

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет
Оренбургский государственный университет

**Р. Т. Емельянов, В.И. Жаданов, Г. В. Игнатьев,
И.С. Инжутов, А.П. Прокопьев**

**МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДОРОЖНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА**

Учебное пособие

Красноярск - Оренбург
СФУ - ОГУ
2017

УДК 625.066
ББК 39.311-044
К90

Рецензенты: А. В. Лещинский, д-р техн. наук, проф. (ТОГУ);
Кузнецов С. М., д-р техн. наук, проф. (НГУПС)

К90 Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий : учебное пособие / Р. Т. Емельянов, В. И. Жаданов, Г. В. Игнатъев, И.С. Инжутов, А. П. Прокопьев – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 132 с.

ISBN 978–5–7638–2284–7

Изложены методы исследования динамики рабочих процессов дорожно-строительных машин и разработка методик проектирования систем автоматического управления режимами. Представлены теоретические модели и методики моделирования технологических процессов. Математические модели использованы в качестве моделей объектов управления при разработке алгоритмов автоматического управления рабочими режимами.

Рассмотрены новые технические решения систем автоматического управления, алгоритмы функционирования адаптивных регуляторов и приведены результаты моделирования рабочих процессов при строительстве дорожных покрытий.

Предназначена для студентов, обучающихся по дисциплинам «Механизация и автоматизация строительства», «Строительные машины и оборудование» и других дисциплин в области строительных, дорожных машин и оборудования.

УДК 625.066
ББК 39.311-044

ISBN 978–5–7638–2284–7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий нежесткого типа.....	6
1.1. Научные предпосылки.....	11
1.2. Автоматизация асфальтоукладчиков.....	16
1.3. Автоматизация дорожных катков.....	27
1.4. Показатели качества автоматизации уплотнения.....	31
1.5. Выводы.....	36
2. Имитационное моделирование уплотнения асфальтобетонных смесей.....	37
2.1. Идентификация динамической системы уплотнения смеси дорожными катками.....	38
2.1.1. Имитационная динамическая модель уплотнения... ..	38
2.1.2. Результаты имитационного моделирования.....	47
2.2. Моделирование систем управления машинами дорожно-строительного комплекса.....	53
2.3. Имитационное моделирование автоматической системы управления рабочим органом асфальтоукладчика.....	62
2.3.1. Результаты имитационного моделирования.....	64
2.3.2. Структурно-параметрическая оптимизация. Выбор регулятора.....	78
2.3.3. Исследование абсолютной устойчивости системы с помощью критерия В. М. Попова	84
2.3.4. Выводы по разделу.....	87
2.4. Моделирование систем адаптивного управления укладкой и уплотнением дорожных покрытий нежесткого типа.....	88
2.4.1. Управление уплотнением смеси с применением тензометрических преобразователей.....	88
2.4.2. Пользовательский интерфейс программы моделирования.....	94
2.4.3. Моделирование динамического уплотнения при увеличении контактного давления на смесь.....	95
2.4.4. Моделирование регулятора частоты вращения вала гидродвигателя.....	97
3. Экспериментальное исследование устройства дорожных покрытий нежесткого типа.....	100
3.1. Исследование уплотнения смеси по ширине укладки.....	100

3.1.1. Постановка задачи исследования.....	102
3.1.2. Методика исследования.....	103
3.1.3. Результаты исследования.....	107
3.2. Исследование вибрационного формования инженерного обустройства автомобильных дорог.....	112
4. Реализация методов комплексной автоматизации процессов строительства асфальтобетонных покрытий.....	121
Заключение.....	128
Список литературы.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений повышения качества и долговечности покрытий нежесткого типа является комплексная автоматизация и управление технологическими процессами устройства покрытий за счет разработки систем управления машинами дорожно-строительного комплекса и их эффективного взаимодействия, на основе применения современных информационных технологий.

При устройстве покрытий нежесткого типа температура смеси является определяющей характеристикой, влияющей на основные эксплуатационные показатели покрытия. В зависимости от условий строительства конкретного объекта (конструкции, климатических условий, типа оборудования и свойств смесей) температура смеси должна быть в рекомендуемых интервалах, что оказывает влияние на выбор технологии.

Многофакторность технологических процессов строительства дорожных покрытий значительно усложняет задачу машинистов–операторов при управлении машинами, где основными операциями являются укладка и уплотнение смеси. Без автоматизации этих процессов невозможно обеспечение характеристик дорожных покрытий с учетом современных требований.

Развитие систем автоматического управления дорожно-строительными машинами определилось в направлении «интеллектуальных» автоматических систем управления. Достоинством таких систем является то, что они адаптивные и основаны не на математических моделях объектов управления. Несмотря на большое количество научных работ в области дорожного строительства существует много нерешенных задач, в том числе связанных с комплексной автоматизацией уплотнения смесей.

Учебное пособие имеет следующую структуру по главам:

глава 1 – научные предпосылки комплексной автоматизации; описание систем управления асфальтоукладчиков и дорожных катков; анализ критериев качества автоматизации уплотнения;

глава 2 – изложение теоретических подходов к идентификации динамической системы уплотнения асфальтобетонной смеси, имитационному моделированию автоматических систем управления рабочими процессами асфальтоукладчиков и дорожных вибрационных катков;

глава 3 – исследование уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки, вибрационного формования инженерного обустройства автомобильных дорог;

глава 4 – методы комплексной автоматизации процессов устройства дорожных покрытий нежесткого типа.

1. КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Автомобильные дороги имеют стратегическое значение для нашей страны. Федеральной целевой программой «Развитие транспортной системы России (2010 – 2015 годы)» предусмотрено значительное увеличение протяженности сети автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием. Дорожное строительство является одним из приоритетных направлений развития народного хозяйства Российской Федерации. Остроту этой проблемы подчеркнул Президент РФ 26 апреля 2007 г. (Послание Президента РФ Федеральному Собранию РФ): «Плохое состояние наших дорог, а порой и само их отсутствие является серьезным тормозом для развития. Ежегодная сумма экономических потерь оценивается более чем в 3 процента ВВП. Вспомним, что на всю оборону мы с вами тратим 2,7 процента ВВП в год...».

Для удовлетворения потребности в инновационном социально ориентированном развитии российской экономики и общества и оказания качественных конкурентоспособных транспортных услуг Министерством транспорта РФ разработана «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р. Цели поставленные Транспортной стратегией потребуют от всего комплекса дорожного строительства увеличения объемов дорожно-строительных работ, улучшения качества покрытий, развития проектной, нормативной и технической документации.

По состоянию на 2009 г. в России асфальтобетонные покрытия составляют 57 %, бетонные – 2 %, остальные типы покрытий – 41 % [30], т.е. дорожные покрытия нежесткого типа – наибольшая доля покрытий в стране.

С начала XXI века из-за значительного роста количества легковых и грузовых автомобилей, повышения интенсивности эксплуатации дорожных покрытий обострились проблемы в разных сферах дорожно-строительного комплекса (нормативные документы; проектирование автомобильных дорог; управление технологическими процессами дорожного строительства; эксплуатация готовых покрытий). Важнейшая цель всего технологического процесса – получить качественное дорожное покрытие.

Для решения текущих и перспективных задач управления дорожной отраслью наиболее эффективно использование системного подхода, как метода комплексного изучения сложных систем и процессов. Сложная система рассматривается с позиции системного подхода при условии, если

её можно условно или физически расчленить на более простые взаимосвязанные части. В свою очередь, каждую часть можно рассматривать как сложный объект, состоящий из более простых элементов.

Рассматривая технологический процесс строительства дорожного покрытия нежесткого типа с позиции системного подхода как сложную техническую систему и процессы, можно выделить следующие этапы, оказывающие влияние на формирование структуры асфальтобетона:

- 1) приготовление асфальтобетонной смеси;
- 2) укладка и уплотнение горячей смеси в дорожное покрытие;
- 3) эксплуатация асфальтобетонного покрытия.

Создание основного сооружения дорожного строительства – покрытия автомобильной дороги – происходит в технологическом процессе двух первых этапов. Третий обеспечивает поддержание рабочего состояния сооружения в период срока службы дорожного покрытия нежесткого типа и традиционно рассматривается как отдельная сложная организационно-техническая система.

Выход первой части системы характеризуется продуктом – горячей асфальтобетонной смесью соответствующей марки, имеющей температуру до 180 °С. Её транспортировка до объекта в каждом конкретном случае имеет свою специфику. Время на перевозку смеси от места производства до места укладки зависит от удаленности асфальтобетонного завода, интенсивности движения потоков автотранспорта, количества «дорожных пробок» в городских условиях. На этом этапе происходит остывание поверхностного слоя смеси в местах его контакта с воздухом и кузовом автосамосвала. Тяжелые фракции осаждаются на дне кузова автосамосвала, что приводит к образованию температурной и фракционной сегрегации (расслоению) смеси.

Визуально она проявляется в виде дефекта – полос разной шероховатости. В результате вместо качественного покрытия образуется неровная дорога с низкой прочностью и долговечностью. Температурную сегрегацию можно обнаружить лишь с помощью инфракрасной камеры. Из-за малой теплопроводности охлажденные до 70 – 80 °С слои (корки) вызывают образование недоуплотненных «пятен», повышенное влагонасыщение, пониженную прочность и сдвигоустойчивость.

Из многочисленных факторов, влияющих на долговечность дорожного покрытия, можно выделить два. Это ровность и однородная плотность дорожного покрытия. Учитывая современный высокий уровень автоматизированного производства, возможности получения качественных смесей, технические средства, устраняющие сегрегацию смеси на этапе её подачи в бункер укладчика, с технологической точки зрения для развития систем управления можно выделить второй период структурообразования дорожного покрытия нежесткого типа. Во время него формируется

структура асфальтобетона с эксплуатационными показателями дорожного покрытия (плотность, пористость, водонепроницаемость).

Вход второй части системы (технологические процессы укладки и предварительного уплотнения смеси рабочим органом укладчика, уплотнение её дорожными катками в различной комбинации) – продукт, т. е. горячая смесь, имеющая температуру до 160 °С; выход – дорожное покрытие нежесткого типа с заданным профилем и ровностью, и проектным (заданным) коэффициентом уплотнения K_y . Возмущение характеризуется многочисленными факторами изменения характеристик смеси, неровностью основания, отклонением плотности основания, режимами технологических процессов, динамики подсистем укладчика и дорожных катков и т. п.

Основные технологические процессы устройства дорожных покрытий нежесткого типа – укладка и уплотнение смеси – отличаются значительной сложностью, из-за влияния большого количества факторов действующих на динамической системы. Это температура смеси, окружающего воздуха, температурная и фракционная сегрегация смеси, толщина уплотняемого слоя, свойства уплотняемой среды при деформировании рабочими органами, значения коэффициента уплотнения после укладчика, релаксация асфальтобетонной смеси и другие. Идентификация такой стохастической динамической системы весьма затрудняется из-за нелинейности основных технологических процессов и вероятностного характера поведения обрабатываемой среды.

Конструкция автомобильных дорог представляет собой сложное инженерное сооружение, которое включает слои из материалов с различными физико-механическими свойствами: грунтов; каменных материалов; асфальто- и цементобетон. Наибольшее распространение получили следующие конструкции дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием (рис. 1.1) [32]: двухслойное на двухслойном основании, см. рис. 1.1, а; двухслойное на однослойном основании, см. рис. 1.1, б; однослойное асфальтобетонное покрытие на двухслойном основании, см. рис. 1.1, в.

Прочность и долговечность этого типичного многокомпонентного материала зависит от однородности его структуры, процесс формирования которой очень сложен и требует учета разнообразных факторов. Основные из них – *температурные параметры смеси* и *режим уплотнения*. Структура асфальтобетона, определяющая его прочность и долговечность, в значительной степени формируется в результате уплотнения. Сущность уплотнения заключается в увеличении количества связей в материале и их упрочнении. Чем больше насыщенность связями единицы объема материала и прочнее эти связи, тем прочнее слой из асфальтобетона [31]. В современных условиях основным средством окончательного уплотнения до-

рожно-строительных материалов на линейных объектах являются катки различных типов.

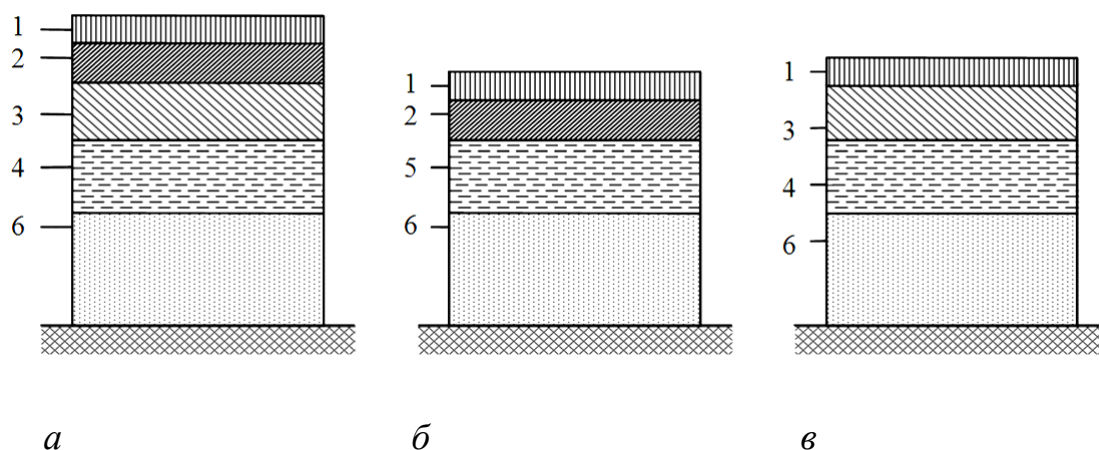


Рис. 1.1. Конструкции дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием:
1 – верхний слой покрытия; 2 – нижний слой покрытия; 3 – верхний слой основания;
4 – нижний слой основания; 5 – слой основания; 6 – дополнительный слой основания

Несмотря на большую практику использования технологии уплотнения и значительный объем научно-исследовательских работ по изучению уплотняющей техники, единый подход к оценке требуемых и достигнутых результатов, отсутствует. Анализ современных средств механизации, методов контроля качества дорожных работ, нормативных документов на проектирование и строительство дорог позволяет сделать вывод о необходимости совершенствования критериев уплотнения.

Укладка и уплотнение асфальтобетонной смеси выполняется комплектом дорожно-строительных машин «асфальтоукладчик (с различной компоновкой рабочих органов, например трамбующий брус, выглаживающая виброплита, прессующие планки) – дорожные катки (статические; вибрационные)». Для обеспечения качества строительства дорожного покрытия нежесткого типа в процессе укладки и уплотнения необходимо учитывать большое число технологических и режимных факторов: скорость движения асфальтоукладчика и дорожных катков; температуру поверхности покрытия; заданную ровность; параметры трамбования и вибрации; плотность дорожного покрытия; коэффициент уплотнения. А потому требуется управлять процессами динамической технической системы в условиях априорной неопределенности, характеризующихся нелинейностью основных зависимостей рабочего процесса.

Асфальтоукладчики оснащаются автоматизированными системами управления (АСУ), обеспечивающими необходимый профиль и ровность покрытия. Но современные укладчики не имеют подсистемы автоматического управления процессом уплотнения. Практика дорожного строительства показала, чем выше плотность асфальтобетона после укладчика, тем ровнее и долговечнее готовое асфальтобетонное покрытие. Уплотняющая способность асфальтоукладчиков, а также машин с аналогичными уплотняющими органами, реализующих технологии «reshore», «regrip», «grave», «remix», «remix+», по данным исследований зарубежных и российских ученых позволяет добиться максимального (нормативного) коэффициента уплотнения, но ручное управление этим процессом является неэффективным из-за отсутствия приборов текущего контроля степени уплотнения и большой нагрузки на машиниста-оператора.

На дорожных катках оператор должен подбирать режимы, учитывая текущую температуру асфальтобетонного покрытия, чтобы вовремя изменять давление, скорость движения, направление, амплитуду и частоту вибрации, прогнозировать число проходов, плавность переходов на реверсирование при переходе на другую полосу. Сложность ручного управления дорожными катками заключается в том, что значения всех этих параметров надо правильно подобрать, чтобы каток работал в оптимальном режиме и обеспечивал заданный коэффициент уплотнения. Оператор в таких условиях делает много ошибок. Решение задачи может быть достигнуто только при автоматизации.

Зарубежные производители вибрационных катков предлагают АСУ процессом уплотнения (Asphalt Manager фирмы Bomag), контрольно-измерительные системы (ACE – Ammann Compaction Expert компании AMMANN) и другие АСУ, адаптированные к своим типам вибрационных катков. Эти и другие аналогичные системы позволяют осуществлять непрерывный контроль за степенью (коэффициентом) уплотнения, настраивать амплитуду и частоту колебаний вальца в зависимости от скорости дорожного катка и температуры поверхности асфальтобетона.

Результаты работы дорожных катков с современными АСУ не гарантируют получение качественных асфальтобетонных покрытий: брак составляет до 65 % [14]. Основные проблемы: отсутствие автоматизации управления при реверсировании, плавности перехода с одной полосы на другую; отсутствие учета изменения температуры при управлении процессом уплотнения. В Российской Федерации производство дорожных катков растет. Автоматические системы управления процессом уплотнения на современные дорожные катки отечественного производства не устанавливаются.

Необходимость выполнения научной работы по совершенствованию систем управления дорожно-строительными машинами, комплексной автоматизации технологических процессов диктуется наличием нерешенных научно-исследовательских задач аналитического описания процесса уплотнения различных сред для управления процессами, совершенствования систем управления технологическими процессами устройства дорожных покрытий нежесткого типа на основе достижений научно-технического прогресса.

Идея работы заключается в комплексной автоматизации и управлении технологическими процессами устройства дорожных покрытий нежесткого типа за счет разработки системы управления машинами базового дорожно-строительного комплекта «асфальтоукладчик – дорожные катки», их эффективного взаимодействия на основе применения современных технических средств, интеллектуальных и информационных технологий.

Концепция (теория) научной работы. Разработка методов автоматизированного управления дорожно-строительными машинами «асфальтоукладчик – дорожные катки», обеспечивающих укладку и уплотнение смесей, заключается в том, что режимные параметры машин подстраиваются (адаптируются) под изменяющиеся условия технологических процессов с учетом характеристик дорожно-строительных материалов, других возмущающих факторов для соблюдения заданной степени уплотнения асфальтобетонной смеси, являющейся косвенной гарантией долговечности дорожного покрытия, без непосредственного участия человека-оператора, что увеличивает эффективность работ, повышает эксплуатационные показатели, продлевает сроки службы дорог.

Цель работы – развитие методологии комплексной автоматизации и управления основными технологическими процессами устройства дорожных покрытий нежесткого типа.

1.1. Научные предпосылки

Асфальтобетонные смеси, используемые при дорожном строительстве, в большинстве случаев соответствуют современным требованиям нормативных документов.

На качество асфальтобетонных смесей и асфальтобетона существенное влияние оказывают все элементы производственно-технологического комплекса:

– *состав асфальтобетонной смеси*, т. е. характеристики ее компонентов (крупный заполнитель, т. е. щебень, мелкий заполнитель, т. е.

песок, минеральный порошок, битум и добавки) и вариация этих показателей;

– *производственные факторы*: хранение; предварительное дозирование песка и щебня; сушка песка и щебня в сушильном барабане; сортировка компонентов по фракциям; дозирование всех компонентов смеси; приготовление смеси в смесителе; подача готовой смеси на склад;

– *транспортировка в автосамосвалах, укладка и уплотнение асфальтоукладчиками, дорожными катками.*

В России асфальтобетонные заводы имеют разные источники (месторождения, предприятия) исходных материалов (отличающиеся по основным характеристикам), различный технический уровень оборудования и технологии производства. Не следует забывать, что физический износ оборудования, например, дозаторов, приводит к ухудшению качества и, как следствие, к значительному колебанию величины прочности асфальтобетона.

В каждом конкретном случае транспортировка смеси отличается по дальности, времени доставки с учетом проблем, скорости движения (например, из-за «автомобильных пробок»), температуре окружающей среды, грузоподъемности и конструкции автосамосвалов и другим параметрам. Укладка и уплотнение смеси выполняется асфальтоукладчиками и дорожными катками различных моделей.

Очень часто для обеспечения высокого качества строительства покрытия необходимо учитывать большое число факторов, руководить процессами сложной технической системы в условиях неопределенности, характеризующейся сложностью описания уплотняемой среды, нелинейностью основных зависимостей рабочего процесса.

