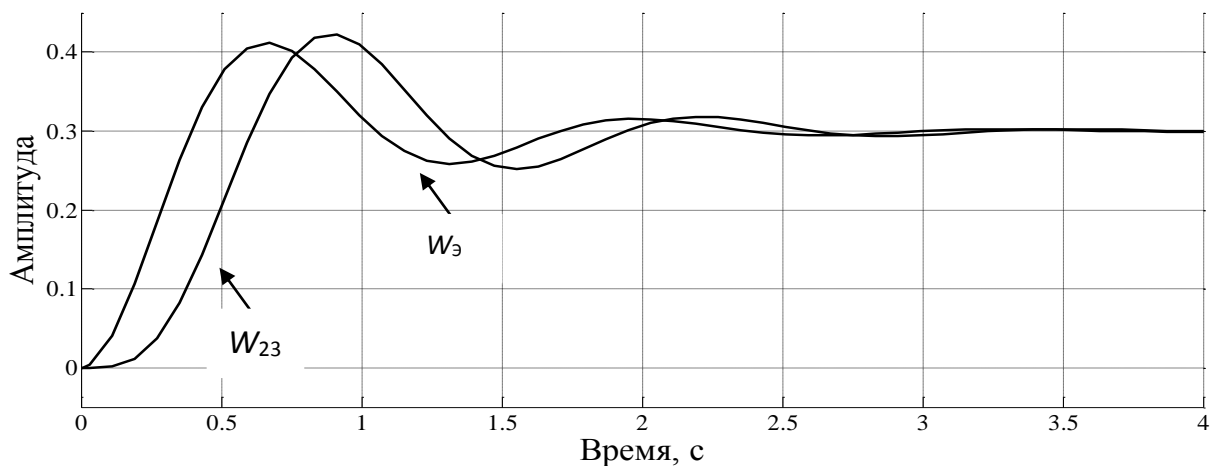


Рисунок 23 – Переходные характеристики ПФ W_{23} и W_3

По переходной характеристике видно, что эквивалентная ПФ найдена верно. Для получения необходимых точности и качества переходного процесса можно синтезировать ПИД-регулятор. Уравнение ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$W_y = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s}. \quad (3.19)$$

Параметры ПИД-регулятора в случае, когда полюса объекта регулирования получились комплексные, находятся по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{(\beta^2 + \eta_2^2 + 2\eta_1 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_2}{b_0}, \\
 K_i &= \frac{\eta_1(\beta^2 + \eta_2^2) \cdot a_0 - a_0}{b_0}, \\
 K_d &= \frac{(\eta_1 + 2 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_1}{b_0},
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты ПФ второго порядка.

Принимаем комплексные полюса эквивалентной замкнутой системы с ПИД-регулятором $\eta_1=1, \eta_2=5, \beta=0.5$, получим, что:

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{(\beta^2 + \eta_2^2 + 2\eta_1 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_2}{b_0} = 0.219, \\
 K_i &= \frac{\eta_1(\beta^2 + \eta_2^2) \cdot a_0 - a_0}{b_0} = 2.444, \\
 K_d &= \frac{(\eta_1 + 2 \cdot \eta_2) \cdot a_0 - a_1}{b_0} = 0.554.
 \end{aligned}$$

На рисунке 24 приведены переходные характеристики системы с ПИД-регулятором.

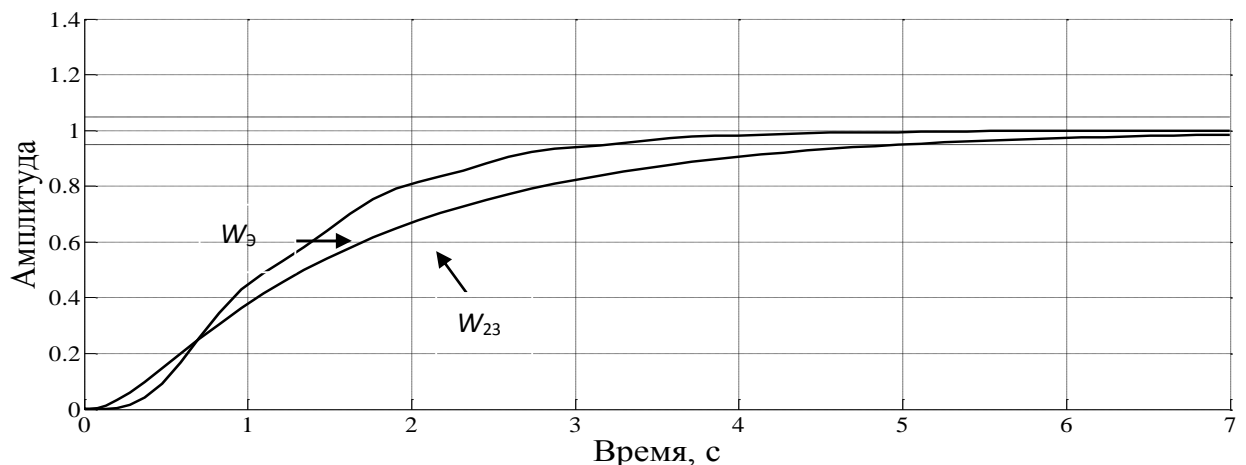


Рисунок 24 – Переходная характеристика с ПИД-регулятором

Выполнена проверка работоспособности методики на передаточной функции объекта регулирования четвертого порядка

4 Экспериментальное исследование

4.1 Методика эксперимента

Цель экспериментальных исследований заключается в сборе данных о динамике вибрационного технологического процесса для идентификации уплотнителя, в проведении анализа изменений ускорения уплотнителя от жесткости среды, в обосновании предпосылок автоматизации рабочего процесса. Объект исследования – виброплита ВУ-05-45.

Задачи исследования:

- разработка методики экспериментального исследования вибрационного процесса уплотнителя;
- подготовка измерительного комплекса и установка приборов на вибрационный уплотнитель;
- проведение лабораторных испытаний на грунтовом канале;
- обработка экспериментальных данных.

Методика экспериментального исследования

Экспериментальные исследования рабочего процесса вибрационного уплотнителя предполагают измерение параметров в динамике. Важное значение имеет планирование эксперимента и обработка результатов экспериментальных исследований с применением современных программных средств. При подготовке экспериментальных исследований проведены работы по модернизации измерительного оборудования лаборатории «Грунтовый канал» кафедры «Строительные материалы и технологии строительства» СФУ на основе компьютеризации измерительных процессов.

Объект исследования.

Виброплита ВУ-05-45 (рисунок 25) предназначена для уплотнения разных видов связных и сыпучих дорожных покрытий (гравия, песка, песчано-гравийной смеси, асфальтобетона) при осуществлении ремонтных, дорожно-

строительных и иных работ, которые связаны с уплотнением поверхности на ограниченном пространстве.

Виброплита является конструкцией из плиты, которая представляет собой ее рабочую часть. В центре плиты устанавливается электромеханический вибратор общего назначения с круговыми колебаниями ИВ-99Б, представляющий собой трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, на концах вала ротора устанавливаются дебалансы. Вращающиеся с валом ротора дебалансы создают вынуждающую силу. Через специальные виброизоляторы к плите прикреплена рама с рукояткой управления, на которой установлен выключатель электропитания вибратора. Уплотнение происходит за счет возникающей в вибраторе вертикальной составляющей вынуждающей силы. Поступательное движение виброуплотнителя обуславливается горизонтальной составляющей вынуждающей силы.



Рисунок 25 – Общий вид виброплиты ВУ-05-45 [76]

Таблица 2 – Технические характеристики виброплиты ВУ-05-45

Показатель	Величина
Номинальная мощность, кВт	0,25
Частота колебаний синхронная, 1/мин	3000
Вынуждающая сила, кН	2,55...5,1
Статический момент дебаланса, кг x см	2,5...5,0
Тип электродвигателя	трехфазный, асинхронный
Напряжение, В	42, 220
Частота тока, Гц	50
Габаритные размеры (Д x Ш x В), мм	825 x 388 x 1000
Габариты рабочей плиты, мм	388 x 388
Глубина уплотнения, мм	200
Рабочая скорость, м/мин	10
Масса, кг	45

Вибратор ИВ-99Б (рисунок 26) предназначен для возбуждения вибрации в установках по уплотнению бетонных смесей и грунтов, транспортированию, выгрузке и просеиванию сыпучих материалов, привода вибропитателей, виброплощадок и других технологических работ.



Рисунок 26 – Общий вид электромеханического вибратора общего назначения с круговыми колебаниями ИВ-99Б

Для регулирования величины вынуждающей силы вибратора дебалансы на обоих концах вала выполнены двойными. Регулирование осуществляется

путем изменения угла между подвижным и неподвижным дебалансами на обоих концах вала, рисунок 27.

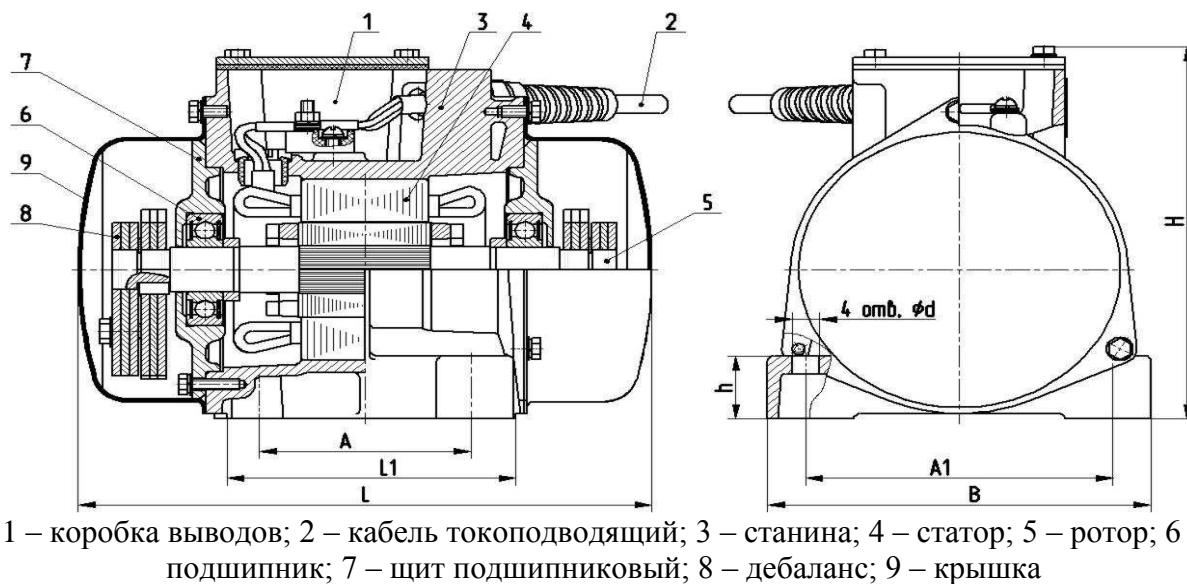


Рисунок 27 – Общий вид электромеханического вибратора общего назначения с круговыми колебаниями ИВ-99Б

Для регулирования величины вынуждающей силы вибратора дебалансы на обоих концах вала выполнены двойными. Дебалансы, установленные ближе к электродвигателю, имеют шпоночное соединение с валом ротора. Дебалансы, расположенные ближе к концу вала, являются поворотными относительно вала. Регулирование осуществляется путём изменения взаимного расположения крайних дебалансов на обоих концах вала (см. рисунок 28).

При включении электродвигателя, вращающиеся дебалансы вызывают круговые колебания вибратора, передающиеся конструкции, на которой он установлен.

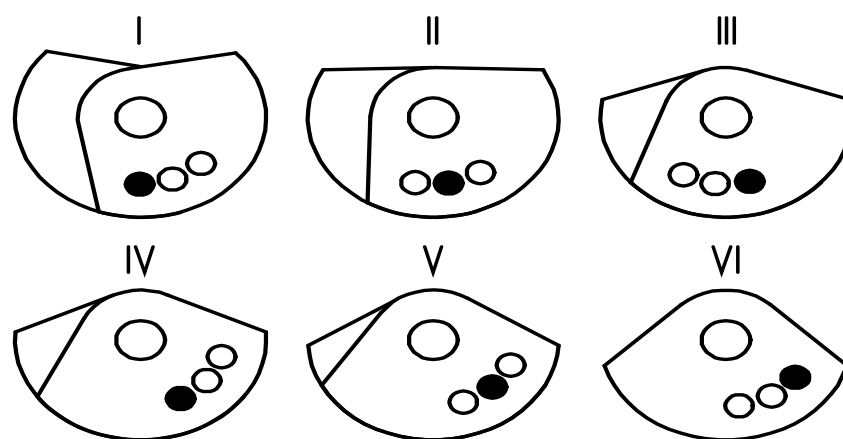


Рисунок 28 – Схема регулировки статического момента дебалансов вибратора ИВ-99Б

Таблица 3 – Данные по настройке вынуждающей силы виброплиты ВУ-05-45

Положение дебалансов согласно рисунку 4.4	Частота вращения дебаланса n , 1/мин	Масса дебаланса, m_e , кг	Количество дебалансов, шт	Стат.момент, кг см (паспортные данные)	Вынуждающая сила, $P_{вын}$, кН
I	3000	0,595	4	2,55	2,5
II	3000	0,595	4	3,45	3,4
III	3000	0,595	4	4,20	4,1
IV	3000	0,595	4	4,60	4,5
V	3000	0,595	4	4,90	4,8
VI	3000	0,595	4	5,10	5,0



Рисунок 29 – Объект исследования – виброплита ВУ-05-45



Рисунок 30 – Дебалансы вибратора ИВ-99Б

Приборы.