Для решения этой задачи важно уменьшить число факторов технологического процесса «производство – укладка и уплотнение асфальтобетонной смеси». Можно предположить, что факторы этапа дорожного строительства – укладка и уплотнение – являются основными, при различных значениях показателей компонентов, производства и транспортировки. Обеспечить качество готового асфальтобетонного покрытия, независимо от характеристик поступающей на объект смеси, можно, изменяя следующие режимные параметры комплекта дорожно-строительных машин «асфальтоукладчик – дорожные катки»: частоту вращения эксцентрикового вала трамбуемого бруса; величину хода трамбуемых брусьев; частоту вибрации выглаживающей плиты; частоту вибрации вальцов; скорость дорожных катков; амплитуду колебания вальцов; направление вибрации вальцов. Тогда задача адаптивного управления технологическими процессами упрощается.

Важным качественным показателем работы асфальтоукладчика является достигнутая степень уплотнения асфальтобетонной смеси, т. к. от

этого зависит не только подбор необходимых типов и количества катков для последующей ее укатки, но и технологические приемы выполнения операции уплотнения. Практика дорожного строительства показала, что чем выше плотность асфальтобетона после работы укладчика, тем ровнее и долговечнее готовое асфальтобетонное покрытие.

В зависимости от коэффициента уплотнения количество катков, идущих за укладчиком, можно сокращать, что способствует росту производительности дорожного строительства, снижению себестоимости покрытия. Но полностью исключить их использование при существующих технологиях нельзя, т. к. они нужны для закрепления достигнутого значения коэффициента уплотнения смеси и повышения структурной прочности асфальтобетона за счет усиления распора его частиц с одновременным поддержанием повышающейся клеящей способности битума при понижении его температуры.

Исследованием технологических процессов строительства асфальтобетонных покрытий занимаются ученые и коллективы различных учебных, научно-исследовательских организаций. Научные основы исследований взаимодействия рабочих органов уплотняющих машин с дорожно-строительными материалами заложили отечественные такие ученые: В. Ф. Бабков, В. И. Баловнев, Н. Я. Хархута, О. Т. Батраков, А. К. Бируля, Н. Н. Вошинин, Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горельшев, В. В. Дубков, М. П. Костельов, Н. Н. Иванов, В. Б. Пермьяков, А. А. Шестоपालов, С. Н. Иванченко, А. В. Захаренко, А. А. Иноземцев, А. Я. Калужский, И. В. Королёв, М. Н. Летошнев, И. А. Рыбьев, А. М. Холодов, М. А. Завьялов, А. Ф. Зубков, Г. В. Кустарев и другие. Из зарубежных учёных следует отметить работы П. Бёмера, Л. Форсблада, Д. Вайта, М. А. Муни, Р. Андирега, К. Кауфманна, Д. Адама и других.

Полученные авторами теоретические и эмпирические зависимости позволяют решать задачи прикладных научных исследований и проектирования конструкций машин, установления усилий в металлоконструкциях и т. п. Но при разработке системы автоматического управления, использование математических моделей имеет существенные недостатки, учитывая сложность и неопределенность параметров процессов устройства покрытий, стохастические свойства динамической системы (в алгоритмах программного обеспечения).

Идентификация дорожно-строительной машины (например, асфальтоукладчика), как нелинейного дискретно-непрерывного динамического объекта представляет собой задачу, с которой сталкиваются разработчики управляемых систем такого класса. Закон управления рабочим процессом в зависимости от показаний датчиков, должен быть заранее определен на основании анализа математической модели динамики объекта – движения трамбующего бруса и вибрационной плиты укладчика в тех или иных

возможных условиях – и записан в контроллере. Возникает необходимость разработки математической модели объекта и получения ее обратного решения, которое показывает, какие воздействия следует развить рабочему органу, чтобы в текущих условиях настроить режимные параметры объекта в соответствии с заданным (желаемым) состоянием уплотнения смеси.

Обычно математическая модель динамического объекта представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают движение как твердотельных элементов рабочего органа, так и его осциллирующих элементов. Значения коэффициентов устанавливаются по результатам экспериментальных испытаний. Проблема состоит в том, что создать *точную* математическую модель асфальтоукладчика, дорожного катка с уплотняющим рабочим органом, воздействующим на смесь, можно, но со значительным количеством допущений. Применение системного подхода с целью учета основных элементов укладчика (дорожного катка), делают его математическую модель избыточно сложной.

Задача усложняется из-за того, что свойства реального асфальтоукладчика постоянно изменяются даже в течение одной смены. В их числе его масса, которая изменяется в результате колебания массы асфальтобетонной смеси в бункере: температурный режим уплотнения; характеристики основания, на которое укладывается покрытие (плотность, ровность) и т. п. Поэтому любая зафиксированная математическая модель, в целом, оказывается неточной, а качество управления, следовательно, имеет предел.

Сравнительно недавно, в 2005 г., была подготовлена диссертационная работа, посвященная созданию методологической основы для комплексной автоматизации производства асфальтобетонной смеси с учетом процессов её транспортировки, укладки и уплотнения на основе современных информационных технологий. Её автор – А. И. Доценко [3]. Он впервые предложил комплексную автоматизацию производства смеси, учитывающую результаты работы машин этапа дорожного строительства – укладки и уплотнения асфальтоукладчиком, и дорожными катками, которые оказывают существенное влияние на конечное качество покрытия.

На основе современных средств автоматики и автоматизации, автор выдвинул технологию, предполагающую своевременное информирование дирекций асфальтобетонных заводов (АБЗ) о возникающих дефектах во время укладки и уплотнения смеси, в целях оперативной корректировки рецептуры смеси и технологии ее производства. Такая идея является очень привлекательной, но для отрасли Российской Федерации по производству дорожно-строительных материалов характерно большое отличие технического уровня и состояния оборудования АБЗ в регионах, а также отсутствие предприятий полного цикла: от производства асфальто-

бетонной смеси до получения готового асфальтобетонного покрытия, где можно было бы внедрять комплексную систему управления качеством смеси. Известно, что контракты на дорожно-строительные работы заключаются с дорожниками по результатам открытых тендеров. В текущем (2011) году налицо отсутствие производственных, технических и коммерческих возможностей для внедрения в России подобной системы.

Следовательно, можно сделать вывод *о необходимости* разработки системы автоматизированного управления комплектом машин («асфальтоукладчик – дорожные катки»), которая должна, независимо от качества подаваемой асфальтобетонной смеси, адаптировать режимы технологического процесса и обеспечивать рациональные качественные характеристики готового покрытия (в конкретных условиях).

Авторами многих работ, см., например, [28], было установлено, что варьирование режимов асфальтоукладчика (скорость движения, режимные параметры работы трамбуемого бруса и плиты) оказывает большое влияние на степень предварительного уплотнения различных смесей. Получены нелинейные зависимости коэффициента уплотнения от скорости движения, частоты трамбования, типа смеси.

Значительные по объему экспериментальные исследования уплотняющих рабочих органов проведены в НПО «ВНИИСтройдормаш». Они проводились на стенде-укладчике, оборудованном тензометрической аппаратурой, при уплотнении аналога песчаной асфальтобетонной смеси типа «Д». Вид полученных зависимостей – нелинейный, что подтверждается результатами научных исследований В. Б. Пермякова, С. Н. Иванченко и других авторов [8, 13, 17, 19, 27].

В этих работах смеси рассматриваются как *упруго-вязко-пластичный материал*, свойства которого зависят от скорости деформирования и уровня напряженного состояния в уплотняемом слое. Один цикл уплотнения смеси асфальтоукладчиком представляет собой несколько ударов трамбуемого бруса (при скорости 3,2 м/с и частоте трамбования 1300 с^{-1} , т. е. около пяти ударов ударной части бруса размером 12 мм), после которых достигается требуемая степень уплотнения смеси. При постоянной скорости $v = \text{const}$ цикл уплотнения характеризуется как одинаковый промежуток времени, за который, в зависимости от частоты трамбования, будет происходить несколько ударов. Научно-технической задачей является разработка системы автоматического управления процессом, которая должна обеспечивать необходимую (заданную) степень уплотнения за этот промежуток времени без участия оператора.

Развитие цифровых компьютерных технологий, их внедрение в разные отрасли отразилось и на дорожно-строительных машинах. Ведущие производители машин предлагают дорожным строителям вибрационные катки с «интеллектуальным уплотнением» (Intelligent Compaction – IC), в

которых выходная мощность регулируется автоматически, что исключает «недоуплотнение» и «переуплотнение» материала. Фирмы Ammann, Bomag и Дунарас [1] выпускают машины с системой IC, готовые к работе на грунте и щебёночных основаниях, причём у первых двух фирм есть такие модели и для асфальтобетона. Фирма Caterpillar официально представила грунтовой каток с системой IC в 2007 году, а асфальтовую модель – примерно через год. Фирма Sakai вышла на североамериканский рынок с катками IC обоих типов в 2008 году, а фирма Дунарас разрабатывает асфальтовую машину, которая скоро поступит в продажу в Западную Европу, а затем – и на мировой рынок. Эти события указывают на следующую основную тенденцию: обеспечить максимальное уплотнение грунтового основания и асфальтобетонного покрытия дорожными катками.

Но, как было отмечено выше, для получения необходимого качества дорожного покрытия важнее обеспечение рациональной степени предварительного уплотнения смеси, получаемой после прохождения асфальтоукладчика. Следовательно, развитие систем автоматического управления дорожно-строительными машинами определилось в направлении «интеллектуальных» АСУ, с чем согласны авторы настоящей работы.

В соответствии с методом системного анализа представляются актуальными разработка и исследование комплексной системы автоматизированного управления комплектом дорожно-строительных машин «асфальтоукладчик – дорожные катки», управляющие системы которых строятся не на основе математических моделей, а на основе подходов, характерных для задач анализа «чёрного ящика». Это подходы, использующие экспертные системы, нечеткую логику, искусственные нейронные сети, гибридные системы и т. п. Достоинством таких систем является то, что они адаптивные и основаны не на математических моделях объектов управления. При этом закон управления выводится либо в результате автоматического обучения по информации с датчиков, либо в результате записи в управляющую систему знаний человека-эксперта (в формализованном виде).

1.2. Автоматизация асфальтоукладчиков

Технологическая настройка укладчиков призвана обеспечить наиболее высокое качество укладки и предварительного уплотнения, слоев асфальтобетонного основания или покрытия и, по существу, является важным элементом системы управления качеством асфальтобетонных работ на дороге [12]. Она осуществляется перед началом рабочих операций

и ведется с учетом конструктивных и технологических возможностей и особенностей выбранного укладчика, а также заложенных в проект производства работ (ППР) приемов выполнения и контроля этих операций. Самыми важными и потому непрерывно контролируруемыми являются 5 показателей основания или покрытия (еще до начала работы катков):

- ширина полосы укладки;
- поперечный уклон поверхности слоя укладки;
- начальная толщина уложенного слоя;
- степень предварительного уплотнения;
- ровность поверхности уложенного слоя.

Первые три показателя (нормы отклонения от проекта) задаются проектом и СНиПом 3.06.03-85 «Автомобильные дороги». Правда, заказчика интересует *фактическая* толщина слоя готового покрытия, а не ее значение в рыхлом слое. Два же последних показателя (степень предварительного уплотнения и ровность после прохода укладчика) не задаются проектом и не нормируются СНиПом, но без знания их начальных значений невозможно управлять процессом укладки и обеспечить требуемые проектом и СНиПом конечные параметры по плотности, толщине слоя и ровности готового основания или покрытия.

С шириной полосы укладки и заданием поперечного уклона трудностей и проблем практически не возникает при условии, что операторы рабочего органа укладчика периодически, но непрерывно и в течение всего процесса контролируют их с помощью уровня на 3-метровой рейке.

Степень предварительного уплотнения слоя сразу после прохода укладчика. Это важный качественный показатель действия рабочего органа укладчика, ибо от него зависит не только подбор необходимых типов и количества катков для последующей укатки смеси, но и технологические приемы выполнения этой важной и сложной операции. Практика также показала, чем выше плотность смеси после прохода укладчика, тем ровнее готовое покрытие.

Рабочие органы асфальтоукладчиков обеспечивают *профилировку, уплотнение смеси и отделку поверхности*. В качестве уплотняющего оборудования на современных асфальтоукладчиках применяют систему «брус – плита» [15]. Комбинации элементов «трамбуемый брус», «качающийся брус», «прессующие планки», «статическая плита», «виброплита» в различных сочетаниях дают все многообразие известных систем рабочих органов. Наибольшее распространение в настоящее время получили рабочие органы с трамбуемыми брусками и выглаживающей плитой.

По характеру колебания различают системы с качающимися брусками, которые колеблются в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном направлению движения асфальтоукладчика, с одновременным перемещением в горизонтальном и вертикальном

направлении и с трамбуемым брусом, который колеблется в вертикальной плоскости. Последняя получила наибольшее распространение.

Привод рабочих органов гидравлический, что позволяет бесступенчато регулировать режимы работы. Приоритетное применение объёмного гидропривода объясняется рядом его преимуществ: простота индивидуального привода; большой диапазон бесступенчатого регулирования скорости; простота реверсирования движения; высокий коэффициент полезного действия (КПД); низкие эксплуатационные затраты и др. Это позволяет упростить компоновку асфальтоукладчика и подобрать наилучший режим при изменении условий работы (вид материала, толщина слоя и скорость движения асфальтоукладчика). Наибольшее распространение получили *гидроприводы с дроссельным регулированием*. Однако они имеют сравнительно низкий КПД, что является их *основным недостатком*.

Фирма АВГ на асфальтоукладчиках типа «Титан-511», «Титан-411», «Титан-311», «Титан-355», имеющих производительность укладки 500 т/ч и более, устанавливает, кроме рабочего оборудования по типу «трамбуемый брус – виброплита», рабочий орган повышенного предварительного уплотнения, который состоит, см. рис. 1.2, из трамбуемого бруса 1 предварительного уплотнения, трамбуемого бруса 2 окончательного уплотнения и виброплиты 3.

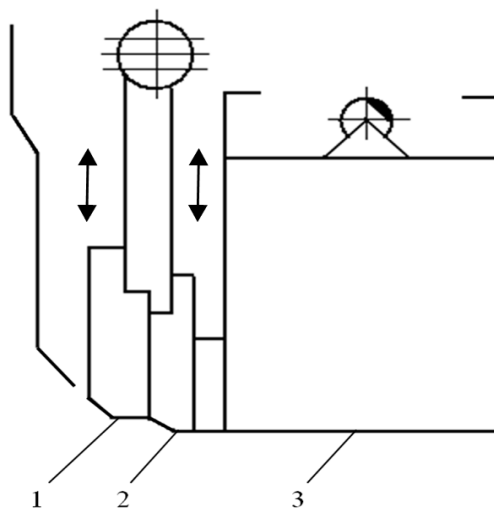


Рис. 1.2. Схема уплотняющего рабочего органа повышенного предварительного уплотнения: 1 – трамбуемый брус предварительного уплотнения; 2 – трамбуемый брус окончательного уплотнения; 3 – виброплита

Отличительной особенностью данной конструкции является её *простота в сочетании с высокой уплотняющей способностью*. Недостатком такого уплотняющего рабочего органа можно считать лишь *вертикальное воздействие* на асфальтобетонную смесь, что является

энергоёмким процессом при повышенном сопротивлении передвижению укладчика.

Известна конструкция рабочего органа повышенного уплотнения, рис. 1.3 [2, 15], который устанавливается на асфальтоукладчике «Супер-1700» фирмы «Фегеле» (ФРГ). Рабочий орган состоит из двух агрегатов: для предварительного и дополнительного уплотнения. Первый включает трамбовку 1 и виброплиту 2. Планка трамбовки движется вниз и вверх с помощью эксцентрикового вала. Второй следует за агрегатом предварительного уплотнения и представляет собой расположенные друг за другом прессующие планки 3, и виброплиту 4. Прессующие планки 3 прижимаются поршнями цилиндров к покрытию. Давление прессования зависит от опорной поверхности планки и возмущающей силы, передающей на неё импульсы давления.

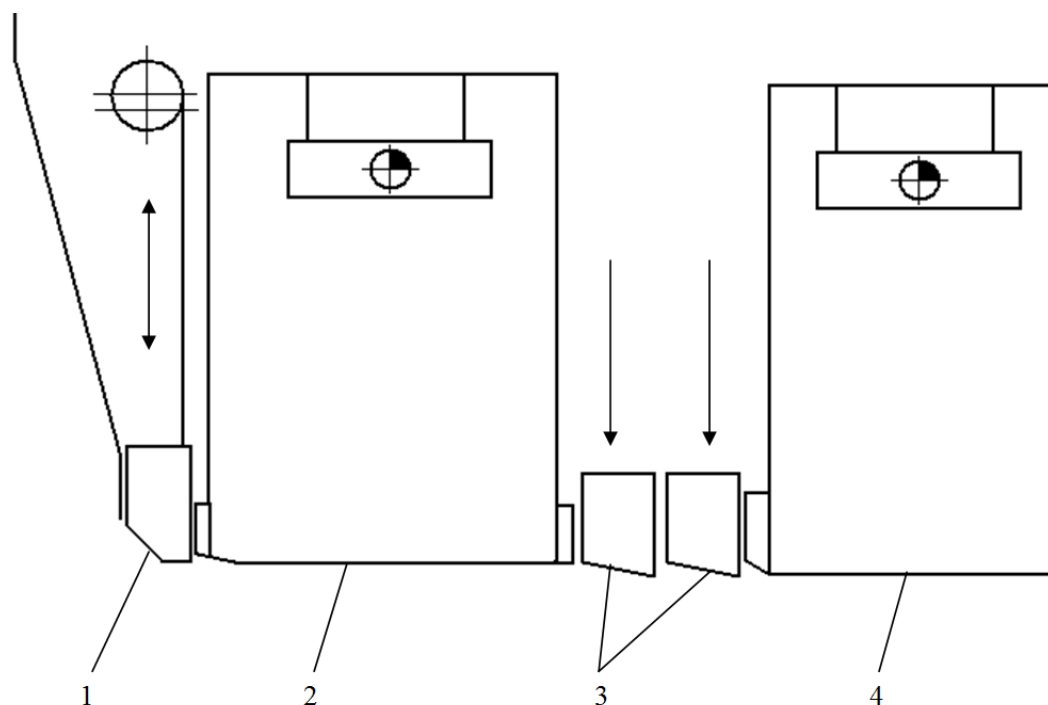


Рис. 1.3. Схема уплотняющего рабочего органа повышенного уплотнения:
1 – трамбовка; 2 – виброплита; 3 – прессующие планки; 4 – виброплита

Давление изменяется в пределах 5 – 15 МПа и регулируется дросселем; частота импульсов находится в пределах 35 – 70 Гц и зависит от частоты вращения золотника. Таким образом, возмущающая сила зависит как от давления в гидросистеме, так и от ускорения, которое приобретают планки при движении вниз. Благодаря ускорению возмущающая сила превышает массу прессующих планок.

К достоинствам такого конструктивного исполнения рабочего органа асфальтоукладчика следует отнести возможность получения стандартной плотности при работе с асфальтобетонной смесью типа А (ГОСТ 9128-84) при скорости 3 м/мин [24] и экономию трудовых и энергетических ресурсов в этих условиях за счет исключения из технологической цепи средних и тяжелых дорожных катков. Но недостатков у такого рабочего органа значительно больше чем достоинств. Ими являются следующие: большая масса и сложность конструкции; высокие эксплуатационные затраты (по сравнению с отечественными асфальтоукладчиками более чем в 6 раз [24]); коэффициент уплотнения смеси повышается в среднем лишь на 0,02 (в сравнении с данными, полученными при уплотнении рабочим органом предварительного уплотнения), что недостаточно, чтобы исключить применение средних и тяжелых катков; некачественное уплотнение из-за наличия прессующих планок, которые при поступательном движении не отрываются от материала и тем самым нарушают сплошность покрытия; большая энергоёмкость (пять уплотняющих элементов); высокая чувствительность к нарушению рецептуры материала; отсутствие надёжного механизма регулирования и настройки режимов работы каждого из уплотняющих элементов в зависимости от изменения свойств материала [2, 24].

На современных асфальтоукладчиках фирма Vögele устанавливает раздвижной рабочий орган высокого уплотнения, содержащий трамбуемый брус, виброплиту и две прессующие планки, рис. 1.4.