Приборы для экспериментальных исследований:

- акселерометр USB;
- плотномер ДПУ;
- рулетка;
- секундомер.

Акселерометр USB.

Акселерометр USB – 3 оси, USB-интерфейс, $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$, питание автономное или от USB, энергонезависимая память 256 Кбайт (<http://accelerometer.narod.ru/accusb.html>) выполнен на базе микросхемы цифрового MEMS-акселерометра Analog Devices и может работать как при наличии микросхемы энергонезависимой памяти на плате, так и без нее.

Акселерометр – прибор, измеряющий проекцию действующего ускорения. Современные акселерометры позволяют измерять ускорение сразу в трех плоскостях. Некоторые акселерометры также имеют встроенные системы сбора и обработки данных. Широкому распространению и применению акселерометров во многом способствовало открытие так называемой MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) или МЭМС-технологии. МЭМС – это технологии и устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. Пьезоэлектрические акселерометры являются

одним из видов МЭМС-технологии. Выполняются на основе пьезоэлектрической полимерной пленки.

На рисунке 31 показан основной конструктивный блок элементарной ячейки МЭМС-акселерометра [14]. Весь кристалл акселерометра занят главным образом схемами формирования электрического сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения, расположенный в его центре. Датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из поликремниевой пленки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой простые консольные стержни, расположенные на высоте 1 мкм от поверхности кристалла на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу [14].

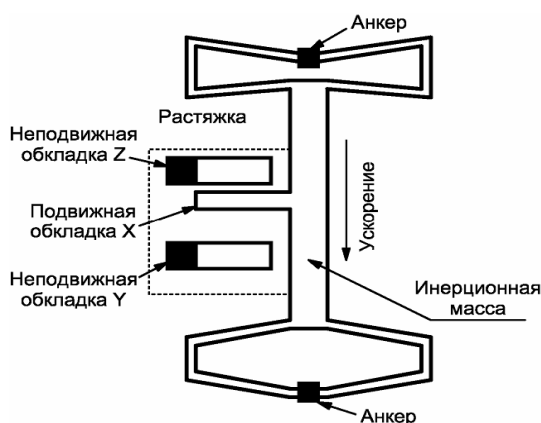


Рисунок 31 – Чувствительный элемент MEMS-акселерометра [14]

Инерционная масса датчика ускорения при изменении скорости перемещения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. Ее пальцеобразные выступы образуют подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. С каждого конца эта структура опирается на столбики анкеры, аналогичные по конструкции держателям неподвижных обкладок. Растяжки по концам инерционной массы, удерживающие ее на весу, являются механическими пружинами постоянной упругости, ограничивающими

перемещение инерционной массы пробника и ее возврат в исходное положение [14].

В спокойном состоянии (движение с постоянной скоростью) все «пальцы» подвижной обкладки X благодаря растяжкам находятся на одинаковом расстоянии от пар пальцев неподвижных обкладок. При каком-либо ускорении датчика подвижные пальцы приближаются к одному из наборов неподвижных пальцев и удаляются от другого набора. В результате этого относительного перемещения соответствующие расстояния становятся неодинаковыми и емкости между подвижной обкладкой и каждой из неподвижных обкладок конденсатора изменяются.

При этом изменение выходного напряжения датчика будет пропорционально ускорению вдоль оси чувствительности датчика [14].

Согласно рисунку 31 и принципу работы датчика рассмотрим механическую схему. Она показана на рисунке 32 и включает в себя следующие элементы: инерциальная масса (m), элемент жесткости (k), демпфирующий элемент (b). В качестве демпфирующего элемента на рисунке 32 служит воздух внутри ячейки, оказывающий сопротивление движению инерционной массы.

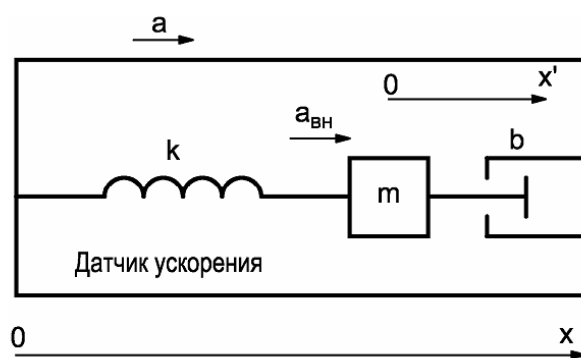


Рисунок 32 – Механическая схема MEMS-акселерометра

Также на рисунке 32 показан вектор ускорения a вдоль оси x в системе отсчета связанной с Землей. Вдоль этой оси направлена ось чувствительности датчика. Необходимо установить взаимосвязь между смещением инерциальной

массы внутри датчика в системе координат $O-x'$, связанной с ним от величины ускорения движения объекта a вдоль оси чувствительности датчика.

В состав измерительной части системы мониторинга на рисунке 33 входят: MEMS-акселерометр, блок масштабирования, блок аналогово-цифрового преобразования (АЦП), цифровое вычислительное устройство (ЦВУ). MEMS-акселерометр осуществляет преобразование измеряемого параметра объекта (ускорение) в сигнал электрического напряжения, снимаемого на выходе. Выходное напряжение соответствующей оси чувствительности датчика будет пропорционально значению ускорения вдоль этой оси. Далее электрический сигнал поступает на блок масштабирования, который представляет собой усилитель с изменяемым коэффициентом усиления. Данный блок необходим для приведения уровня сигналов, поступающих на вход АЦП к величине опорного напряжения, а также осуществления калибровки измерительной системы.

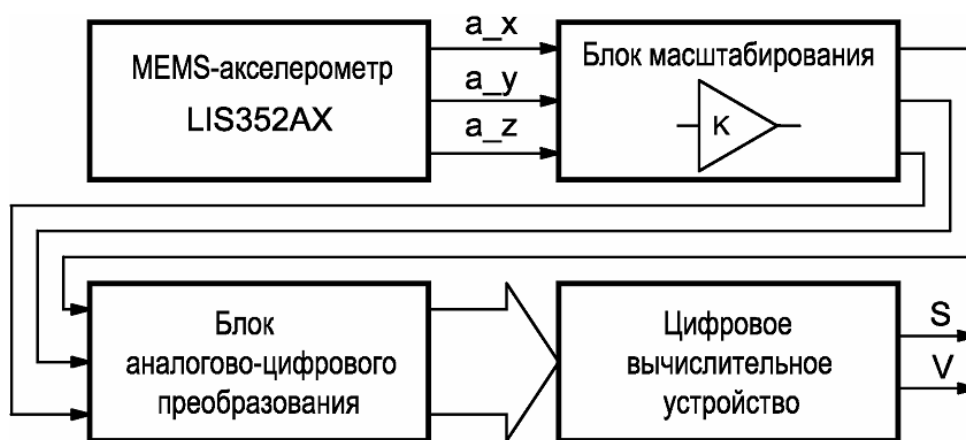


Рисунок 33 – Фрагмент структурной схемы измерительной части системы

Блок аналого-цифрового преобразования (АЦП) производит преобразование входного аналогового сигнала в цифровой для его дальнейшей обработки цифровым вычислительным устройством. ЦВУ благодаря заложенному в него алгоритму производит обработку сигналов первичной информации и вычисление скорости движения объекта V и перемещения S .

Акселерометр USB без микросхемы памяти.

Акселерометр USB, рисунок 34, рисунок 35, без микросхемы памяти работает только будучи подключенным к USB компьютера, подача питания также осуществляется по USB. После каждого из измерений, акселерометр передает результаты в компьютер.

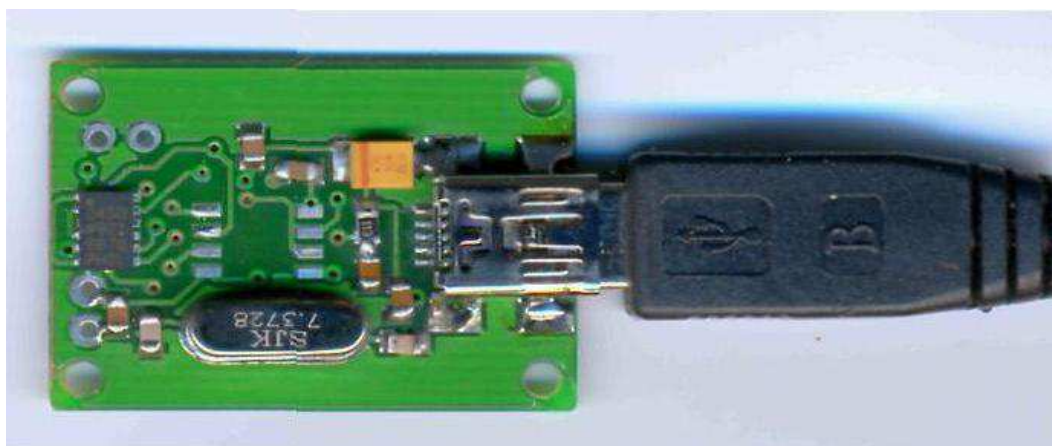


Рисунок 34 – Акселерометр без ИС памяти (вид сверху, подключен кабель USB)

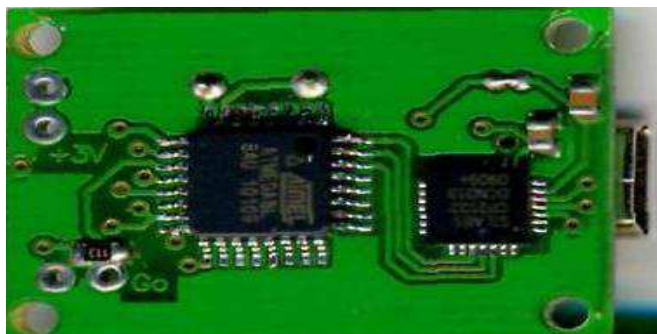


Рисунок 35 – Акселерометр без ИС памяти (вид снизу)

На рисунке 34 (вид сверху) между разъемом USB (слева) и микросхемой MEMS-акселерометра (справа) место для установки микросхемы памяти – в этом варианте она отсутствует.

Программное обеспечение.

Прилагаемое программное обеспечение позволяет выбрать:

– диапазон измеряемых ускорений акселерометра $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ или $\pm 16g$;

– число осей акселерометра, по которым выполняется измерение (использование не всех осей актуально при записи данных в энергонезависимую память и при построении графика при открытии файла;

– при мегабайтных файлах на построение графика требуется ощутимое время);

– частоту выборки акселерометра 3200 Гц, 1600 Гц, 800 Гц, 400 Гц, 200 Гц, 100 Гц, 50 Гц, 25 Гц, 12,5 Гц или 6,25 Гц;

– время измерения / число выборок, ограниченные только объемом оперативной памяти вашего компьютера.

Программное обеспечение позволяет управлять акселерометром, считывать результаты измерения, отображать их в виде графиков ускорения и сохранять полученные данные в виде файлов. Компьютерное приложение, работающее с акселерометром, обеспечивает удобные функции:

– просмотр графиков;

– обработку сигналов (сглаживание, вычисление спектра, тренда);

– поиск файлов по комментариям к ним;

– документирование результатов:

а) сохранение данных графика или его фрагментов в текстовом формате txt или в формате csv (для импорта в MS Excel);

б) копирование в буфер обмена для последующей вставки в документы, например, MS Word, PowerPoint:

– графиков (в wmf-формат, качество картинки не теряется при сжатии/растягивании);

– комментариев к файлам с автоматическим добавлением информации о файле (имя, время записи);

– результатов вычисления спектра (значение и частота максимальной спектральной составляющей, все спектральные составляющие в текстовом формате) и тренда (формула, описывающая линию тренда).

Прибор оценки качества уплотнения грунта и асфальтобетона ДПУ.

Предназначен для оценки качества уплотнения песчаных, супесчаных и суглинистых грунтов, содержащих не более 25% твердых частиц крупнее 2 мм, а также асфальтобетона в покрытиях дорог, слоях дорожной одежды, иных инженерных конструкциях. Прибор пригоден для экспресс контроля плотности песчаных и мелкозернистых асфальтобетонов как в процессе укладки и уплотнения материала, так и через 1-3 суток после окончания работ.

Технические характеристики

Масса груза, кг: 2,5.

Высота падения груза, мм: 300.

Параметры большого конуса (для а/бетона): $a=30$, $h=30$ мм.

Глубина контролируемого слоя грунта: 100...300 мм.

Пределы измерения плотности:

Асфальтобетона: (0,92...1,00) K_u .

Грунта: (0,84...1,02) K_u .

Погрешность измерения плотности: +0,01 K_u .

Дорожно-строительный материал.

Для экспериментальных исследований используется смесь щебеночно-гравийно-песчаная для основания автомобильной дороги – номер смеси С11 (ГОСТ 25607-2009) [1; 2], таблица 4.

Таблица 4 – Характеристики смеси щебеночно-гравийно-песчаной

Номер смеси	Наибольший размер зерен D , мм	Полный остаток, % по массе, на ситах с размерами отверстий, мм									
		120	80	40	20	10	5	2,5	0,63	0,16	0,05
Смеси для оснований (прерывистая гранулометрия)											
С9	80	0	0-10	15-35	28-55	40-70	50-80	50-80	60-88	85-97	95-100
С10	40	0	0	0-10	25-60	45-80	57-85	57-85	71-91	87-97	95-100
С11	20	0	0	0	0-10	25-60	50-77	50-77	70-88	85-97	95-100

Последовательность экспериментальных работ:

- в канал со смесью помещался виброуплотнитель;
- устанавливалась точка начала движения виброуплотнителя и точка конца (в виде рисок на боковой поверхности канала);
- механически устанавливалось одно из шести положений дебалансов виброплиты, обеспечивающих различные вынуждающие силы.
- в конце подготовки задавалась скорость движения, (время прохождения измерительного участка).