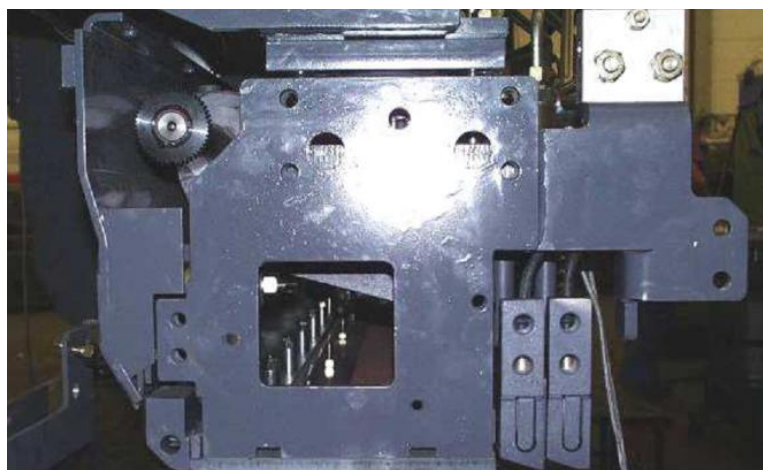


Рис. 1.4. Схема уплотняющего рабочего органа производства фирмы Vögele (URL: www.wirtgenamerica.com)

В табл. 1.1 и 1.2 представлены рекомендации фирм Vögele и IR-ABG по технологической настройке рабочих органов их укладчиков. При сравнении данных таблиц следует обратить внимание на два

обстоятельства. Во-первых, фирма IR-ABG, в отличие от фирмы Vögele, достаточно определенно увязывает все параметры трамбуемого бруса и выглаживающей плиты с указанными диапазонами значения толщины слоев асфальтобетона и других материалов, укладываемых в дорожную одежду. Во-вторых, технологические параметры трамбующих брусьев (ход, частота) и выглаживающих виброплит (частота) имеют заметные различия в трактовке рекомендаций Vögele и IR-ABG, что обусловлено устройством самих машин.

Таблица 1.1

Рекомендации фирмы Vögele по технологической настройке рабочего органа укладчиков

Тип укладываемого слоя	Скорость укладки, м/мин	Трамбующий брус		Выглаживающая виброплита		Прессующие планки	
		ход, мм	частота, уд./мин	давление, бар	частота, мин ⁻¹	давление, бар	частота, Гц
Верхний (износа)	более 5	2-4	300-800	50-80	1200-2000	45-70	58-68
Нижний (несущий)	4-10	4	800-1200	70-90	1500-2500	60-90	59-68
Основание	2-6	4-7	1200-1600	80-100	2000-3000	90-110	58-68

Таблица 1.2

Рекомендации фирмы IR-ABG по технологической настройке рабочего органа укладчиков с двойным трамбуемым брусом

Технологические параметры	Нижний и верхний слой асфальтобетонного покрытия	Несущий слой асфальтобетонного покрытия (основания)	Влажные связные и несвязные несущие слои основания	Гранулированные щебеночные несущие слои основания
Толщина укладки	35 – 100 мм	80 – 100 мм	150 – 250 мм	150 – 250 мм
Скорость укладки	3 – 5 м/мин	2 – 5 м/мин	1,2 – 5 м/мин	1,2 – 4 м/мин

Окончание табл. 1.2

Технологические параметры	Нижний и верхний слой асфальтобетонного покрытия	Несущий слой асфальтобетонного покрытия (основания)	Влажные связные и несвязные несущие слои основания	Гранулированные щебеночные несущие слои основания
Величина хода трамбуемого бруса: спереди	6 мм; 0 мм	9 мм или 12 мм	12 мм	12 мм
сзади	5 мм; 5 мм	5 мм	5 мм или 9 мм	5 мм или 9 мм
Частота ударов трамбуемого бруса	15 – 25 Гц	25 Гц	25 Гц	25 Гц
Частота вибрации выглаживающей плиты	40 – 70 Гц	70 Гц	70 Гц	70 Гц

Ровность дорожного покрытия. Этот показатель обеспечивает автоматическая система управления, которая контролирует высоту и уклон выравнивающей плиты асфальтоукладчика, обеспечивает точность распределения покрытия и его соответствие проектной толщине. Для автоматизации работы асфальтоукладчиков применяются АСУ зарубежного и российского производства.

Система автоматического управления «Рельеф-01М» (Россия) [35] предназначена для стабилизации рабочего органа в продольной и поперечной плоскостях. «Рельеф-01М» состоит из пульта управления (ПУ), блока управления, регулятора уклона S 276М (РУ), регулятора высоты G 176М (РВ). Регулятор высоты G 176М и регулятор уклона S 276М вырабатывают сигнал ошибки положения плиты по отношению к нивелировочному тросу, определяющему продольный профиль дороги, и заданному углу наклона. Блок управления вырабатывает сигналы ошибки, поступающие с датчиков высоты и угла, и включает левый и правый гидроцилиндры асфальтоукладчика, возвращающие плиту в заданное положение.

На пульте управления расположен тумблер включения питания системы, тумблер переключения режимов работы «ручной – автомат», индикатор включения питания, индикатор исправности системы. Установка

необходимого порога чувствительности системы в продольной и поперечной плоскостях, а также требуемого угла наклона дорожного полотна осуществляется непосредственно с датчиков.

Современные АСУ реализуют передовые технологии измерений, передачи информации и различные системы позиционирования. Всё большее применение в практике дорожного строительства находят бесконтактные системы, работающие на принципе сканирования поверхности лазерным лучом (IR-ABG) или ультразвуком (Moba, Vögele).

Системы АСУ, разработанные фирмой Moba, устанавливаются на моделях асфальтоукладчиков различных производителей в разных странах. Некоторые компании разрабатывают *свои собственные* системы. Так, Vögele создала свою ультразвуковую АСУ, Niveltronic, а американская Terex комплектует укладчики системой Topcon Paver Sistem. При этом бесконтактные «лыжи» снабжаются пакетами ультразвуковых датчиков, что значительно повышает ровность получаемого покрытия.

Достоинства этих систем заключаются не только в увеличении ровности, но и в простоте монтажа. «Лыжа» с датчиками сканирования располагается непосредственно на асфальтоукладчике, перемещается вместе с ним и не требует перестановки оборудования в процессе работы, как это происходит с традиционными копирными устройствами.

Примером расширения функций систем автоматического нивелирования за счет подключения 3D-управления является Navitronic® Plus, разработанная компанией Vögele, которая встраивается в систему Niveltronic® Plus.

Перечислим датчики, используемые в Niveltronic® Plus, при нивелировании.

1. **Регулируемый механический датчик высоты.** В нем объединяются преимущества ультразвукового датчика и высокая точность механического датчика высоты. Может использоваться со щупами в виде лыж длиной 0,30 м, 1 м и 2 м, скобы для слежения за копирной струной или буксируемой трубы, скользящей, как лыжа, непосредственно по поверхности.

2. **Ультразвуковой датчик высоты.** Универсален в применении, не требует демонтажа при переходе укладчика с одного места работы на другое.

3. **Датчик Big-MultiPlex-Ski.** Расширяет возможности ультразвукового слежения за поверхностью. Представляет собой комбинацию трех ультразвуковых датчиков, закрепленных на одной балке длиной до 13 м. Благодаря усреднению данных нескольких датчиков может использоваться на поверхностях с волнообразными неровностями большой протяженности, которые не могут быть выявлены отдельным датчиком.

4. **Лазерный приемник.** При нивелировании с ним высота укладки рассчитывается по результатам приема луча лазера. Лазерный приемник особенно удобен при работе на больших площадях (с постоянным уклоном в обоих направлениях). При этом вращающийся луч лазера точно формирует плоскость, которая играет роль искусственной базы и фиксируется лазерным приемником, монтируемым на несущем рычаге рабочего органа укладчика.

5. **Navitronic® Plus.** Трехкоординатная система Navitronic® Plus расширяет систему управления Niveltronic® Plus на третью координату. В результате, с помощью картографических данных можно автоматически управлять не только толщиной слоя, но и шириной укладки и направлением движения укладчика. Бесконтактная система нивелирования и навигации может работать с навигационными системами различных изготовителей. Для позиционирования используются лазерные станции общего назначения и система mmGPS.

Основной элемент в системе 3D-управления – цифровая система позиционирования – подключается к Navitronic® Plus через открытый порт, который позволяет выбрать оптимальную для конкретного случая систему. При этом не имеет значения, какая система подключается, *т. е.* оптическая система с общей лазерной станцией и призмой или спутниковая система навигации с GPS-приемником в комбинации с лазерным приемником, таким как mmGPS фирмы TopCon [36].

В состав системы нивелировки **Topcon mmGPS** для асфальтоукладчика входят двухсистемный Глонасс/GPS-приемник, блок управления **GX-60** на базе Windows XP для работы с 3D-цифровыми проектами, а также специальное лазерное оборудование, обеспечивающее точное получение высотных отметок.

Во всех перечисленных выше АСУ, а также системах, работающих на других принципах действия, исполнительным механизмом служат гидроцилиндры, управляющие точкой крепления тяговой балки (качающегося рычага) к раме асфальтоукладчика, рис. 1.5, 1.6. Другим концом тяговая балка опирается на выглаживающую плиту, которая скользит по укладываемому слою асфальтобетонной смеси и устанавливается под определенным углом наклона к горизонтальной плоскости (так называемым углом атаки). Для изменения толщины покрытия в продольном направлении изменяют угол наклона выглаживающей плиты в вертикальной плоскости.

Существующие автоматические системы управления асфальтоукладчиков обеспечивают высокое качество ровности, нивелирование дорожного покрытия, но не имеют подсистем управления процессом уплотнения, что является большим недостатком, т. к. при этом используется субъективная настройка режимов уплотнения.

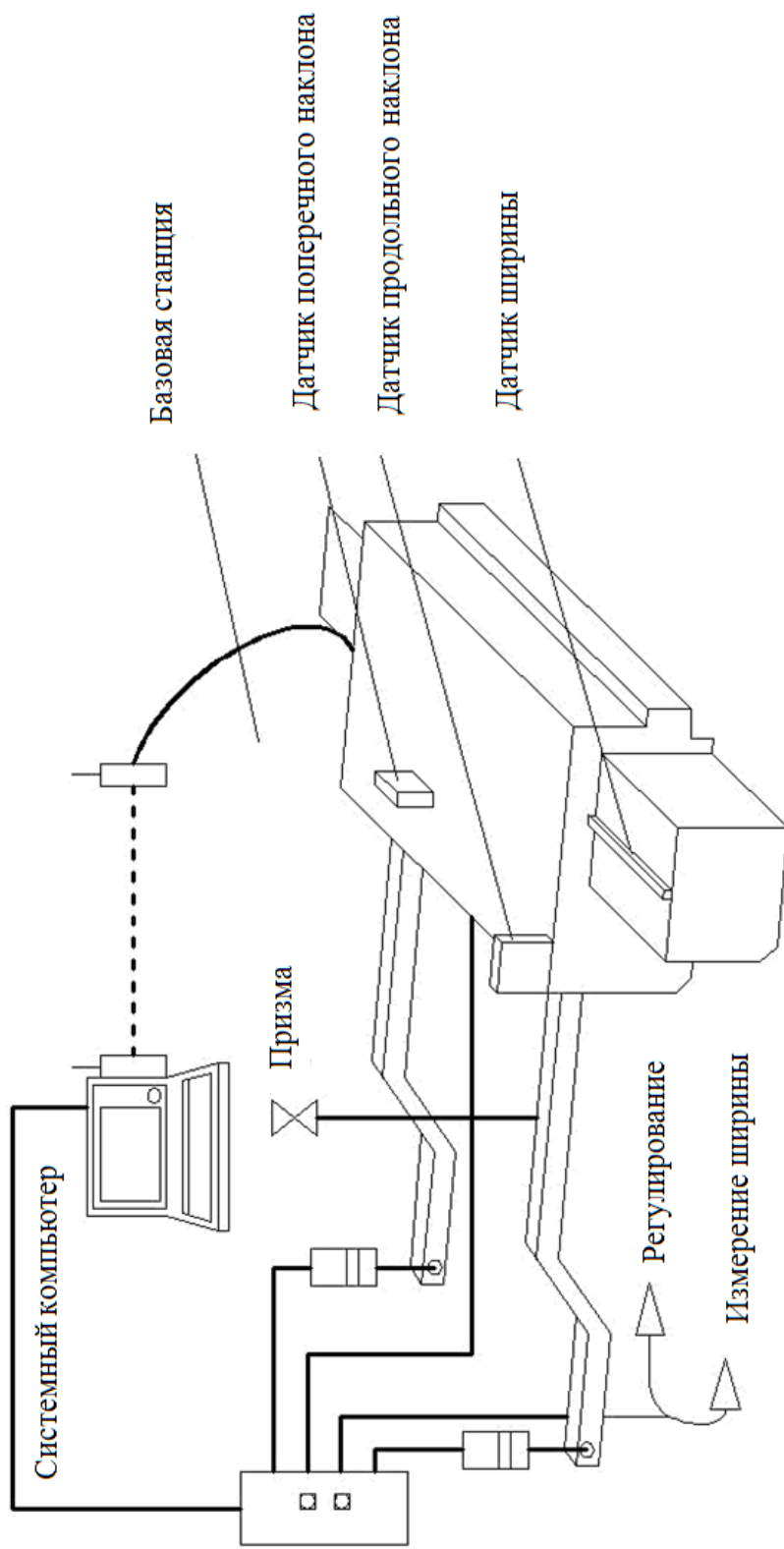


Рис. 1.5. Схема взаимодействия элементов Niveltronic® Plus (URL: www.voegele.info)

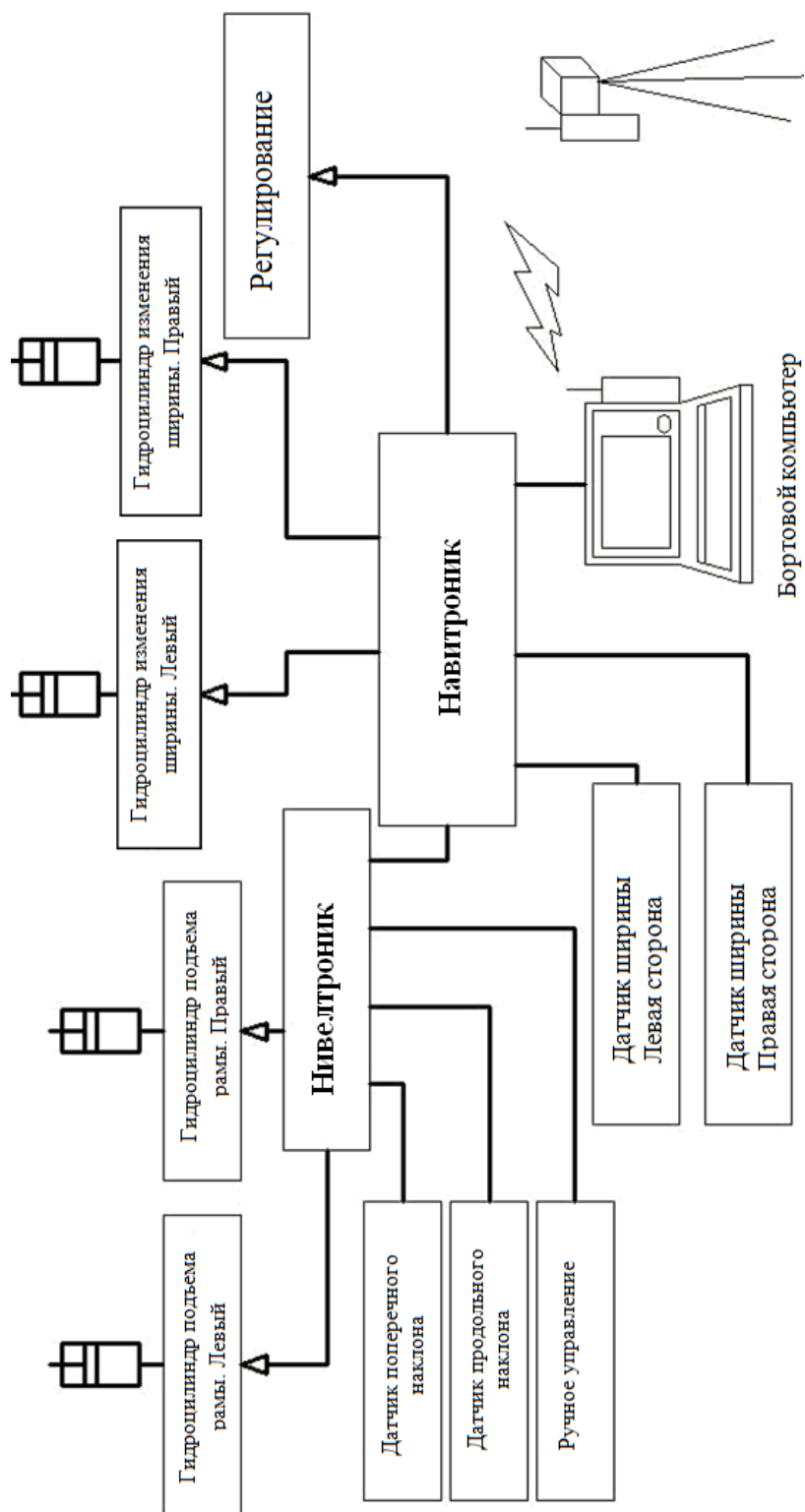


Рис. 1.6. Схема взаимодействия элементов Niveltronic® Plus с расширением Navitronic® Plus
(URL: www.voegele.info)

1.3. Автоматизация дорожных катков

Дорожные катки производства ОАО «Амкодор» (Минск), ООО «Дормашина» (Рыбинск), ЗАО «Раскат» (Рыбинск) и других производителей АСУ не оснащаются.

Современные вибрационные катки имеют типовую компоновку, содержащую валец (рис. 1.7), силовую установку и кабину, смонтированные на шарнирно – сочлененной раме. Совершенствование вибрационных катков идет по многим направлениям, из числа которых можно выделить основные: улучшение эргономических и экологических показателей, рост безопасности работы; повышение надежности, ремонтпригодности и удобства обслуживания; рост уплотняющей способности; расширение функциональных возможностей.

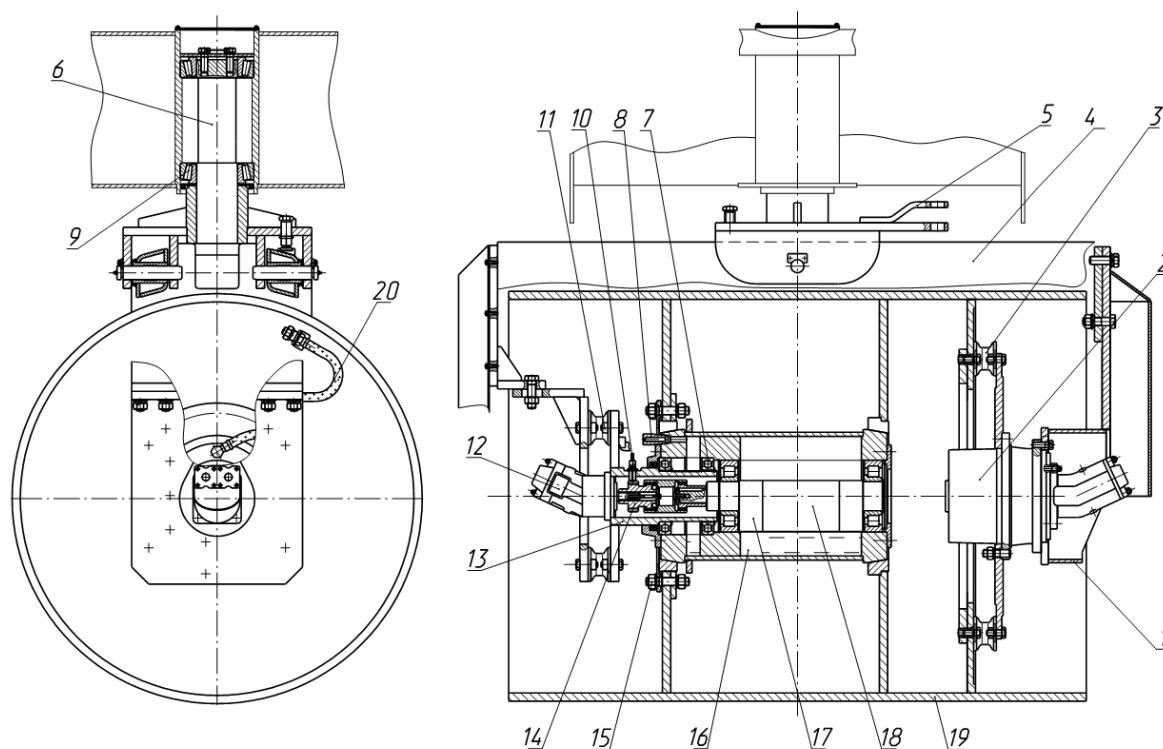


Рис. 1.7. Вибрационный валец катков ДУ-98 и ДУ-99 (ОАО «Раскат», URL: <http://www.ivmarka.ru/ru/services/technical-information>): 1, 13 – опора; 2 – мотор-редуктор; 3, 11 – амортизатор; 4 – вилка; 5 – рычаг; 6 – шкворень; 7 – подшипник; 8 – пробка заливная; 9 – подшипник шкворня; 10 – датчик частоты вибратора; 12 – гидромотор; 14 – муфта зубчатая; 15 – гайка; 16 – масляная ванна вибратора; 17 – дебаланс; 18 – вибривал; 19 – валец; 20 – трубопровод заливки масла

Наибольшее распространение получили дорожные самоходные катки с гладкими вальцами. Учитывая преимущества при уплотнении грунта и асфальтобетонной смеси, ведущие компании производят в основном вибрационные катки. Современные вибрационные катки – высокопроизводительные, гидрофицированные, надежные и удобные в эксплуатации машины, оборудованные микропроцессорными системами контроля и управления (рис. 1.8).