Вынуждающая сила изменялась от минимального значения до максимального изменением положения дебалансного диска,

на каждом положении вибровозбудителя добивались максимальной плотности (жесткости) основания.

4.2 Результаты лабораторных исследований вибрационного процесса

Общий вид экспериментального оборудования и измерительного комплекса в лаборатории с грунтовым каналом показан на рисунке 36.



Рисунок 36 – Общий вид экспериментального оборудования и измерительного комплекса в лаборатории с грунтовым каналом

Применение плотномера ДПУ во время эксперимента в лаборатории с грунтовым каналом показан на рисунке 37.



Рисунок 37 – Проверка плотности грунта с помощью плотномера ДПУ

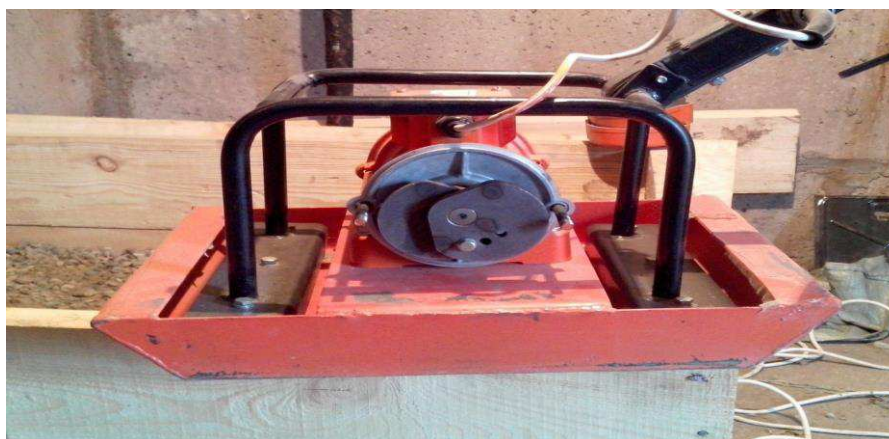


Рисунок 38 – Вибрационная плита со снятой защитой дебалансов вибратора

Временная зависимость ускорения плиты во время эксперимента показана на рисунок 39.

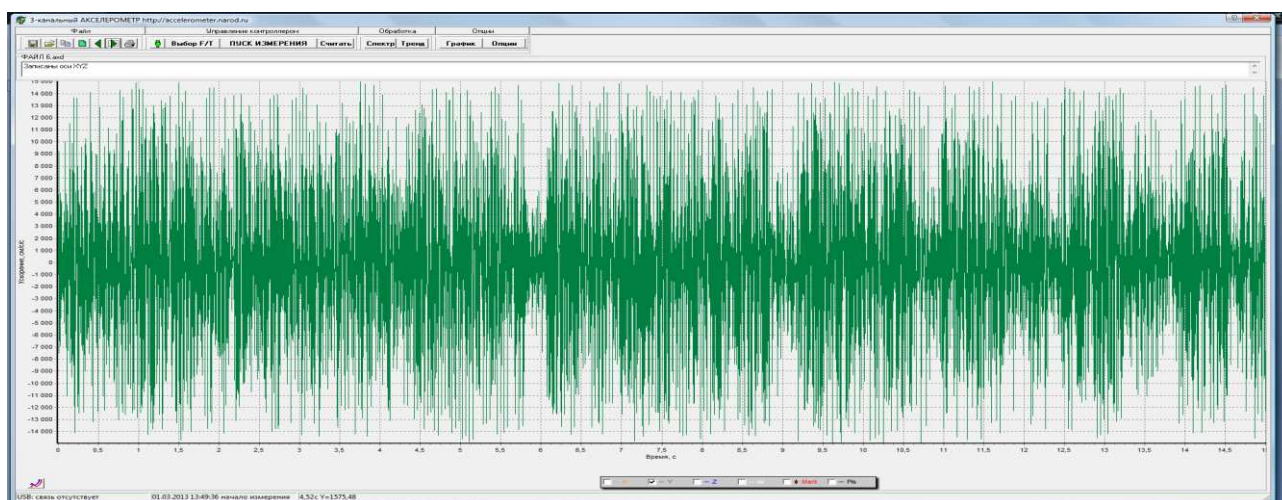


Рисунок 39 – Временная зависимость ускорения плиты во время эксперимента

Результаты измерений ускорения вибрационной плиты в процессе эксперимента на первом и шестом проходах показаны на рисунках 40 – 41.

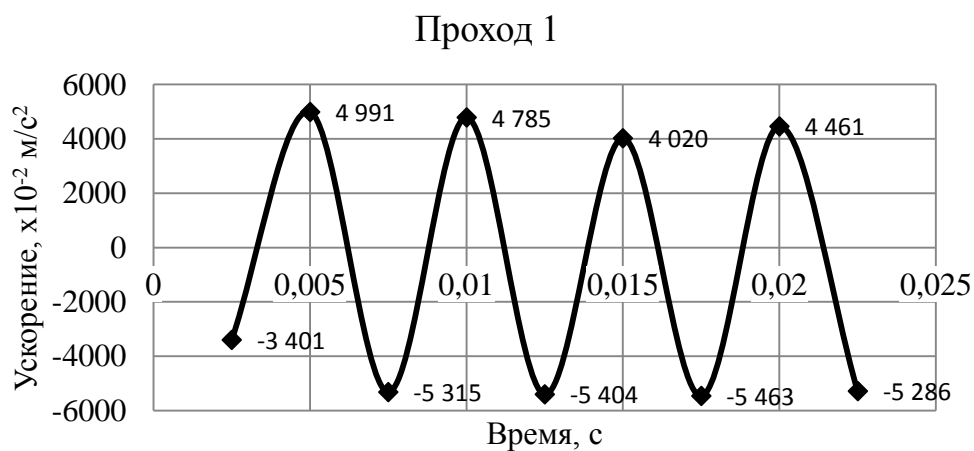


Рисунок 40 – Временная зависимость ускорения виброплиты при первом проходе

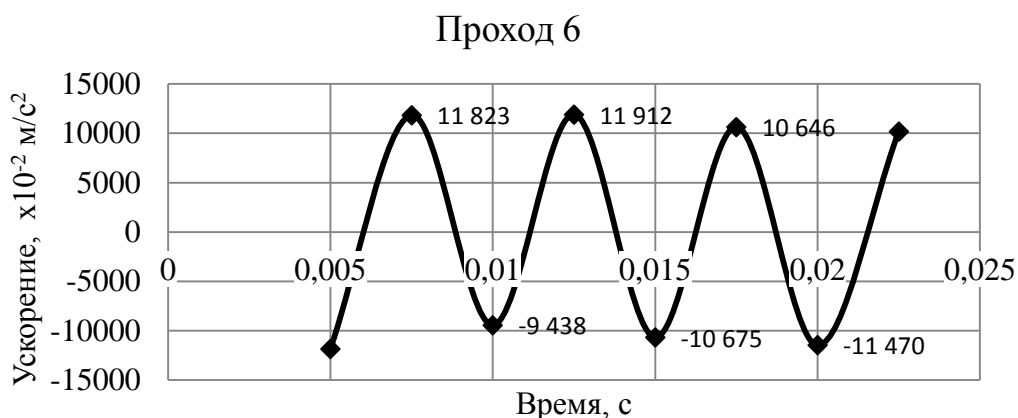


Рисунок 41 – Временная зависимость ускорения виброплиты при шестом проходе

Экспериментальные данные обработаны средствами электронной таблицы EXCEL. Получены данные максимальных амплитуд ускорения на каждом из проходов вибрационной плиты. Графическая зависимость максимальной амплитуды ускорения вибрационной плиты от номера прохода показана на рисунке 42.

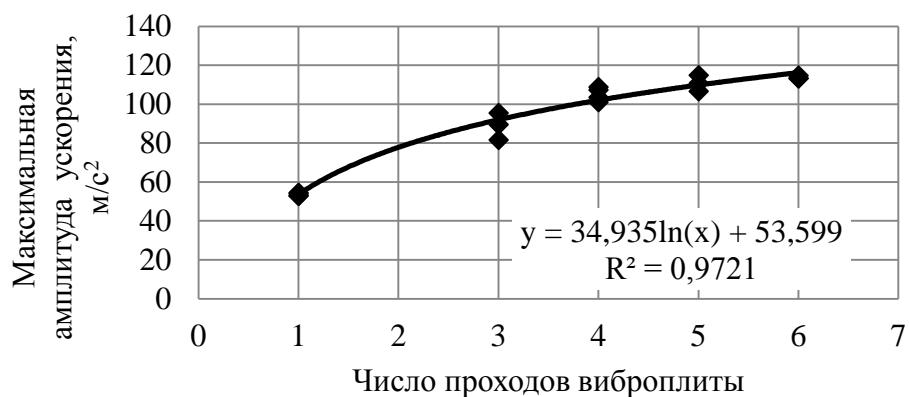


Рисунок 42 – Зависимость максимальной амплитуды ускорения от числа проходов вибрационной плиты ВУ-05-45

Полученная зависимость, рисунок 42, нелинейная, хорошо описывается логарифмической функцией (коэффициент детерминации равен 0,97). При увеличении числа проходов от одного до шести максимальная амплитуда ускорения вибрационной плиты увеличивается нелинейно от 50 м/с² до 115 м/с².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы.

Получена математическая модель объекта исследования методом пространства состояний. Разработана имитационная модель на языке программы MATLAB/Simulink.

Определены параметры ПИД-регулятора системы с объектом четвертого порядка в результате реализации подхода к синтезу.

Выполнено экспериментальное исследование по уплотнению ПЦС вибрационной плитой. Получены данные параметров вибрационного уплотнения, которые могут быть использованы для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, автоматизации процессов и контроля качества уплотнения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ – автоматизированная система управления

ДСМ – дорожно-строительные машины

ИСУ – интеллектуальные системы управления

САУ – система автоматического управления

НТП – научно-технический прогресс

ООС – отрицательная обратная связь

ОУ – объект управления

ПФ – передаточная функция

ПИД-регулятор – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

П-регулятор – пропорциональный регулятор

ПИ-регулятор – пропорционально-интегральный регулятор

ПД-регулятор – пропорционально-дифференцирующий регулятор

САР – система автоматического регулирования

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 12 с.
2. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – Москва : Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2010. – 19 с.
3. Баркан, Д. Д. Виброметод в строительстве. – М.: Изд-во Госстройиздат, 1959. – 315 с.
4. Баркан, Д. Д. Теория поверхностного уплотнения грунтов / Д. Д. Баркан, О. Я. Шехтер // Применение вибрации в строительстве: сб. статей. №51 / Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 5–26.
5. Башкарёв, А. Я. Исследование процесса передвижения вибрационных плит : дис. ... канд. техн. наук : 05.00.00 / Башкарев Альберт Яковлевич. – Ленинград, 1970. – 135 с.
6. Блехман, И. И. Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
7. Бурый Г. Г. Анализ уплотнения грунтов перспективными вибрационными катками / Г. Г. Бурый, С. В. Савельев // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №1. – С. 8 – 10.
8. Бурый, Г. Г. Вибрационные машины и их воздействие на грунт / Г. Г. Бурый // Материалы II Межвузовской научной конференции студентов и аспирантов / ОмГТУ. – Омск, 2012. – С. 104–106.
9. Бурый, Г. Г. Контроль качества уплотнения грунтов и инновационное устройство для его осуществления / Г. Г. Бурый, С. В. Савельев

// Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции / ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). – Омск, 2012. – С. 199–203.

10. Бурый, Г. Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» / Г. Г. Бурый, Г. И. Шабанова, С. В. Савельев // Вестник СибАДИ. – 2013. – №3 (31). – С. 102–107.

11. Бурый, Г. Г. Методика обоснования режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации / Г. Г. Бурый // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции» / ОФ ФГБОУ ВО НГАВТ. – Омск, 2014. – С. 47–55.

12. Бурый, Г. Г. Обоснование режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Бурый Григорий Геннадьевич. – Омск, 2016 – 169 с.

13. 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.

14. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – Москва : Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

15. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А. А. Воронов. – Москва : Энергия, 1980. – 309 с.

16. Гендлина, Л. И. Результаты исследования процесса уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом / Л. И. Гендлина, С. Я. Левенсон, Ю. И. Еременко [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №8 – С. 255–259.

17. Главицкий, К. Ц. Направления модернизации катков статического и динамического действия для уплотнения основания пути // Наука и прогресс

транспорта / К. Ц. Главицкий, В. Н. Богомаз // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2007. – №17. – С. 80–85.

18. Деруссо, П. М. Пространство состояний в теории управления : для инженеров / П. М. Деруссо, Рой Р. Дж., Ч. М. Клоуз. – Москва : Наука, 1970. – 620 с.

19. Евсеев, Е. Ю. Анализ применения вибрационных плит для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа / Е. Ю. Евсеев, Р. В. Куприянов, А. Ф. Зубков // Механизация строительства. – 2011. – № 6 (804). – С. 28–31.

20. Евсеев, Е. Ю. Моделирование процесса взаимодействия вибрационной плиты с горячей асфальтобетонной смесью при ремонте дорожных покрытий / Е. Ю. Евсеев, В. Н. Матвеев, А. Ф. Зубков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 4 (28). – С. 70–77.

21. Замятин, Д. В. Методика синтеза оптимальных по быстродействию систем / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2005. – № 4. – С. 28–30.