Гидросистема (рис. 1.8, табл. 1.3) предназначена для привода хода, привода вибраторов и рулевого управления. Привод хода осуществляется двумя гидромоторами М1 и М2 от насоса переменной производительности Н1. Гидромотор М1 приводит задний, а М2 – передний вальцы. Указанные гидромоторы оборудованы постоянно замкнутым дисковым стояночным тормозом.

Таблица 1.3

Перечень элементов гидросистемы

Обозначение	Наименование	Количество
Б	Гидробак	1
М1	Гидромотор	1
М2	Гидромотор	1
М3, М4	Гидромотор	2
Н1	Насос	1
Н2	Насос	1
Н3	Насос	1
Р1, Р2	Гидрораспределитель	1
Р3	Гидрораспределитель	2
Р4	Гидрораспределитель	1
КК1, КК2	Блок клапанов	2
КП	Гидроклапан предохранительный	1
ТО	Радиатор масляный	1
УС	Гидроруль	1
УТ	Датчик температуры	1
УУ	Указатель уровня масла	1
Ф1, Ф2	Фильтр	2
Ф3	Горловина заливная	1
Ц1, Ц2	Гидроцилиндр	2

Гидромотор М2 и М1 имеет два диапазона рабочего объема, что позволяет получать два диапазона скоростей – рабочий и транспортный. Регулирование рабочего объема гидромотора М2 осуществляется гидрораспределителем Р3. Этим же гидрораспределителем включается стояночный тормоз. Гидрораспределитель Р1 отключает подачу насоса Н1

(сервоблок управления насоса устанавливается в нейтральное положение) при включенном стояночном тормозе.

Насос переменной производительности Н2 служит для привода вибраторов посредством установленных последовательно гидромоторов М3 и М4. Гидрораспределитель Р2 отключает подачу насоса Н2 (отключает вибрацию) при реверсировании и остановке катка. Управление гидрораспределителем осуществляется от конечного выключателя, связанного с рычагом управления ходом в кабине катка.

Привод хода и вибраторов осуществляется по закрытой схеме, характерной тем, что системы приводов связаны с гидробаком только посредством насосов подпитки, установленных непосредственно на насосах Н1 и Н2, и дренажными гидролиниями. Насосы подпитки соединены с гидробаком через всасывающие фильтры Ф1 и Ф2.

Для защиты гидросистем хода и вибраторов и прополаскивания дренажа насосов предусмотрены блоки клапанов КК1 и КК2. Рулевое управление передним вибровальцем осуществляется гидроцилиндром Ц1 через гидроусилитель руля УС.

Гидроцилиндр Ц2 служит для поворота заднего вальца, управляемого гидрораспределителем Р4 с ручным управлением. Оба гидроцилиндра работают от насоса Н3, предохраняемого клапаном КП.

Температура рабочей жидкости в гидросистеме при установившемся движении и включенных вибраторах должна быть не выше 70 °С. Контроль температуры осуществляется посредством датчика УТ, установленного непосредственно в гидробаке и показывающего прибора, расположенного на панели управления в кабине катка.

Уплотняющая способность катка определяется частью веса, приходящегося на вибровальцовый модуль, см. рис. 1.7, вынуждающим усилием вибровозбудителя, размерами и формой поверхности контакта с грунтом, частотой колебаний и их характером (круговые или направленные под углом 0 – 90°, осцилляция или нутация), а также рабочей скоростью.

Особенностью уплотнения грунтов и других материалов является изменение их несущей способности, характеризующейся пределом прочности. В начале уплотнения несущая способность невелика и суммарное давление катка должно быть небольшим. Затем по мере уплотнения и упрочнения несущая способность возрастает, а для обеспечения эффективного уплотнения требуется увеличение давления, передаваемого грунту. Этого можно добиться путём изменения статической и динамической составляющих давления катка.

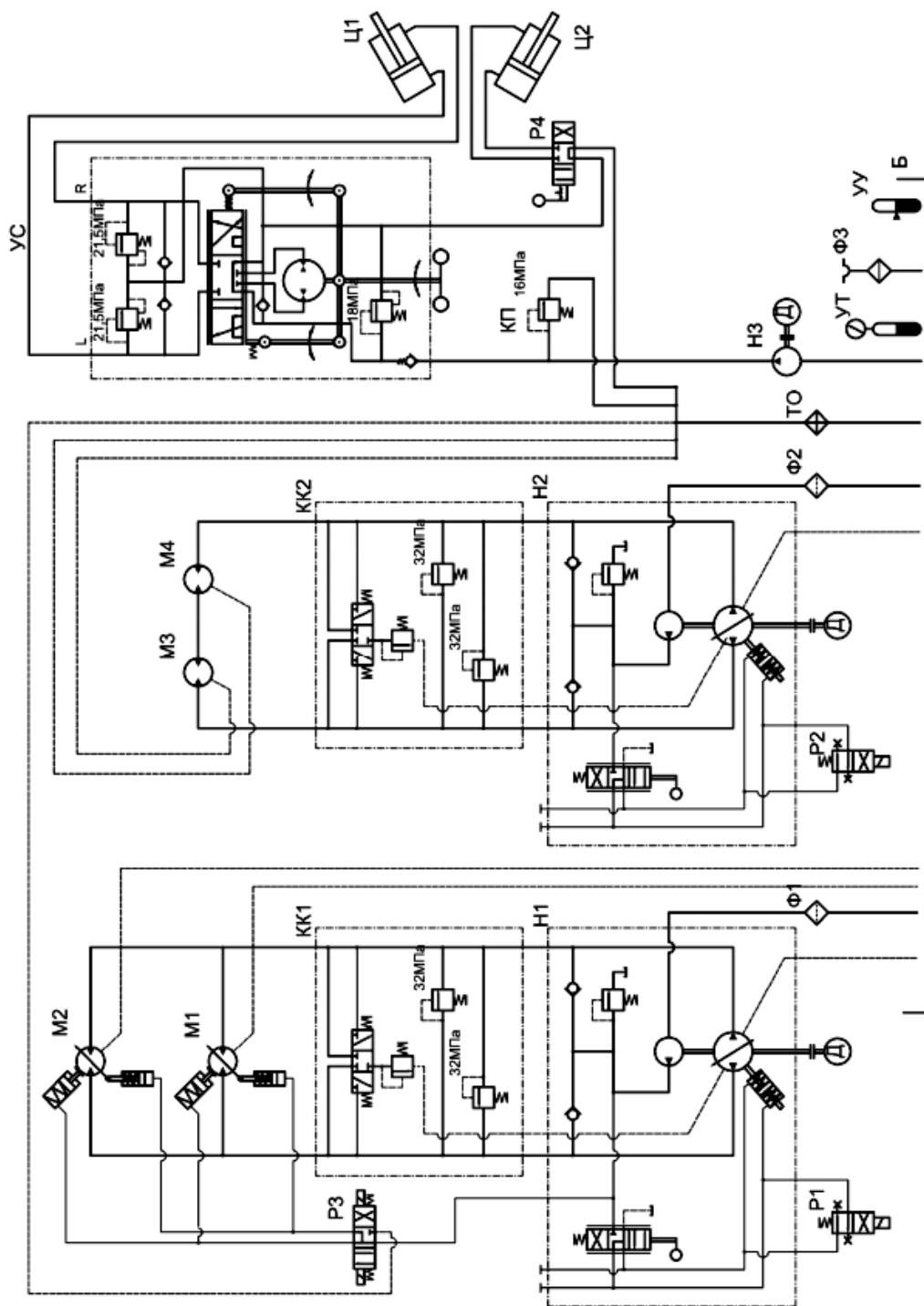


Рис. 1.8. Гидравлическая принципиальная схема катка (ОАО «Амкордор», URL: amkodort.by)

Неправильный выбор катка, необоснованное назначение параметров его работы (момент включения и выключения вибровозбудителя, вынуждающее усилие и управление в процессе работы, частота и характер колебаний, рабочая скорость и количество проходов с различной рабочей скоростью) не только снижают производительность уплотнения, но и могут стать причинами невыполнения норм плотности, особенно на нижней границе уплотняемого слоя. «Интеллектуализация» катков позволяет исключить ошибки, связанные с неправильным выбором режимов работы катка и нарушением технологии уплотнения, тем самым существенно повысив производительность. Следует также отметить повышение общих темпов работ за счёт сокращения технологических перерывов для контроля достигнутой плотности, исключения повторных и рекламационных работ.

Концепцию «интеллектуального» уплотнения можно сформулировать в способности адаптировать параметры вибратора (вынуждающее усилие и характер колебаний) во время движения на основе получаемой достоверной информации о текущей плотности грунта под вальцом. Вынуждающее усилие можно изменять *дискретно* с помощью многорежимных вибровозбудителей или *непрерывно* путём изменения направленных колебаний и вертикальной проекции вынуждающей силы или сложения величин нескольких направленных колебаний.

В настоящее время фирмы Ammann, Bomag, Dynapac, Hamm, Caterpillar и Sakai выпускают катки с системой «интеллектуального» уплотнения, контроля [1]. Компания Bomag выпускает катки, оснащенные автоматической системой уплотнения Asphalt-Manager. На катках Ammann используется контрольно-измерительная система ACE (Ammann Compaction Expert). На вибрационные катки Dynapac устанавливается система для измерения степени уплотнения с измерителем плотности и бортовым компьютером DCA (Dynapac Compaction Analyzer). Эти и подобные им системы позволяют вести непрерывный контроль за степенью уплотнения и настраивать амплитуду и частоту колебаний вибратора в зависимости от рабочей скорости катка и температуры поверхности асфальтобетона. Это позволяет, по мнению производителей, значительно улучшать качество уплотнения.

1.4. Показатели качества автоматизации уплотнения

При строительстве автомобильных дорог ключевой операцией для придания слоям конструкции необходимой прочности, устойчивости и долговечности является *уплотнение*. Конструкция дорог включает слои из

материалов с различными физико-механическими свойствами: грунтов, каменных материалов, асфальто- и цементобетонов [20].

В существующих технологиях преимущественным средством уплотнения дорожно-строительных материалов (ДСМ) на линейных объектах являются *катки различных типов*. Однако, несмотря на наличие универсальных средств уплотнения, существенные отличия в механизме развития и накопления деформаций разных материалов не позволяют разработать единые подходы к теоретическому описанию процессов изменения их напряженно-деформированного состояния при уплотнении.

Отсутствует и единый подход к оценке требуемых и достигнутых результатов уплотнения материалов. Анализ современного состояния средств механизации, контроля качества работ, нормативных документов на проектирование и строительство автомобильных дорог позволяет сделать вывод о *необходимости* совершенствования критериев уплотнения.

Проектирование распространенных в настоящее время дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием осуществляется в соответствии с ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд». В данном документе в качестве прочностной характеристики материалов дорожных одежд рассматривается *модуль упругости* (статический или при кратковременном нагружении). С помощью него оцениваются не только прочностные характеристики материала слоя, но и прочностные характеристики пакета из *нескольких* слоев, вплоть до прочности конструкции дорожной одежды в целом.

Решение о достаточности уплотнения материала для обеспечения заданных прочностных характеристик принимается на основании другого набора критериев (табл. 1.4).

Контроль качества уплотнения грунтов, в соответствии со СНИП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги», осуществляется по коэффициенту уплотнения грунта.

Контроль качества уплотнения асфальтобетона осуществляется преимущественно по коэффициенту уплотнения асфальтобетона, определяемому в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» как отношение средней плотности образца из конструктивного слоя к средней плотности перестроенного образца.

В соответствии с ГОСТ 22733-2002, ГОСТ 5180-84 и ГОСТ 12801-98 процедура определения значений коэффициентов уплотнения грунта и асфальтобетона занимает до двух суток. А отсутствие информации о достигнутом эффекте уплотнения не позволяет принимать оперативное решение о необходимости дополнительного уплотнения, что снижает производительность строительства.

Критерии уплотнения слоев дорожно-строительных материалов и
дороги в целом [34]

Материалы	Критерии уплотнения			
	При проектировании	При строительстве	Перспективный при строительстве	Оперативный (в составе катка)
Грунты	Модуль упругости (кратковременный, статический)	Коэффициент уплотнения	Динамический модуль упругости (деформации)	Динамический модуль упругости (деформации)
Каменные материалы		Отсутствие волны; отсутствие следа; раздавливание щебенки		
Асфальтобетоны		Коэффициент уплотнения		
Дорога в целом	Общий модуль упругости	Общий модуль деформации (упругости)		Динамический модуль упругости (деформации)

Критерии качества уплотнения щебеночных, гравийных и шлаковых оснований и покрытий (СНиП 3.06.03-85 «Автомобильные дороги») – отсутствие следа после контрольного прохода катка массой 10 – 13 т по всей длине контролируемого участка, волны перед вальцом, раздавливание положенной под валец щебенки. Эти критерии нельзя рассматривать в качестве объективных.

Нормативный документ ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» не содержит показателей плотности ДСМ, применяемых при контроле качества уплотнения. Связь между модулями упругости материалов слоев при проектировании и значениями коэффициентов уплотнения при строительстве отсутствует. В итоге заказчик не имеет возможности проконтролировать соблюдение требований, предъявляемых к прочности слоев в процессе дорожного строительства. А при использовании каменных материалов заказчик не имеет возможности проконтролировать даже качество их уплотнения.

Существует необходимость в разработке *новых критериев* уплотнения ДСМ, которые должны отвечать следующим требованиям [34]:

- являться едиными и для этапа проектирования, и для этапа строительства;
- быть универсальными по отношению к виду дорожно-строительных материалов;
- отражать реальные физико-механические характеристики ДСМ;
- не требовать сложной, длительной и дорогостоящей технологии определения.

Важно совершенствовать нормативную базу. При проектировании нежестких дорожных одежд переход от статических к динамическим модулям упругости (деформации) создаст предпосылки для более точного учета особенностей работы дороги при кратковременных приложениях нагрузки. Внедрение динамических модулей деформации в качестве критериев качества уплотнения позволит обеспечить единство требований проектировщиков и строителей к возведению дороги в целом и отдельных её слоёв, а заказчик сможет объективно оценить полноту выполнения проектных решений.

При наличии на катке системы глобальной навигации (ГЛОНАСС, GPS) реально получение карты распределения плотности по всему участку, что дает возможность провести не точечный, а сплошной контроль качества уплотнения каждого слоя, а также повысить потребительское качество дороги, увеличить срок ее службы и сократить затраты на ремонт. Работа этих систем основана на использовании 3D-цифровой модели проектной поверхности, которая в виде файла закладывается в бортовой компьютер машины, установленный в кабине. При работе в автоматическом режиме рабочий орган автоматически удерживается в проектном положении.

Однако представляется, что полностью отказываться от использования коэффициентов уплотнения материалов при строительстве нецелесообразно. Вероятно, в практике строительства следует применять и динамический модуль деформации (упругости), и коэффициент уплотнения материала [34].

Ниже приведены *критерии, используемые в системах управления зарубежными дорожными катками*. Среди основных производителей ИС-катков – компании Ammann/Case, Bomag, Caterpillar, Dynapac, Volvo (прежде Ingersoll Rand), Sakai America и Hamm [37].

Основные сведения о критериях качества, используемых в системах управления дорожных катков ведущих производителей приведены в табл. 1.5. Все производители предлагают катки со встроенной системой измерения.

Данные катков с «интеллектуальным» уплотнением

Производитель	Встроенная система измерения	Автоматический контроль обратной связи	Документация на основе GPS
Ammann/Case	Жесткость k_s для вибрационных катков.	Эксцентриксовая сила, амплитуда и частота	Да
Bomag	Модуль вибрации E_{vib} для вибрационных катков.	Амплитуда вертикальной эксцентриксовой силы	Да
Caterpillar	$MDP = P_g - W(\sin \theta + \frac{a}{g}) - (mV + b),$ <p>где P_g – валовая сила перемещения машины; W – вес катка; a – ускорение машины; g – ускорение силы тяжести; θ – угол наклона (подачи катка); V – скорость катка; m и b – соответственно, коэффициенты внутренних потерь машиной.</p>	Нет	Да
Дунарас	$CMV = c \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}},$ <p>где c – постоянная (обычно равна 300); $A_{2\Omega}$ – вторая гармоника вертикальной амплитуды области частоты ускорения вальца; A_{Ω} – первая гармоника вертикальной амплитуды области частоты ускорения вальца.</p>	Амплитуда эксцентриксовой силы	Да
Sakai America	$CCV = \frac{A_1 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}{A_1 + A_2} \times 100\%.$ <p>где A_1, \dots, A_6, – соответственно, ускорение в частоте возбуждения Ω_0 и в $0,5 \Omega_0, 1,5 \Omega_0, 2 \Omega_0, 2,5 \Omega_0$, и $3 \Omega_0$, рис. 1.9. Данная система измерения применяет один акселерометр, чтобы контролировать вертикальную вибрацию вальца. Амплитуды в каждом из этих компонентов частоты используются для определения CCV.</p>	Нет	Да

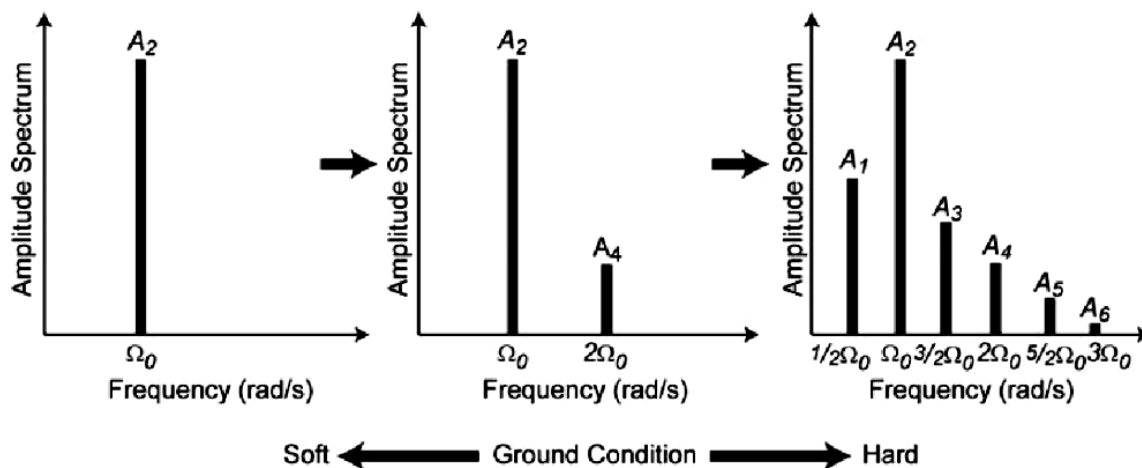


Рис. 1.9. Компоненты области частоты ускорения вальца в Sakai CCV [37]
 (amplitude spectrum – спектр амплитуды; frequency – частота; ground condition – состояние грунта; soft – мягкий; hard – жесткий)

1.5. Выводы

В технологическом комплексе дорожно-строительных работ для обеспечения высокого качества готового покрытия необходимо внедрение автоматического управления процессами на этапе укладки и уплотнения смеси. Проблема неравномерности распределения коэффициента уплотнения по ширине рабочего органа асфальтоукладчика, выявленная в результате экспериментальных исследований, требует проведения дополнительных научных исследований для поиска новых технических решений и разработки алгоритмов управления режимными параметрами рабочего процесса.

Учитывая отсутствие единого подхода к оценке требуемых и достигнутых результатов уплотнения материалов, существует необходимость совершенствования критериев уплотнения.

Качественно новый уровень выполнения практически всех видов дорожных и дорожно-строительных работ обеспечивает технология спутникового позиционирования на основе систем ГЛОНАСС/GPS, одним из направлений применения которой являются цифровые 3D-цифровые системы автоматического нивелирования, интеллектуальные САУ дорожных катков.

В нашей работе обоснованы предпосылки разработки системы автоматического управления рабочими процессами комплекта машин («асфальтоукладчик – дорожные катки») на основе традиционных и «интеллектуальных» технологий.

2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Моделирование как метод научного исследования применяется чрезвычайно широко во многих отраслях науки [18]. Под *математическим моделированием* понимается процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта и требуемой достоверности и точности решения этих задач. Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности.

Математического моделирования можно разделить на аналитическое и имитационное. Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов объекта записываются в виде некоторых функциональных соотношений (например, уравнений – алгебраических, дифференциальных, интегральных и т.п.) или логических условий. Для имитационного моделирования характерно исследование отдельных траекторий динамики моделируемого объекта.

Имитационное моделирование (от англ. simulation) – это распространенная разновидность аналогового моделирования, реализуемого с помощью набора математических инструментальных средств, специальных имитирующих компьютерных программ и технологий программирования, позволяющих посредством процессов-аналогов провести целенаправленное исследование структуры и функций реального сложного процесса в памяти компьютера в режиме «имитации», выполнить оптимизацию некоторых его параметров [6].

Имитационной моделью называется специальный программный комплекс, который позволяет имитировать деятельность какого-либо сложного объекта. При имитационном моделировании процессов фиксируются некоторые начальные условия (начальное состояние объекта или параметры модели) и рассчитывается одна траектория. Затем выбираются другие начальные условия, и рассчитывается другая траектория и т.д. То есть, аналитической зависимости между параметрами модели и будущими состояниями системы не ищется. Как правило, при имитационном моделировании используют численные методы, реализованные на компьютере. Достоинство имитационного моделирования заключается в том, что оно позволяет проанализировать различные сценарии иногда даже для очень сложных моделей.

В настоящее время существует достаточно большое количество специальных программных средств, предназначенных для разработки имитационных моделей и моделирования сложных технических объектов и процессов, но наиболее развитой и широко распространенной как в нашей стране, так и за рубежом, является современная математическая система MATLAB&Simulink (сайт разработчика: <http://www.mathworks.com>) с огромным набором инструментальных средств.

2.1. Идентификация динамической системы уплотнения смеси дорожными катками

Анализ свойств объекта управления предполагает разработку адекватных статических и динамических моделей. Наибольшие трудности возникают при идентификации нелинейного объекта. С ними можно справиться с помощью обработки опытных данных или информации, полученной в ходе решений дифференциальных уравнений.

Проведение экспериментальных исследований дорожно-строительных машин в реальных условиях их эксплуатации не эффективно, что связано с большой трудоемкостью, высокой стоимостью и значительной сложностью организации работ в соответствии с планом. В этом случае используют *методы имитационного моделирования* с применением математических программных средств.

Цель – разработка имитационной динамической модели уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком, проверка её адекватности, проведение численного эксперимента и обработка полученных данных.

2.1.1. Имитационная динамическая модель уплотнения

Основными показателями, характеризующими напряженно-деформированное состояние асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения как нелинейной упруго-вязко-пластичной среды, являются контактное напряжение и величина деформации. При *теоретическом* описании уплотняемой среды широкое распространение получили методы реологии [22, 38]. Однако существующие реологические модели не получили значительного *практического* применения при разработке систем автоматического управления, из-за отсутствия доступных выходных реологических характеристик этих моделей.

Рассматривается колебательная система «вибровалец – асфальтобетонная смесь» для теоретического описания динамических параметров процесса взаимодействия вальца с уплотняемой смесью.

Для решения поставленной задачи в качестве базовой принята теория уплотнения, предложенная в работе [22]. С учетом конструктивных элементов катка схема модели процесса вибрационного уплотнения асфальтобетонной смеси приведена на рис. 2.1.

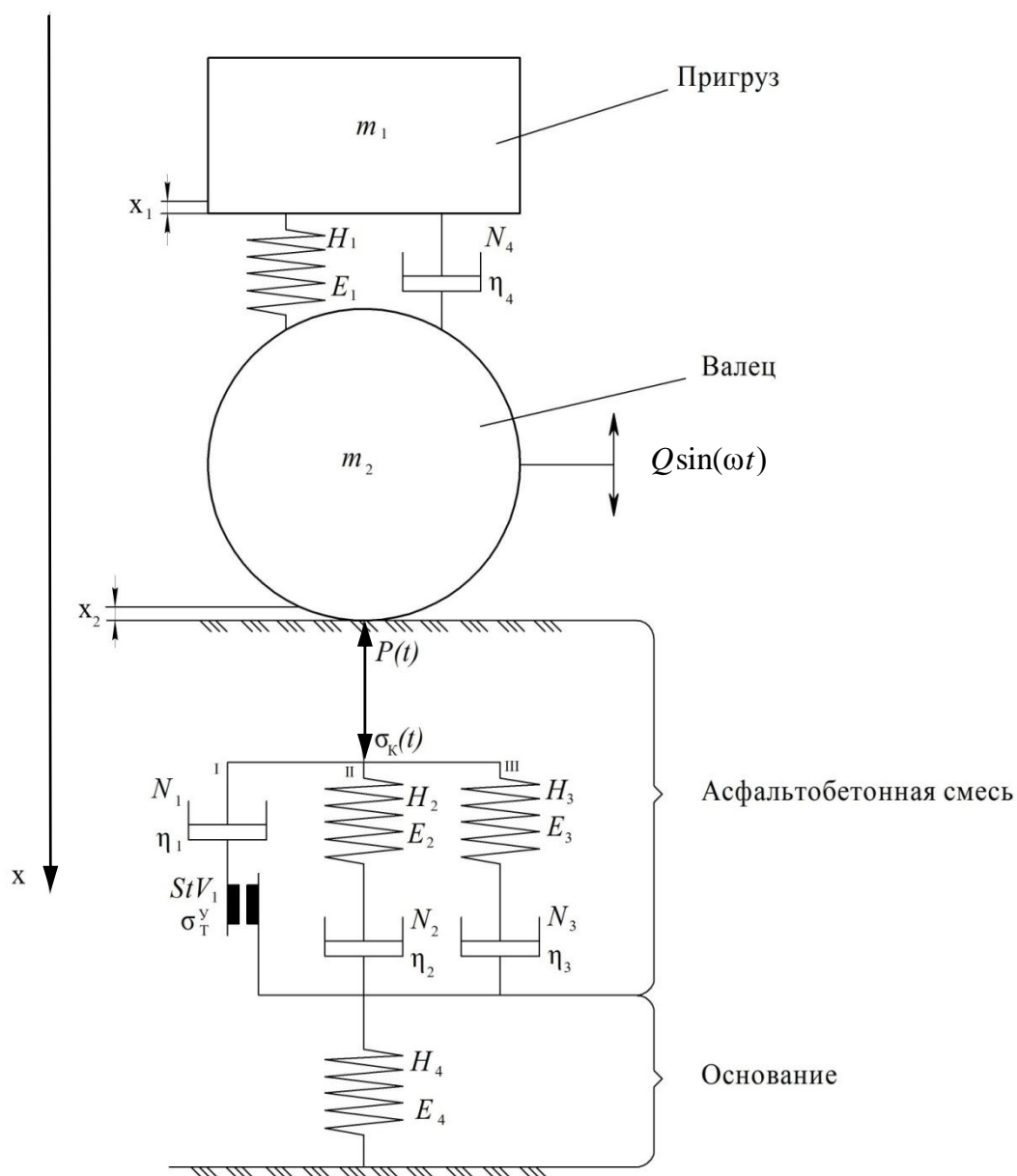


Рис. 2.1. Модель процесса вибрационного уплотнения асфальтобетонной смеси дорожным катком

Модель условно можно разделить на две части: первая характеризует динамику колебаний вибрационного вальца, вторая – реологические свойства уплотняемой среды.

Дифференциальные уравнения колебательной системы [22], рис. 2.1, запишутся следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + b \left(\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right) + \\ + c [x_1(t) - x_2(t)] = m_1 g; \\ m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} - b \left(\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right) - \\ - c [x_1(t) - x_2(t)] = Q \sin(\omega t) + m_2 g - P(t), \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где m_2 – масса вальца, которому сообщаются гармонические колебания от его вибровозбудителя, кг; m_1 – масса пригруза (масса рамы вальца, воздействующей на вибрирующий валец), кг; x_1 – вертикальное перемещение корпуса катка, возникающее в итоге вращения дебалансного вала вальца и передающееся через резиновые амортизаторы, м; x_2 – вертикальное перемещение вибрационного вальца, м; b – коэффициент вязкого трения резиновых амортизаторов, Па*с/м; c – жесткость резиновых амортизаторов, Н/м; Q – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н; ω – угловая частота вращения вала вибровозбудителя, рад/с; t – текущее время вибрационного воздействия на смесь, с; $P(t)$ – реакция на валец со стороны уплотняемой смеси, Н.

Модель уплотнения смеси состоит из трёх параллельно соединённых ветвей (блоков). При этом в любой момент времени соблюдаются условия

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t), \\ \sigma_K(t) &= \sigma_1(t) + \sigma_2(t) + \sigma_3(t). \end{aligned}$$

где $\varepsilon(t)$ – относительная деформация смеси; $\varepsilon_1(t), \dots, \varepsilon_3(t)$ – соответственно, относительная деформация в блоках I, II и III реологической модели; $\sigma_K(t)$ – контактные давления вальца; $\sigma_1(t), \dots, \sigma_3(t)$ – давления в блоках I, II и III модели.

Так как дорожное основание достаточно хорошо уплотнено, то жесткость элемента реологической модели H_4 , см. рис. 2.1, будет намного больше жесткости асфальтобетонной смеси и в этом случае элемент H_4 в работу не включается.

Результаты научных исследований [20, 21, 23] показывают, что для эффективного уплотнения асфальтобетонных смесей необходимо, чтобы возникающие под рабочим органом контактные давления вальца на смесь σ_k были не меньше их предела текучести σ_T , но не больше предела прочности σ_{IP} , т.е. $\sigma_T(t) \leq \sigma_k(t) < \sigma_{IP}(t)$.

Если выполняется условие $\sigma_k(t) < \sigma_{IP}(t)$, то процесс уплотнения происходит не результативно, т.к. в этом случае под действием уплотняющих средств в смесях медленно накапливаются остаточные деформации.

При условии $\sigma_k(t) > \sigma_{IP}(t)$ процесс уплотнения переходит в процесс разуплотнения, когда превышает в смеси запас деформативной способности и она разрушается на отдельные части [20, 21, 23].

Для удобства проведения компьютерного имитационного моделирования уравнения, полученные в работе [22], были преобразованы, что позволило детальнее исследовать динамические процессы. Система уравнений (2.1) приобрела следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} = \frac{(m_1 + m_2)g}{(0,02 m_1 + m_2)h_{сл}(t)} + \\ + \frac{Q}{(0,02 m_1 + m_2)h_{сл}(t)} \sin(\omega t) - \\ - \frac{L_{AB}(t)B}{(0,02 m_1 + m_2)h_{сл}(t)} \sigma_k(t); \\ \frac{d^2 \sigma_k(t)}{dt^2} = - \frac{\theta_2 n + \theta_3 m}{\theta_2 \theta_3 n m} \cdot \frac{d\sigma_k(t)}{dt} - \frac{\sigma_k(t) - \sigma_T^y}{\theta_2 \theta_3 n m} + \\ + \frac{\eta_2 + \eta_3}{\theta_2 \theta_3 n m} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{\eta_2 \theta_3 + \eta_3 \theta_2}{\theta_2 \theta_3 n m} \cdot \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2}, \end{array} \right. \quad (2.2)$$

где B – ширина вальца, м; $h_{сл}(t)$ – толщина слоя смеси, м; $L_{AB}(t)$ – длина дуги контакта вальца со смесью, м; θ_2, θ_3 – соответственно, время быстрой и медленной релаксации напряжений, с; n, m – коэффициенты, постоянно

изменяющиеся в процессе уплотнения; η_2, η_3 – соответственно, вязкость смеси в блоках II и III реологической модели смеси, Па*с.

С учетом принятых упрощений, система уравнений (2.2) преобразована к виду (2.3):

$$\begin{cases} \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} = a_0 + b_0 \sin(\omega t) - c_0 \sigma_k(t); \\ \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} = -c_1 \frac{d\sigma_k(t)}{dt} - \frac{[\sigma_k(t) - \sigma_T^y]}{c_2} + \\ + \frac{\eta_2 + \eta_3}{c_2} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{\eta_2\theta_3 + \eta_3\theta_2}{c_2} \cdot \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt}, \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{(m_1 + m_2)g}{(0,02m_1 + m_2)h_{\text{сл}}(t)}; b_0 = \frac{Q}{(0,02m_1 + m_2)h_{\text{сл}}(t)};$$

$$c_0 = \frac{L_{AB}(t)B}{(0,02m_1 + m_2)h_{\text{сл}}(t)}; c_1 = \frac{\theta_2 n + \theta_3 m}{\theta_2 \theta_3 n m}; c_2 = \frac{1}{\theta_2 \theta_3 n m}.$$

С использованием программы MATLAB&Simulink разработана имитационная модель процесса уплотнения смеси вибрационным катком, см. рис. 2.2 – 2.4, на основе системы дифференциальных уравнений (2.3).

В модели присутствуют две подсистемы: SubSystem и SubSystem-1, см. рис. 2.3 и 2.4. Задающим сигналом является угловая частота вращения дебалансного вала, которая определяется по формуле

$$\omega = 2 \pi f, \quad (2.4)$$

где f – частота вибрации вальца, Гц.

В данной задаче исходная частота f равна 50 Гц.

Входом In 1 подсистемы SubSystem является величина контактного давления, найденная из второго уравнения системы (2.2), а её выходом – величина деформации среды. В подсистеме SubSystem-1 учитываются свойства вязкости среды; выходами подсистемы являются данные для построения модели уравнения (2.3).

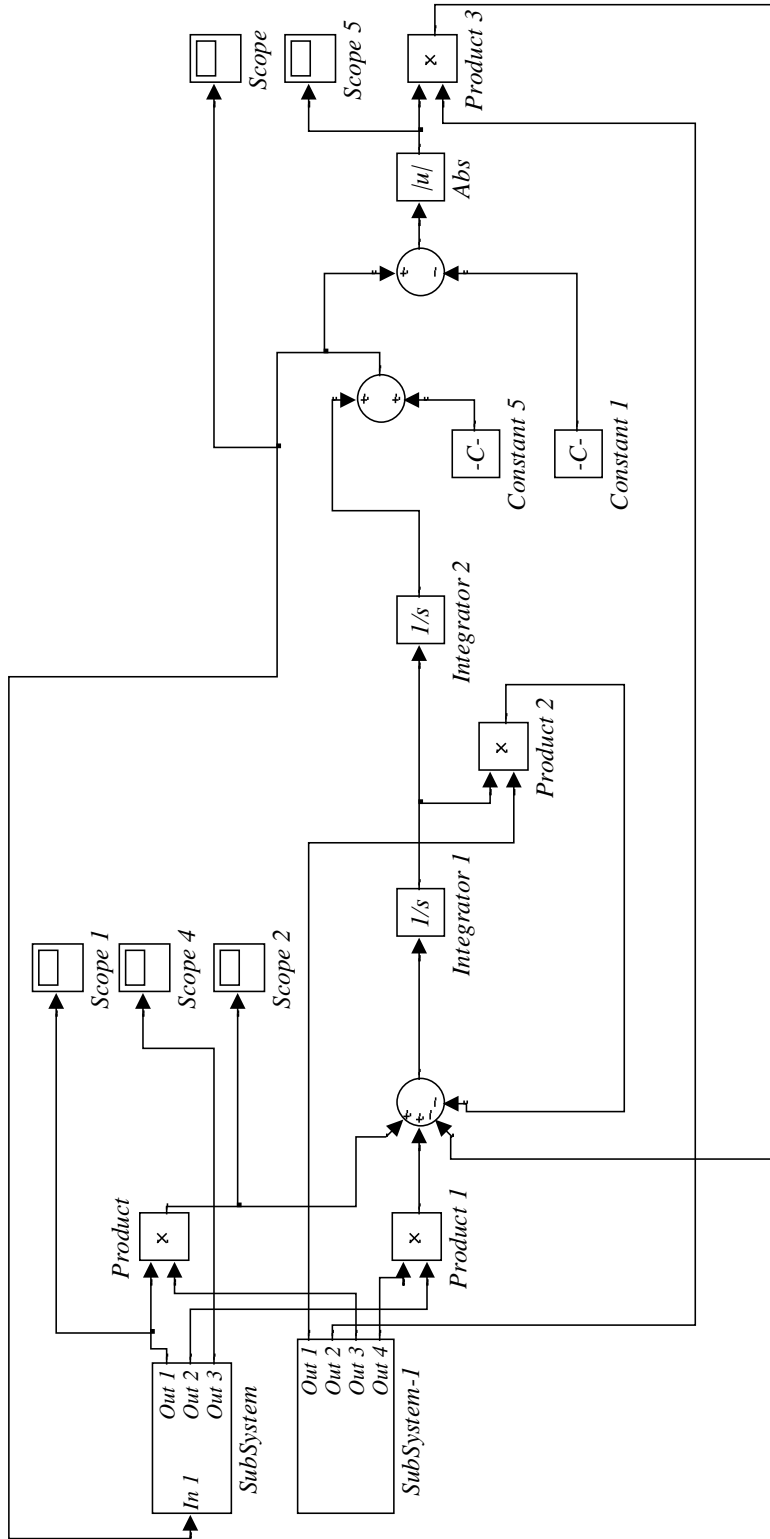


Рис. 2.2. Модель уплотнения смеси вибрационным катком (на языке MATLAB&Simulink)