22. Замятин, Д. В. Определение параметров корректирующего устройства для системы четвертого порядка, оптимальной по быстродействию / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2006. – № 4 (11). – С. 18–20.

23. Замятин, Д. В. Синтез оптимальных по быстродействию систем высокого порядка / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 2 (48). – С. 24–28.

24. Иванчура, В. И. Оптимизация следящей системы автоматического управления / В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев // Вестник СибГАУ. – 2011. – № 5 (38). – С. 44–49.

25. Игнатъев, А. А. Определение рациональных параметров вибрационных катков для уплотнения грунта : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Игнатъев Алексей Александрович. – Ярославль, 2013. – 182 с.

26. Корчагина, Е. А. Моделирование динамической системы «возмущающие воздействия – каток – оператор / Е. А. Корчагина, В. С. Щербаков // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики : вклад науки : сб. трудов конференции / СибАДИ. – Омск, 2014. – С. 88-91.
27. Костельов, М. П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона / М. П. Костельов // Дорожная техника – 2009 : кат.-справ. – Санкт-Петербург : ООО «Славутич», 2009. – С. 42-52.
28. Кромский, Е. И. Новая техника для уплотнения дорожно-строительных материалов / Е. И. Кромский, Е. А. Безбородов, О. А. Ефимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2011. – №11 (228) – С. 26–29.
29. Ложечко, В. П. Исследование рабочего процесса гладковальцового катка с вакуумным балластным устройством : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.05.04 / Ложечко Виктор Петрович. – Ленинград, 1981. – 15 с.
30. Ложечко, В. П. К вопросу о рациональном режиме уплотнения асфальтобетонных смесей / В. П. Ложечко, А. Ф. Чебунин. – Ленинград : Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина, 1983. – 12 с.
31. Лукас, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – Москва : Недра, 1990. – 416 с.
32. Лушников, Б. В. Вибродиагностика сухого трения в колебательной системе при кинематическом возбуждении возбужденных колебаний / Б. В. Лушников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т.12. №1–2. – С. 435–438.
33. Лушников, Б. В. Оптимизация параметров тестового воздействия для повышения чувствительности методов вибродиагностики силы сухого трения при вынужденных колебаниях динамических систем / Б. В. Лушников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т.13. №4–4. – С. 1092–1094.

34. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости / А. М. Ляпунов. – Москва; Ленинград: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1950. – 472 с.
35. Малич, Н. Г. Особенности уплотнения среды вальцами катков / Н. Г. Малич, В. С. Блохин // Горный информационно–аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №8 – С. 345–355.
36. Маслов, А. Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А. Г. Маслов, В. М. Пономарь. – Киев : Будівельник, 1985. – 128 с.
37. Михеев, В. В. Математическая модель уплотнения упруго-вязко-пластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Вестник СибАДИ. – 2017. – №2(54). – С. 28–36.
38. Мусияко, Д. В. Самоходная вибрационная плита с вальцем / Д. В. Мусияко, Р. А. Расулов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2016. – № 4 (43). – С. 73–80.
39. Новожилов, А. И. Исследование движения вибрационной машины для уплотнения грунта: дис. ... на соискание уч. ст. канд. техн. наук : 05.05.04 / Новожилов Альберт Иванович. – Ленинград, 1959.
40. Новожилов, А. И. Исследование самопередвижения вибрационной машины для уплотнения грунта / А. И. Новожилов // Труды магнитогорского горно–металлургического института им. Носова. – 1958. – № 16.
41. Носов, С. В. Технологические режимы работы уплотняющих машин и закономерности уплотнения дорожно-строительных материалов на основе развития их реологии / С. В. Носов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 3 (23). – С. 87–98.
42. Пермяков, В. Б. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком / В. Б. Пермяков, В. В. Дубков, В. С. Серебренников // Омский научный вестник. – 2008. – №1–64. – С. 67–71.

43. Пермяков, В. Б. Обоснование выбора параметров вибрационных катков / В. Б. Пермяков, А. В. Захаренко, С. В. Савельев // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 2. – С. 100–103.
44. Пермяков, В. Б. Совершенствование теории, методов расчёта и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.04 / Пермяков Владислав Борисович. – Омск, 1990. – 412 с.
45. Прокопьев, А. П. Синтез ПИД-регулятора для объектов второго порядка с учетом расположения полюсов / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура, Р. Т. Емельянов // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. № 1. – С. 50–60.
46. Руш, Н. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости / Н. Руш, П. Абетс, М. Лалуа. – Москва: Мир, 1980. – 300 с.
47. Савельев, С. В. Модель взаимодействия рабочего органа вибрационного катка с уплотняемой средой / С. В. Савельев, С. А. Милюшенко, А. Г. Лашко // Механизация строительства. – 2013. – № 1 (823). – С. 24–28.
48. Тюремнов, И. С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» / И. С. Тюремнов // Вестник ТОГУ. – 2016. – № 2(41). – С. 115–122.
49. Тюремнов, И. С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков / И. С. Тюремнов, А. А. Игнатьев, И. С. Филатов // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 3(34). – С. 81–88.
50. Тюремнов, И. С. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит / И. С. Тюремнов, А. А. Новичихин // Механизация строительства. – 2014. – № 11. – С. 32–35.
51. Тюремнов, И. С. Статистический анализ технических характеристик навесных экскаваторных виброплит / И. С. Тюремнов, Д. В. Федорова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. № 2 (66). – С. 122-133

52. Тюремнов, И. С. Уплотнение грунтов вибрационными катками : монография / И. С. Тюремнов, А. А. Игнатъев. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
53. Тюремнов, И. С. Уплотнение грунтов вибрационными плитами : монография / И. С. Тюремнов, А. А. Новичихин. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
54. Федоренко, И. Я. Управление движением в системах с сухим вибропреобразованным трением / И. Я. Федоренко, А. С. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета – 2009. – №5. – С. 68–71.
55. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – Москва : Лаборат. базовых знаний, 2001. – 616 с.
56. Хархута, Н. Я. Машины для уплотнения грунтов / Н. Я. Хархута. – Л.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
57. Хархута, Н. Я. Определение основных параметров трамбующих машин для уплотнения грунтов / Н. Я. Хархута, М. П. Костельов // Строительные и дорожные машины. – 1969. – № 11. – С. 11–14.
58. Шестопапов, А. А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.11 / Шестопапов Александр Андреевич. – Москва, 1988. – 440 с.
59. Шестопапов, А. А. Основные направления повышения эффективности уплотнения дорожно-строительных материалов / А. А. Шестопапов // Тез. докл. респ. конф. – Санкт-Петербург, 1992. – С. 49.
60. Вибрационная уплотняющая техника [Электронный ресурс] // Ремонт / Строительство / Интерьер [сайт]. – Режим доступа: <http://industrial-wood.ru/stroitelstvo-avtomobilnyh-dorog/10960-vibracionnaya-uplotnyayuschaya-tehnika.html>
61. Применение виброплиты: виды и характеристики [Электронный ресурс] // Atlas Copco [сайт]. – Режим доступа: <https://ac.tools/blog/primeneniye-vibroplity-vidy-i-karakteristiki/>