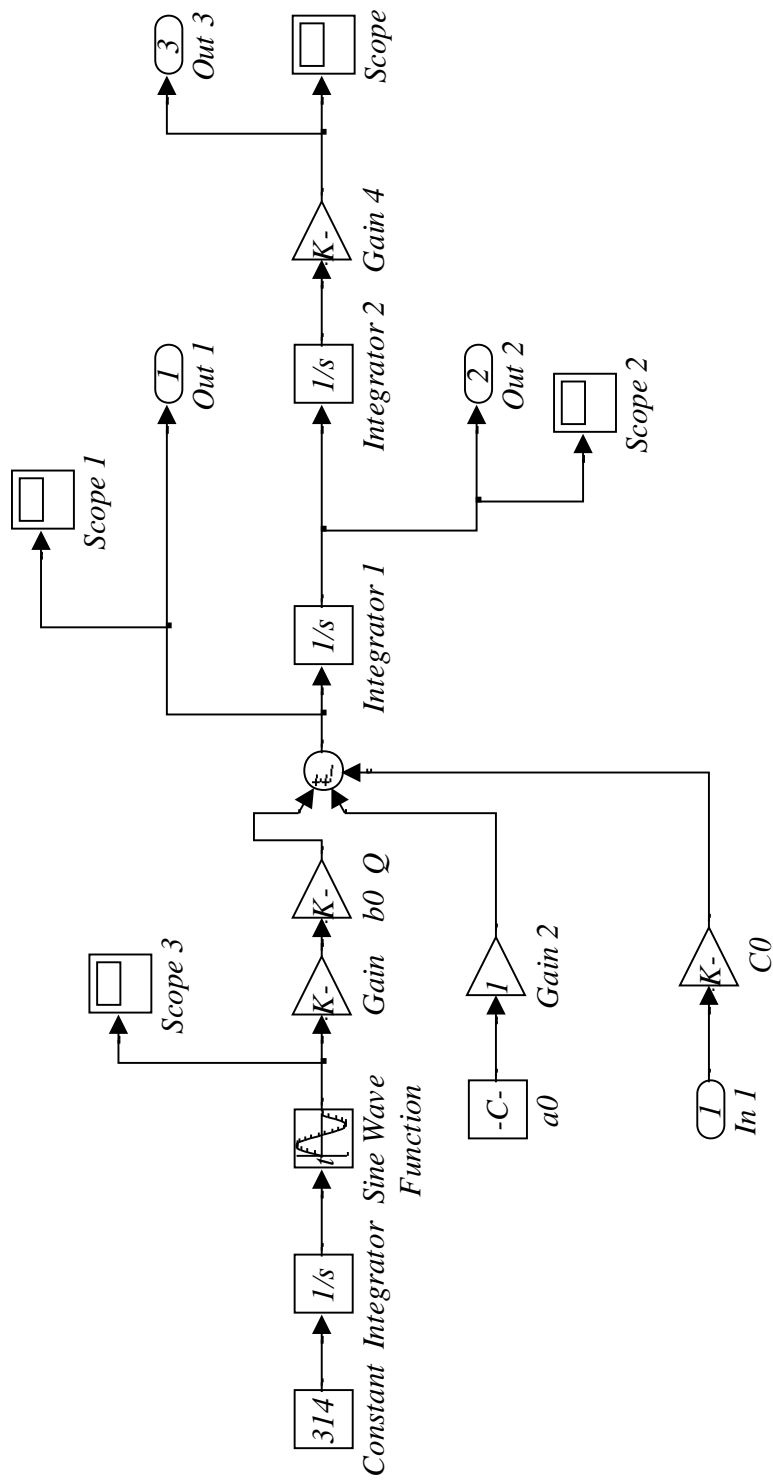


Рис. 2.3. Содержание блока SubSystem

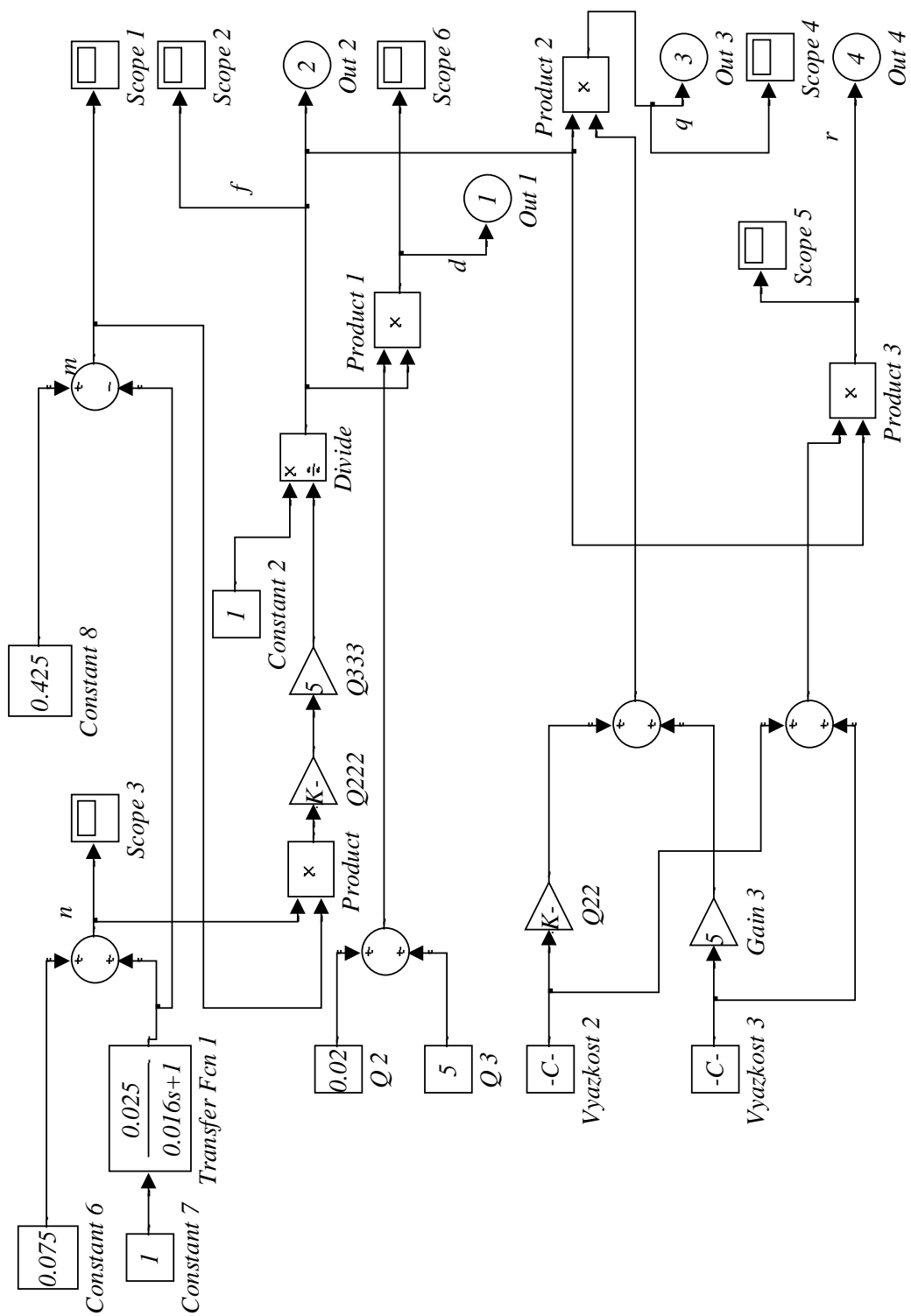


Рис. 2.4. Содержание блока SubSystem-1

Изменение свойств вязкости смеси, имеющих нелинейные зависимости от температуры и частоты вибрации в процессе уплотнения, характеризуются при помощи коэффициентов m и n .

Модели и зависимости этих коэффициентов от времени приведены рис. 2.5 и 2.6.

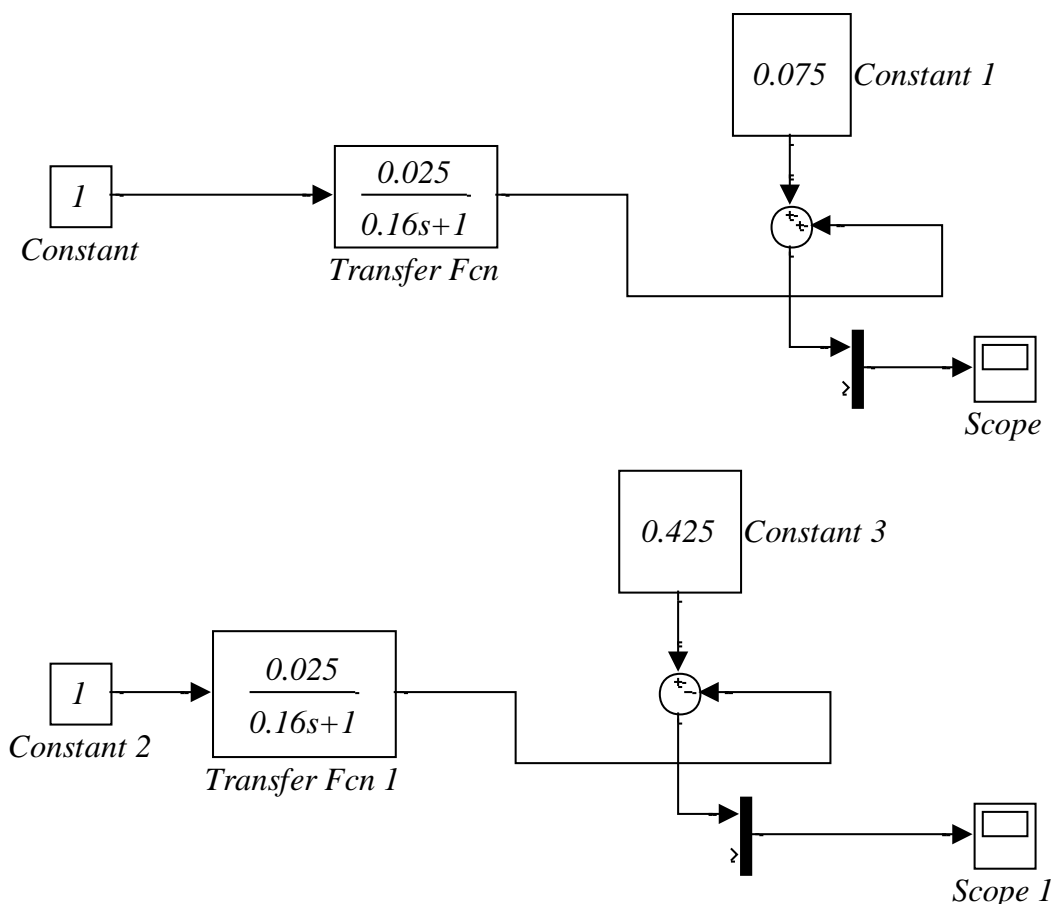
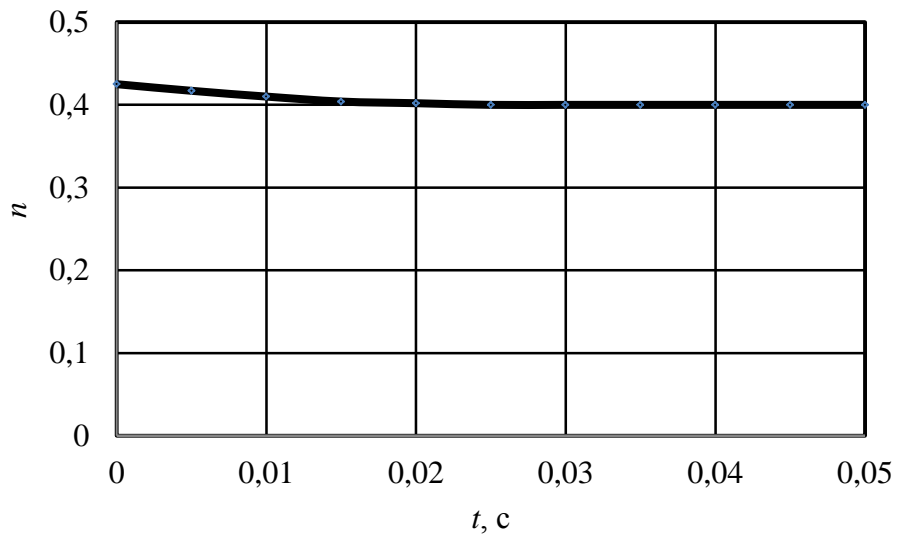


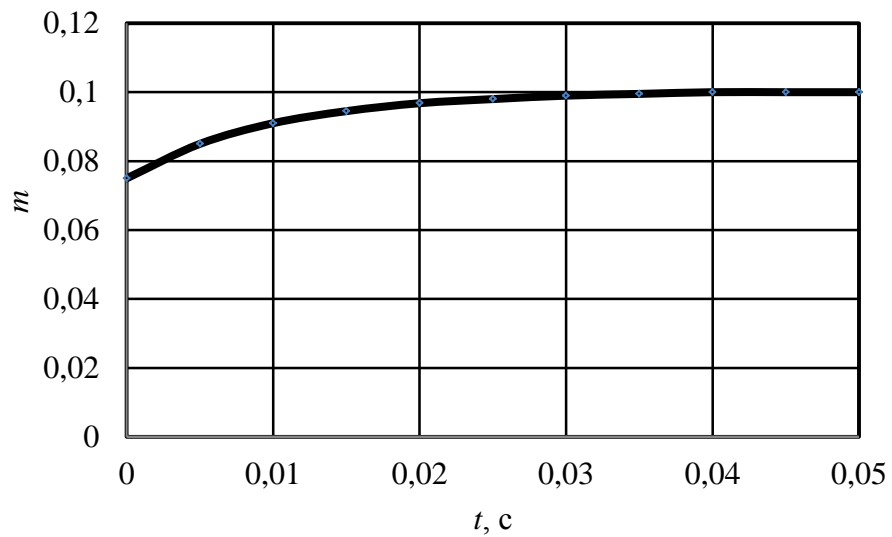
Рис. 2.5. Модель изменения коэффициентов m и n от времени

Для определения величины распределения контактного давления вальца на смесь в процессе уплотнения между тремя блоками реологической модели, см. рис. 2.1, представляющей определенную трудность, примем соотношения

$$\begin{aligned}\sigma_2(t) &= n \sigma_K(t), \\ \sigma_3(t) &= m \sigma_K(t).\end{aligned}$$



a



б

Рис. 2.6. Зависимости изменения коэффициентов n (*a*) и m (*б*) от времени

2.1.2. Результаты имитационного моделирования

Имитационное моделирование уплотнения асфальтобетонной смеси дорожным катком выполнено с использованием программы MATLAB & Simulink.

Исходные данные для моделирования:

Q – возмущающая сила вибровозбудителя, $45 \cdot 10^3$ Н;

B – ширина вибрационного вальца, 1,5 м;

m_1 – масса пригруза (рамы), $3,5 \cdot 10^3$ кг;

m_2 – масса вибрационного вальца, $2 \cdot 10^3$ кг;

θ_2 – время релаксации в блоке II реологической модели смеси, 0,02 с;

θ_3 – время релаксации в блоке III реологической модели смеси, 5 с;

σ_m – предел текучести, 0,9 МПа;

η_2 – вязкость смеси в блоке II реологической модели смеси, 0,35 МПа·с;

η_3 – вязкость смеси в блоке III реологической модели смеси, 0,35 МПа·с;

$n_0 = 0,075$, $n_k = 0,1$, $m_0 = 0,425$,

$m_k = 0,4$ – коэффициент распределения контактного давления;

v_m – скорость движения катка, 0,55 м/с;

$h_{сл}$ – толщина слоя смеси, 0,06 м;

ρ_0 – начальная плотность смеси, $0,94$ кг/м³.

Адекватность имитационной модели проверена по результатам моделирования динамики рабочего процесса уплотнения смеси вибрационным катком.

Получены зависимости контактного давления вальца и абсолютной деформации смеси от времени контакта вальца с уплотняемой смесью, а также значения ускорения деформации уплотняемой среды, рис. 2.7 – 2.9.

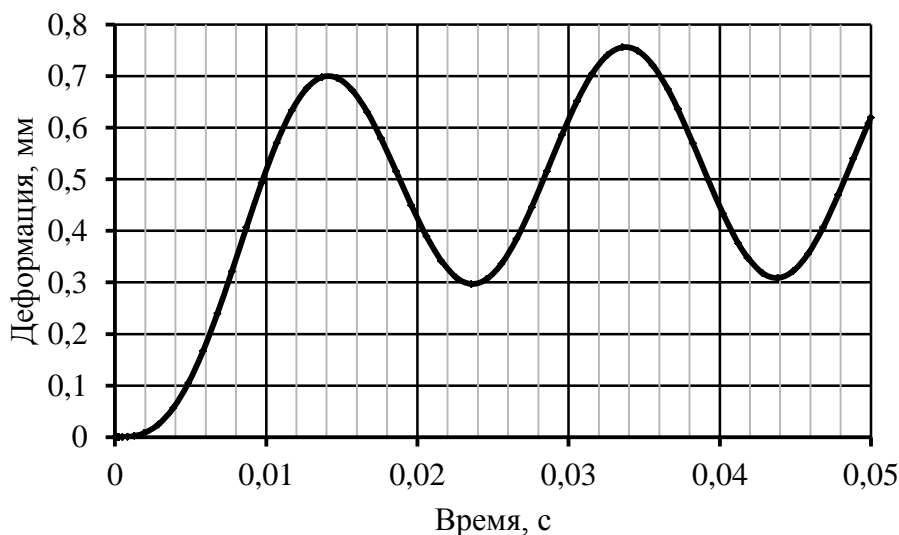


Рис. 2.7. Зависимость абсолютной деформации смеси от времени контакта вальца с ней

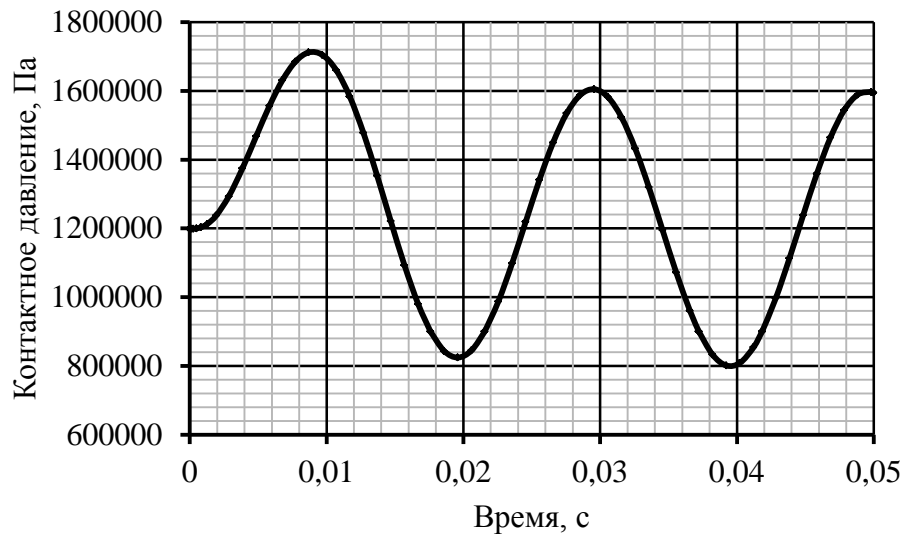


Рис. 2.8. Зависимость контактного давления вальца от времени уплотнения смеси

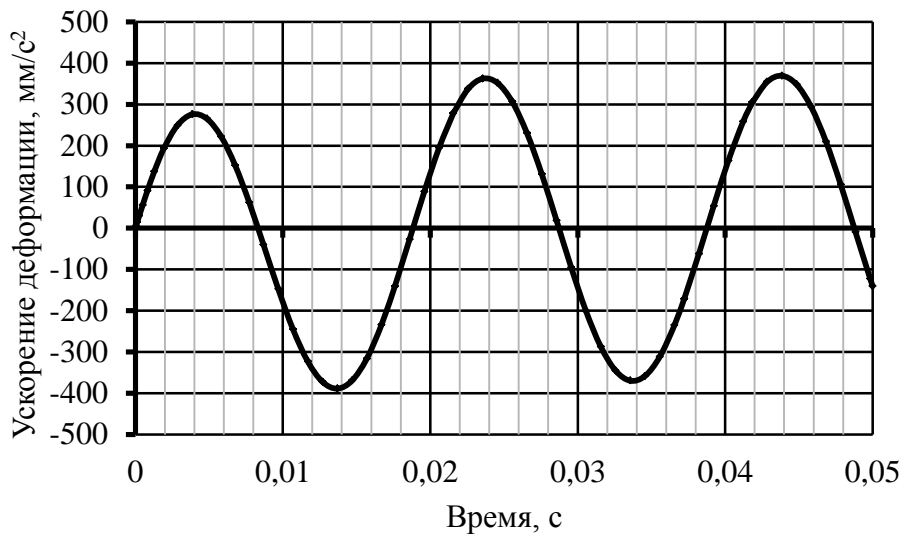


Рис. 2.9. Зависимость ускорения деформации смеси от времени контакта вальца с нею

С целью получения максимально возможной информации на основе минимально допустимого количества опытных данных исследование выполнено на основе метода планирования эксперимента [10]. Под экспе-

риментом понимается система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях.

Были выбраны следующие параметры, влияющие на реологические свойства уплотняемой среды и динамику вибрационных свойств вальца, а также диапазон их изменения:

- время быстрой θ_2 и медленной θ_3 релаксации напряжений, изменяющееся в диапазонах: $\theta_2 = 0,005 - 0,05$ с, $\theta_3 = 0,5 - 10$ с;
- вязкость смеси в блоках модели: η_2, η_3 (0,1 – 0,6 МПа·с);
- частота вибрации f (40 – 50 Гц).

Используя опытные данные и указанные факторы, рассчитали коэффициенты регрессионных моделей и показатели достоверности аппроксимации.

Погрешности вычислений составили:

- для контактного давления – 0,1 %;
- для деформации – 8 %;
- для ускорения изменения деформации – 0,6 %.

С использованием программы Microsoft Excel получены уравнения регрессии, отражающие влияние каждого исследуемого фактора на одну из трех функций: контактное давление вальца, деформацию смеси и ускорение деформации смеси, см. рис. 2.10 – 2.13.

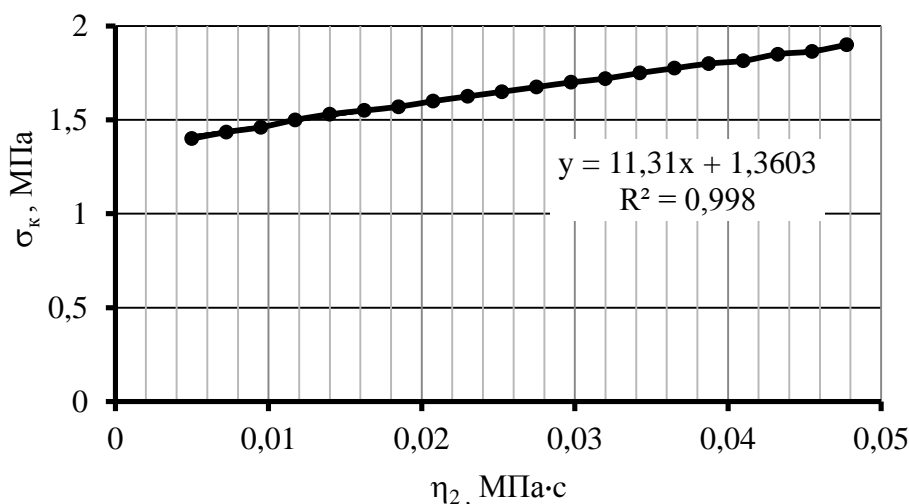


Рис. 2.10. Зависимость контактного давления вальца от вязкости в блоке II реологической модели смеси

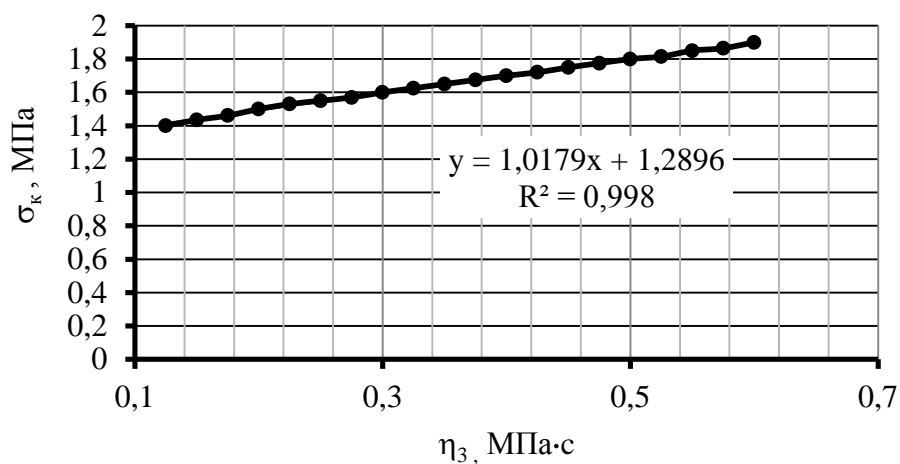


Рис. 2.11. Зависимость контактного давления вальца от вязкости в блоке III реологической модели смеси

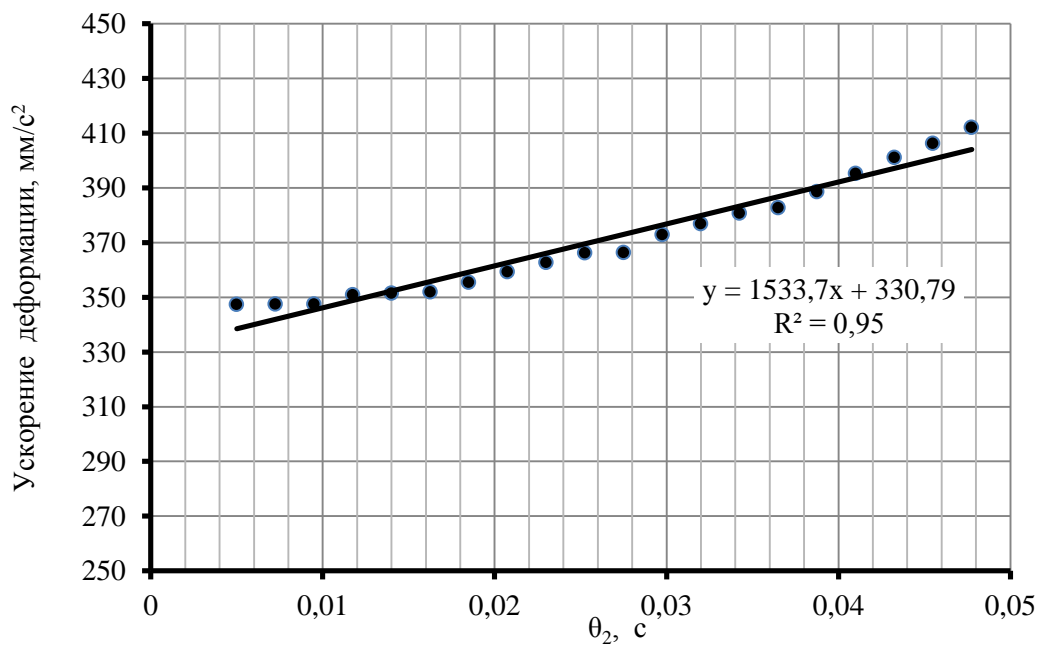


Рис. 2.12. Зависимость ускорения деформации смеси от времени релаксации в блоке II реологической модели

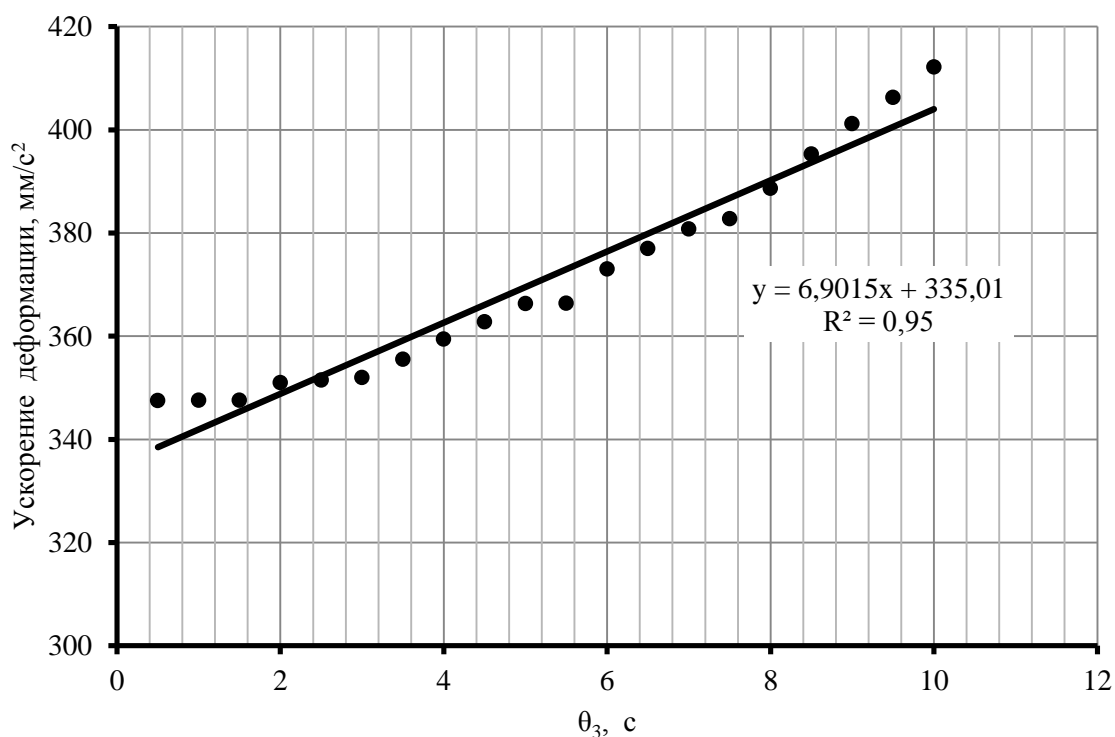


Рис. 2.13. Зависимость ускорения деформации смеси от времени релаксации в блоке III реологической модели

В итоге была разработана имитационная динамическая модель уплотнения смеси вибрационным катком, позволяющая упростить исследование динамических процессов, вызванных изменением параметров дорожного катка и уплотняемого упруго-вязко-пластичного материала при проведении численных экспериментов.

Имитационное моделирование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожным катком программными средствами MATLAB & Simulink и результаты исследования методом планирования активного эксперимента показали адекватность *имитационной модели* в сравнении с результатами других ученых.

Результаты работы могут использоваться в целях идентификации параметров асфальтобетонной смеси и параметров вибрации при разработке системы автоматического управления уплотнением, в частности, для выбора соответствующих первичных преобразователей – датчиков, передающих в автоматический регулятор информацию о контактном давлении, деформации, ускорении деформации.

2.2. Моделирование систем управления машинами дорожно-строительного комплекса

Методы роста качества и надежности функционирования управляемых систем в значительной степени определяются используемыми математическими методами и моделями. Это особенно проявляется в работающих дорожно-строительных машинах, динамическое поведение контролируемых параметров которых носит нелинейный характер. Построение моделей, адекватных динамическому поведению, определяет проектирование качественных и надежных систем автоматического управления.

Асфальтоукладчик – центральная машина дорожно-строительного комплекса. Им укладывают, профилируют и предварительно уплотняют слой смеси. Современные асфальтоукладчики оснащены системами автоматического управления рабочим оборудованием, обеспечивающими заданную ровность и угол наклона дорожного полотна. Однако качество дорожного покрытия во многом зависит от коэффициента уплотнения смеси, во многом, в свою очередь, определяемым неоднородностью толщины смеси и жесткостью конструкции оборудования. В процессе уплотнения необходимо управлять рабочим органом по степени уплотнения смеси. Эффективность автоматического управления рабочими процессами можно повысить за счет создания адаптивных систем управления, параметры которых подстраиваются под изменяющиеся условия рабочих процессов.

Уплотнение смеси с помощью асфальтоукладчика начинается с того, что оператор, исходя из рекомендаций нормативных документов, назначает скорость движения машины и частоту вращения эксцентрикового вала привода трамбующих брусьев.

При всей тщательности выбора данных начальных режимных параметров предугадать неровности микрорельефа, а также изменение свойств асфальтобетонной смеси при охлаждении крайне сложно и практически невозможно. Но с допущениями можно косвенно судить о распределении неровностей и плотности основания, а соответственно об ожидаемом коэффициенте уплотнения смеси.

На основании исследований асфальтоукладчика с перспективным уплотняющим рабочим органом [28], проведенных в реальных условиях эксплуатации, были получены экспериментальные зависимости, позволяющие использовать их для создания системы управления процессом. На трамбующих брусьях рабочего органа были установлены тензодатчики, которые фиксировали изменение усилия на них в зависимости от частоты трамбования и скорости движения, рис. 2.14, где

F_{1M} и F_{2M} – соответственно усилия на первом и втором брус. Также фиксировался коэффициент уплотнения в зависимости от частоты трамбования n_1 и скорости движения асфальтоукладчика v , рис. 2.15.

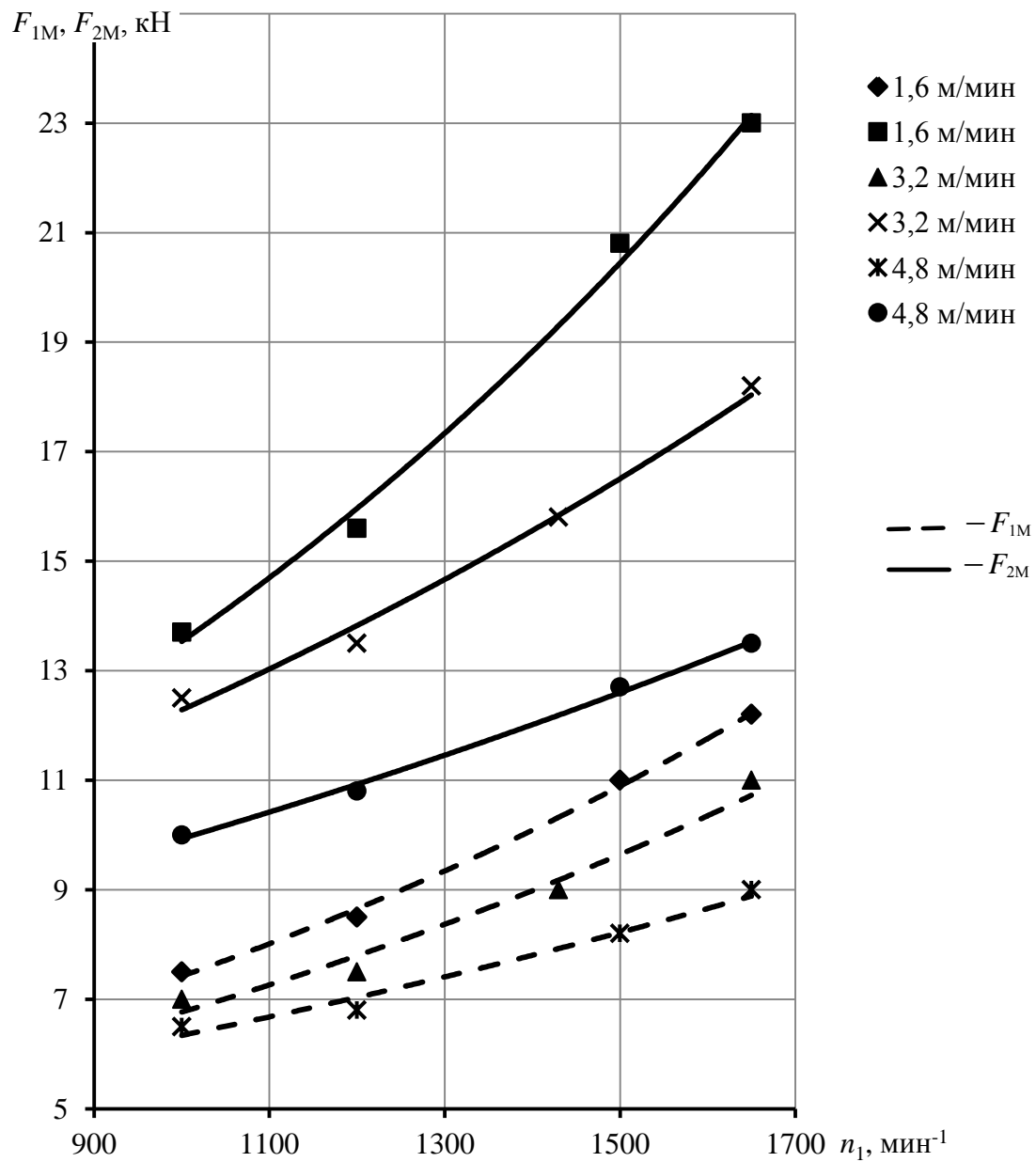


Рис. 2.14. Зависимость усилия на трамбующих брусках от частоты трамбования при различной скорости движения асфальтоукладчика

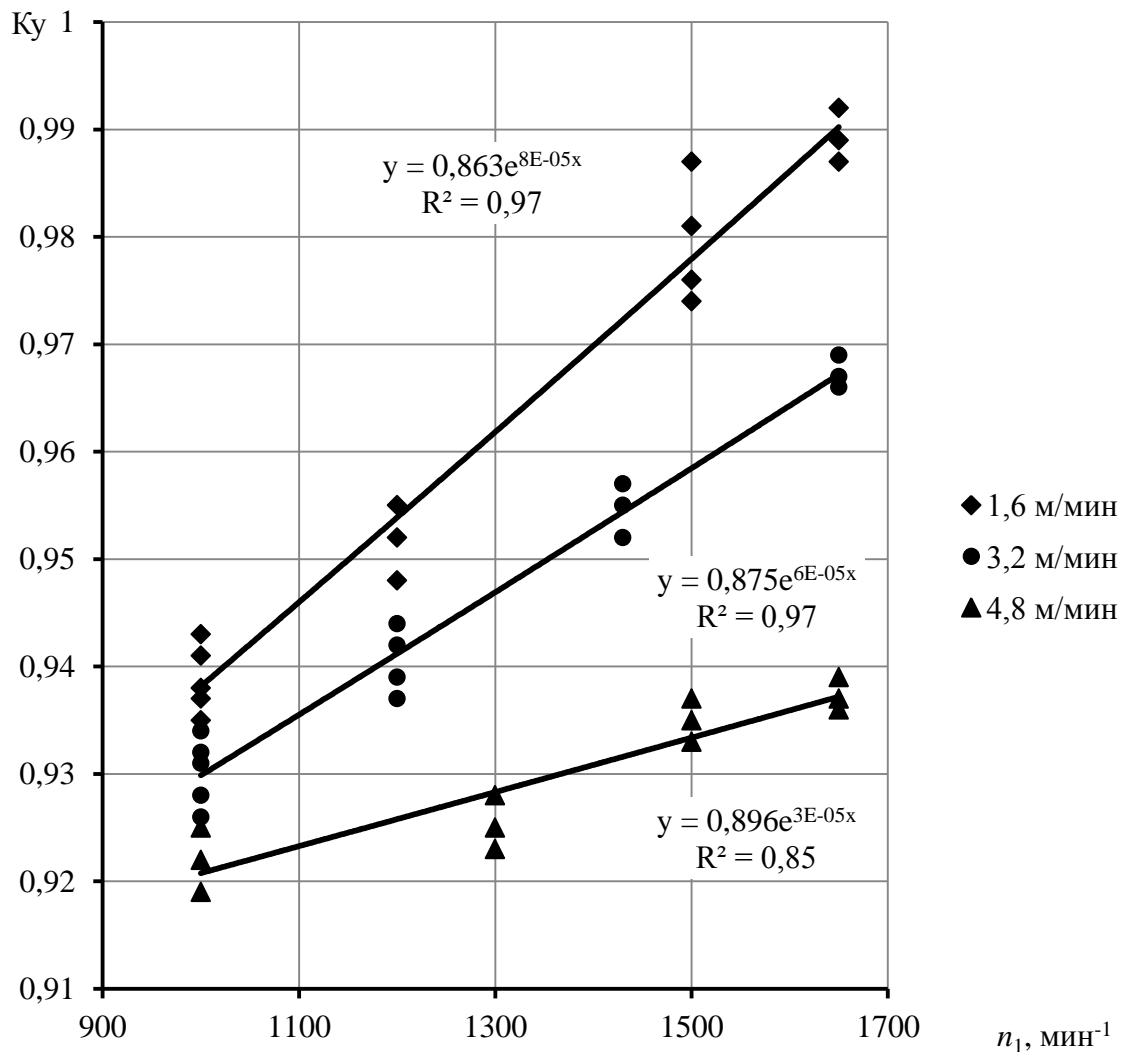


Рис. 2.15. Зависимость коэффициента уплотнения от частоты трамбования при различной скорости движения асфальтоукладчика

Если сопоставить данные двух графиков, то можно получить зависимость коэффициента уплотнения K_y от усилий на трамбуемых брусках, рис. 2.16 – 2.17. Как видно, законы изменения коэффициента уплотнения от усилий на брусках достаточно точно аппроксимируются в программе MATLAB&Simulink с помощью многочленов второй – $\gamma = \rho_1\chi^2 + \rho_2\chi + \rho_3$ – и четвертой – $\gamma = \rho_1\chi^4 + \rho_2\chi^3 + \rho_3\chi^2 + \rho_4\chi + \rho_5$ – степени.

Таким образом, можно создать математическую модель управления уплотнением, руководствуясь данными с датчиков усилия трамбуемых

брусьев. Предлагаем алгоритм управления процессом, блок-схема которого изображена на рис. 2.18.

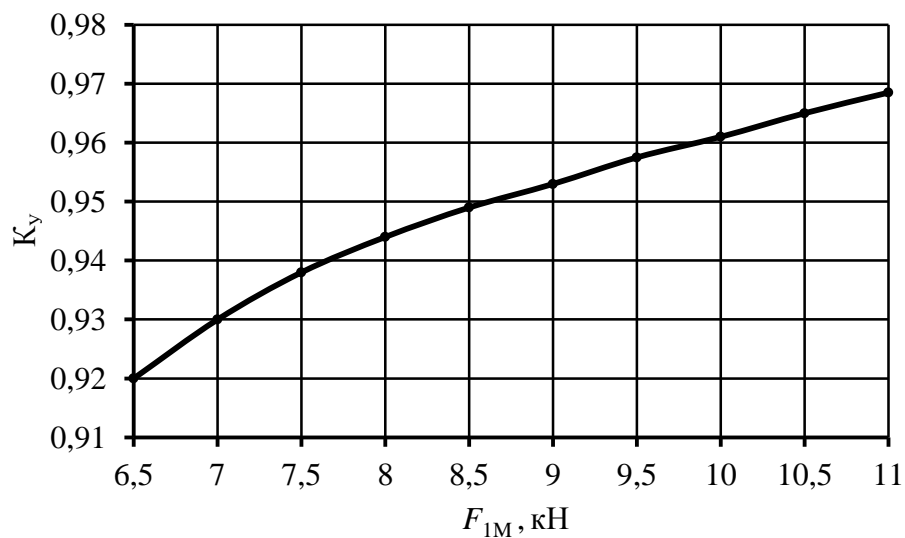


Рис. 2.16. Зависимость коэффициента уплотнения K_y от усилия F_{1M} на первом трамбуемом бруссе

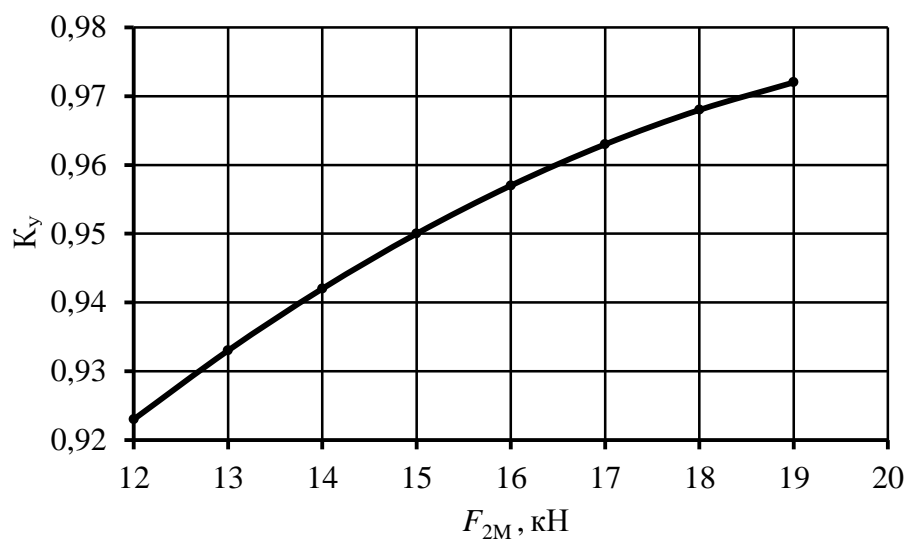


Рис. 2.17. Зависимость коэффициента уплотнения K_y от усилия F_{2M} на втором трамбуемом бруссе

В данном алгоритме в качестве начальных параметров, машинисту оператору достаточно задать *скорость движения* и требуемый *коэффициент уплотнения*. Задание начальной частоты трамбования исходя из рекомендаций нормативной литературы (для обеспечения на первых циклах трамбования коэффициента уплотнения, близкого к проектному).