62. Adam, D. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) / D. Adam, F. Kopf // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. – 2004. – P. 97–106.
63. Adam, C. Modelling of the dynamic load plate test with the light falling weight device / C. Adam, D. Adam // Asian journal of civil engineering (building and housing). – 2003. – №4(2–4). – P. 73–89.
64. Anderegg, R. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors / R. Anderegg, A. von Felten Dominik, K. Kaufmann // ASCE Conf. Proc. GeoCongress – 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age Proceedings of GeoCongress – 2006. – P. 1–6.
65. Anderegg, R. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers / R. Anderegg, K. Kaufmann // Transportation Research. – Washington, D. C., 2004. – Record No. 1868. – P. 124–134.
66. Astrom, K. J. Advanced PID Control / K. J. Astrom, T. Hagglund. – North Carolina : The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 354 p.
67. Beards, C. F. Structural vibration: analysis and damping / C. F. Beards // First published in Great Britain by Arnold, a member of the Hodder Headline Group. – London, 1996. – 287 p.
68. Jonsson, A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine / A. Jonsson // Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology. – Sweden, 2001. – 24 p.
69. Mooney M. Stiffness Monitoring during Vibratory Compaction of Foundation Soil for Venice Lagoon Restoration Project / M. Mooney, N. M. Toohey, F. Carnevale // State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Conference: GeoCongress 2012. Geotechnical Special Publication. – 2012. – Vol. 5. №225. – P. 3159-3169.

70. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer. – London : Imperial College Press, 2006. – 564 p.
71. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules / A. O'Dwyer. – London : Imperial College Press, 2009. – 623 p.
72. Ryan, S. Intelligent compaction overview / S. Ryan // Proceedings of Idaho asphalt conference. – 2014. – 17 p.
73. Xu, S. Characteristics of Hamm oscillatory roller / S. Xu, J. Cui // Road Machinery & Construction Mechanization. – 2006. – № 8. – P. 25.
74. Yao, Y. S. Study on double-frequency composed vibrating compaction method based on resonance and antifriction principle / Y.S. Yao, Z.X. Feng, Y.W. Li // Adv. Mater. Res. – 2012. – № 402. – PP. 742–746.
75. Ziegler, J. G. Optimum settings for automatic controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Transactions of the American society of mechanical engineers. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
76. Stroy-Beton: официальный сайт [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://stroy-beton.com/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы на языке MATLAB

```
kf=3.2*10^6;
ks=300*10^6;
cf=96*10^3;
cs=2.026*10^6;
mf=32000;
mp=16000;
ms=0.4*mp;
f=27;
g=9.81;
omega=2*pi*f;
Fe=32*omega^2;
%% State Space Equation
%Coefficient A
A=[0 1 0 0; -(kf+ks)/(mp+ms) -(cf+cs)/(mp+ms) kf/(mp+ms) cf/(mp+ms); 0 0 0 1;
kf/mf cf/mf -kf/mf -cf/mf];
%%Coefficient B
B=[0 0; 1/mf 0; 0 0; 0 1/(mp+ms)];
%%Coefficient C
C=[eye(4,4)];
%%Coefficient D
D=[zeros(4,2)];
sys=ss(A,B,C,D)
sys1=tf(sys)
step(sys)
```

Результаты расчета в среде программы MATLAB

```
>> VibroPLITA20062020
```

```
sys =
```

```
A =
```

	x1	x2	x3	x4
x1	0	1	0	0
x2	-1.354e+04	-94.73	142.9	4.286
x3	0	0	0	1
x4	100	3	-100	-3

```
B =
```

	u1	u2
x1	0	0
x2	3.125e-05	0
x3	0	0
x4	0	4.464e-05

$$C = \begin{matrix} & x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ y3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ y4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

$$D = \begin{matrix} & u1 & u2 \\ y1 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 0 \\ y3 & 0 & 0 \\ y4 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Continuous-time state-space model.

sys1 =

From input 1 to output...

$$\begin{aligned} & 3.125e-05 s^2 + 9.375e-05 s + 0.003125 \\ 1: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \\ & 3.125e-05 s^3 + 9.375e-05 s^2 + 0.003125 s \\ 2: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \\ & 9.375e-05 s + 0.003125 \\ 3: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \\ & 9.375e-05 s^2 + 0.003125 s \\ 4: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \end{aligned}$$

From input 2 to output...

$$\begin{aligned} & 0.0001913 s + 0.006378 \\ 1: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \\ & 0.0001913 s^2 + 0.006378 s \\ 2: & \frac{\text{-----}}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06} \end{aligned}$$

$$3: \frac{4.464e-05 s^2 + 0.004229 s + 0.6043}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06}$$

$$4: \frac{4.464e-05 s^3 + 0.004229 s^2 + 0.6043 s}{s^4 + 97.73 s^3 + 1.391e04 s^2 + 4.922e04 s + 1.339e06}$$

Continuous-time transfer function.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Публикации

1) Прокопьев А.П., **Эстемиров Б.И.**, Поповиченко Е.П. Исследование динамики рабочего процесса вибрационной плиты с учетом массы дорожно-строительной смеси // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2019. Т. 4. С. 44-48.

2) Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., **Эстемиров Б.И.** Моделирование в пространстве состояний объекта неразрушающих технологий. Тандемные катки // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 3. С. 38-42.


3) Прокопьев А.П., **Эстемиров Б.И.**, Шведов А.И. Моделирование динамики дорожно-строительного процесса системы контроля уплотнения среды // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. (*проект не опубликован*)

4) **Эстемиров Б.И.** Моделирование в пространстве состояний объекта контроля уплотнения // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный-2020», посвященная Году памяти и славы (75-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов) в формате онлайн 23.05.2020 г. Секция: Строительные материалы и инновационные технологии строительства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра: «Строительные материалы и технологии строительства»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И.Г. Енджиевская

подпись, инициалы, фамилия

« 09 » 07 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Совершенствование рабочего процесса виброплиты при
уплотнении грунта»**

08.04.01 «Строительство»

08.04.01.07 «Комплексная механизация и автоматизация строительства»

Научный
руководитель


подпись

канд. техн. наук, доцент
ученая степень

А.П Прокопьев
И.О. Фамилия

Выпускник


подпись

СФ18-07М,
номер гр., зачетной книжки

Б.И. Эстемиров
И.О. Фамилия

Рецензент


подпись

докт. техн. наук, проф.
ученая степень

В.И. Иванчура
И.О. Фамилия

Нормоконтролер


подпись

канд. техн. наук, доцент
ученая степень

Е.С. Турышева
И.О. Фамилия

Красноярск 2020