После запуска алгоритма, система автоматического управления получит данные об усилиях, возникших на трамбуемом бруске, передаст их математическую модель, построенную на основе экспериментальных зависимостей, рис. 2.14, 2.15. В зависимости от усилий на брусках компьютер на основе модели выдаст ожидаемый коэффициент уплотнения, а сравнив его значение с проектным, сделает выводы о том требуется ли повысить частоту трамбования для достижения заданного значения K_y , либо уменьшить ее.

Преимущество данной системы в том, что если оператор ошибется в задании частоты трамбования, то она быстро установит ее на требуемый уровень. Также, если в процессе уплотнения появится неровный участок, увеличится толщина, то частота трамбования изменится и будет получена требуемая степень уплотнения на всем участке уплотнения. Таким образом, получается адаптивная интеллектуальная система.

Реализация алгоритма управления выполнена с помощью современной специальной программной системы компьютерной математики – матричной математической системы MATLAB [4, 5], пакета визуального имитационного и ситуационного моделирования Simulink, позволяющего исследовать линейные и нелинейные блочные динамические системы и устройства произвольного назначения, рис. 2.19.

Как видно из рис. 2.19, начальные параметры – частота трамбования и скорость движения асфальтоукладчика – подаются на вход модели асфальтоукладчика, представленной на рис. 2.20.

Это сделано для наглядной демонстрации работы алгоритма управления уплотнением смеси. Внутри модели существует две подсистемы для генерации усилий на первом и втором трамбуемых брусках, основанной на данных рис. 2.14, 2.15. К информационным данным прибавляется некоторый шум, обычно возникающий на тензодатчиках при работе реального асфальтоукладчика; при этом на первом бруске он частично влияет и на второй брус, т. к. во многом связан с неровностями и неравномерностями распределения плотности смеси по рабочему участку.

Далее, как видно из алгоритма рис. 2.18, информационные сигналы с тензодатчиков на брусках передаются на контроллер; кроме того, на вход поступают сигналы требуемого коэффициента уплотнения и шага изменения частоты трамбования.

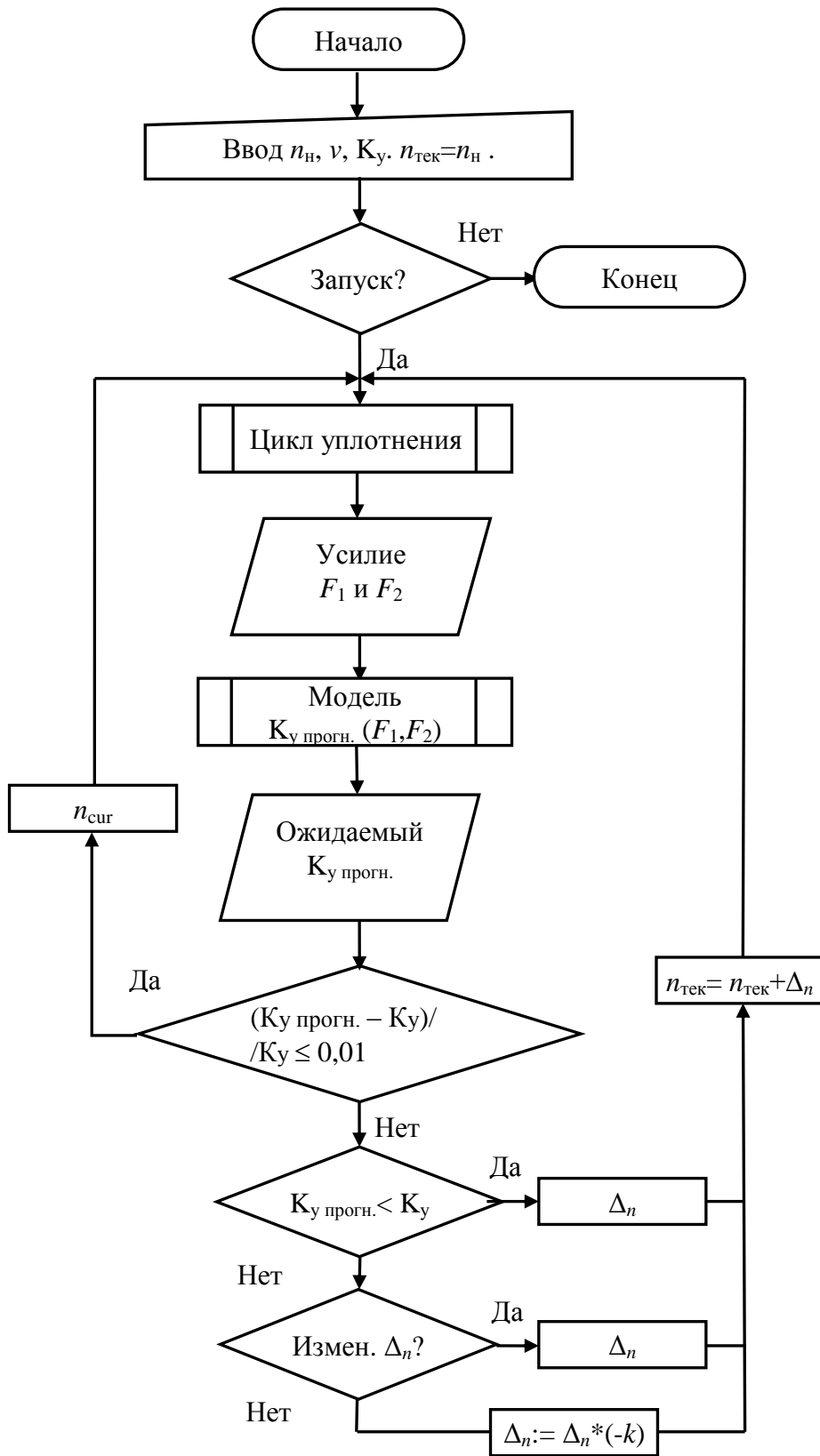


Рис. 2.18. Блок-схема алгоритма работы системы управления рабочим органом асфальтоукладчика в процессе уплотнения смеси

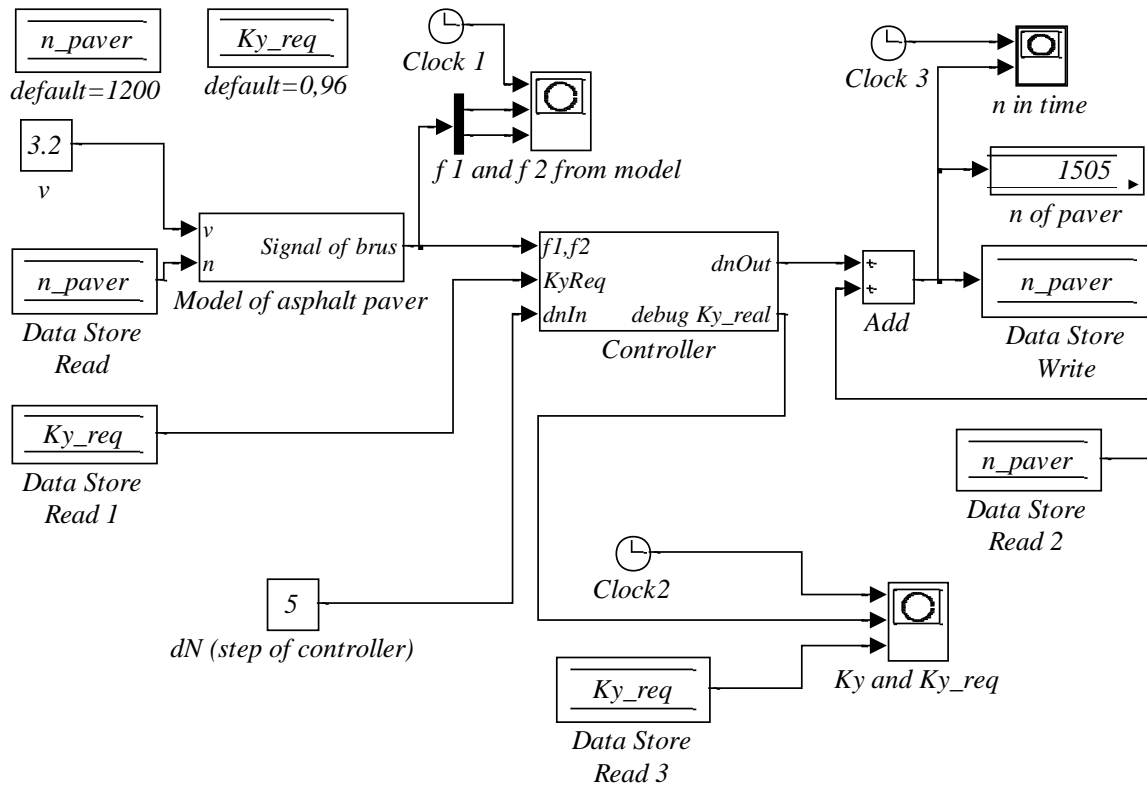


Рис. 2.19. Реализация алгоритма в программе MATLAB&Simulink

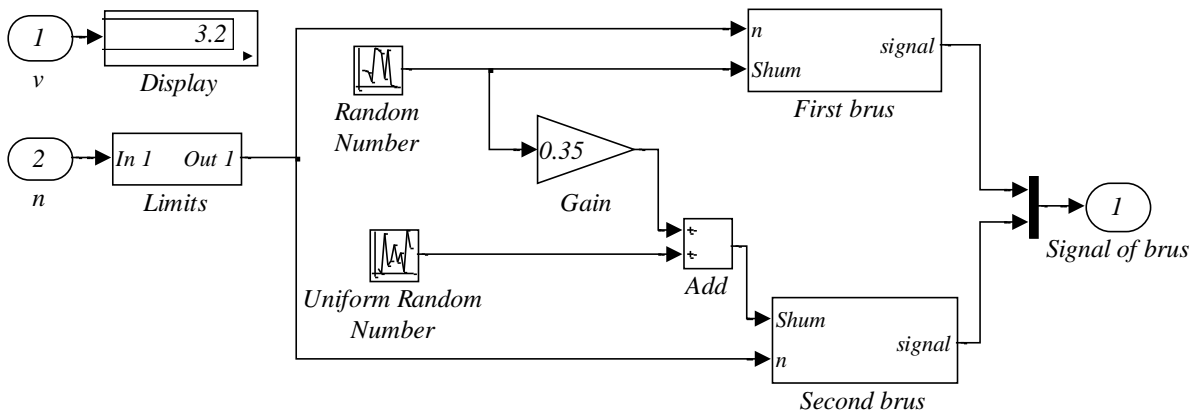


Рис. 2.20. Реализация модели асфальтоукладчика

В контроллере на основании усилий с трамбуемых брусьев генерируется ожидаемый коэффициент уплотнения, который, в свою очередь, проходит некоторую фильтрацию в блоке *limits* (см. рис. 2.20) с целью отсеивания «выбросов» системы.

Выходом контроллера является положительный или отрицательный заданный шаг изменения частоты в зависимости от требуемого и ожидаемого коэффициента уплотнения. Если требуется обеспечить большую частоту, т. е. больший коэффициент уплотнения, то вход положительный, и наоборот. Также контроллер выдает сигналы для корректировки ожидаемого коэффициента уплотнения.

Основной выход контроллера (изменение частоты) складывается с текущей частотой и присваивается в качестве новой частоты трамбования. Оптимизация частоты проводится на каждом цикле процесса уплотнения, что позволяет добиться лучшего качества уплотнения смеси, повысить производительность с наименьшими затратами ресурсов (как энергетических, так и человеческих).

Проведены испытания на математических моделях, разработанных в пакете MATLAB/Simulink, результаты которых изображены на рис. 2.21 – 2.23. Как видно, система управления эффективно оптимизирует процесс уплотнения смеси, а потому ее можно рекомендовать в качестве модернизированной системы автоматического управления добавлением подсистемы уплотнения.

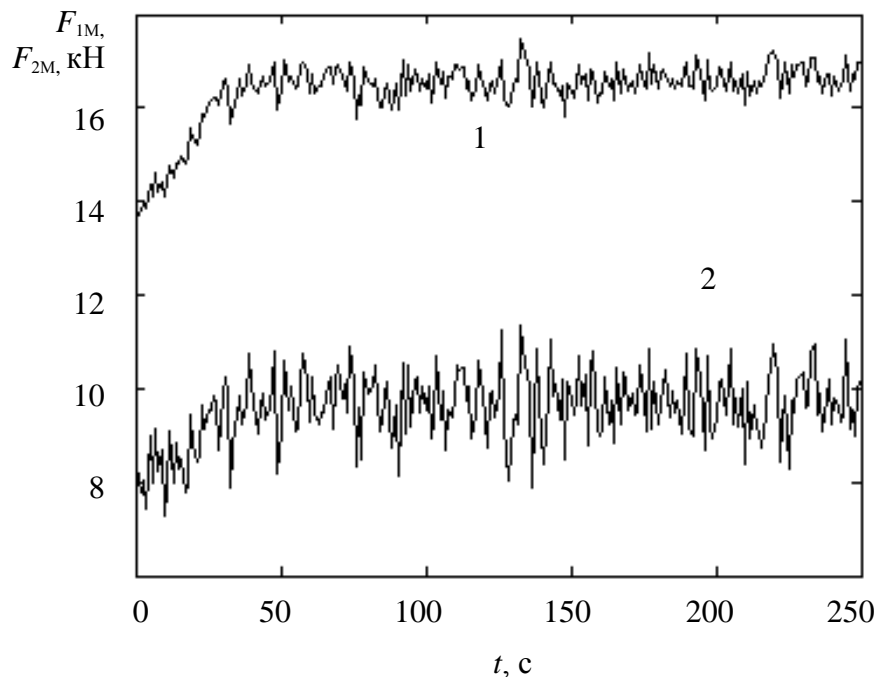


Рис. 2.21. Генерируемые усилия на трамбуемых брусьях:
1 – первый брус; 2 – второй брус

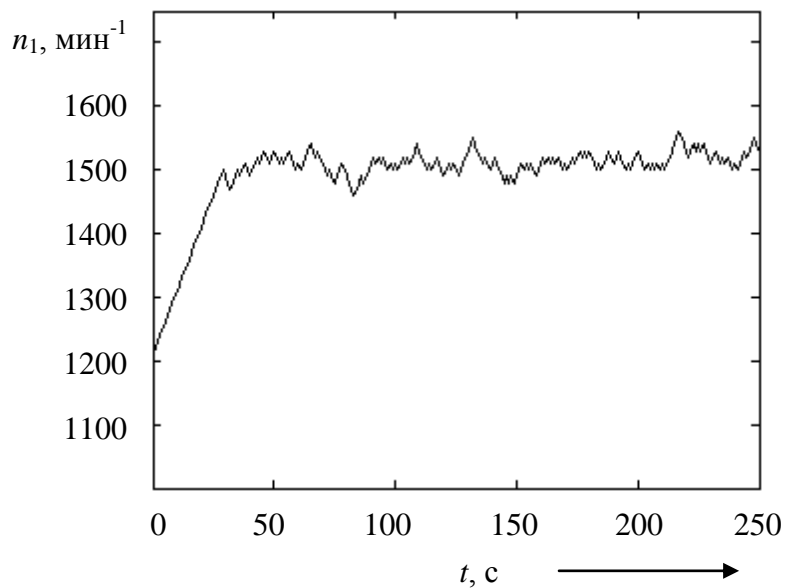


Рис. 2.22. Изменение частоты трамбования во времени

При моделировании, рис. 2.23, система управления сразу же «заметила» недостаточность текущей частоты трамбования и постепенно увеличивает ее. Как только система достигла показателей, близких к заданному K_y , оптимизация продолжается в зависимости от неровностей микрорельефа основания.

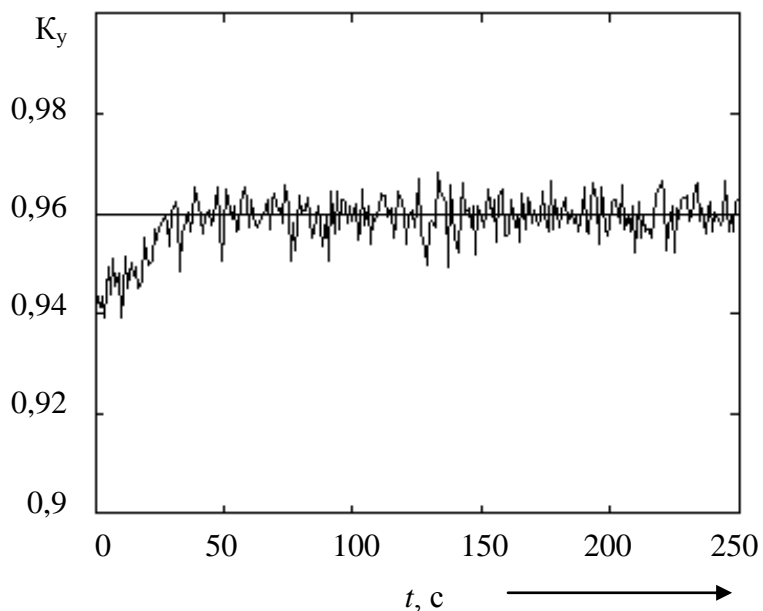


Рис. 2.23. Моделирование работы системы управления уплотнением смеси при заданном значении $K_y = 0,96$

На основе опытных данных разработана *блок-схема системы автоматического управления уплотняющим рабочим органом* асфальтоукладчика. Сформирована модель системы управления с применением программного комплекса MATLAB&Simulink. В результате создан комплекс для моделирования уплотнения смеси, исследования и оптимизации режимных параметров процесса. Важными особенностями моделей являются их *доступность* и *возможность широкого применения* в исследовательской и инженерной практике.

2.3. Имитационное моделирование автоматической системы управления рабочим органом асфальтоукладчика

При перемещении асфальтоукладчика по основанию, готовому для укладки на него дорожного покрытия нежесткого типа, его ходовое оборудование, гусеничное или колесное, произвольно движется в вертикальном направлении (под воздействием микрорельефа основания дороги). Это неуправляемое движение передаётся через основную раму асфальтоукладчика и подвеску выглаживающей вибрационной плиты на рабочее оборудование, вызывая неуправляемое перемещение выглаживающей вибрационной плиты, что влечет за собой случайное изменение толщины и поперечного уклона дорожного полотна и ухудшение качества дорожного покрытия.

Схема имитационной модели следящей системы гидропривода выглаживающей плиты асфальтоукладчика, реализованная в программе MATLAB&Simulink, показана на рис. 2.24.

В состав схемы входят следующие элементы:

- гидроцилиндр двунаправленного действия;
- трёхпозиционный гидрораспределитель;
- гидравлический насос;
- управляемый гидрозамок;
- идеальный гидравлический датчик давления;
- элемент «выглаживающая плита асфальтоукладчика»;
- сенсор, который даёт информацию о перемещении и скорости штока гидроцилиндра (датчик обратной связи «Sensor»);
- элемент «идеальный сенсор силы»;
- элемент «гидравлическая жидкость», в данном случае масло «Oil-30W»;
- элемент «вязкое трение»;
- идеальный источник силы;

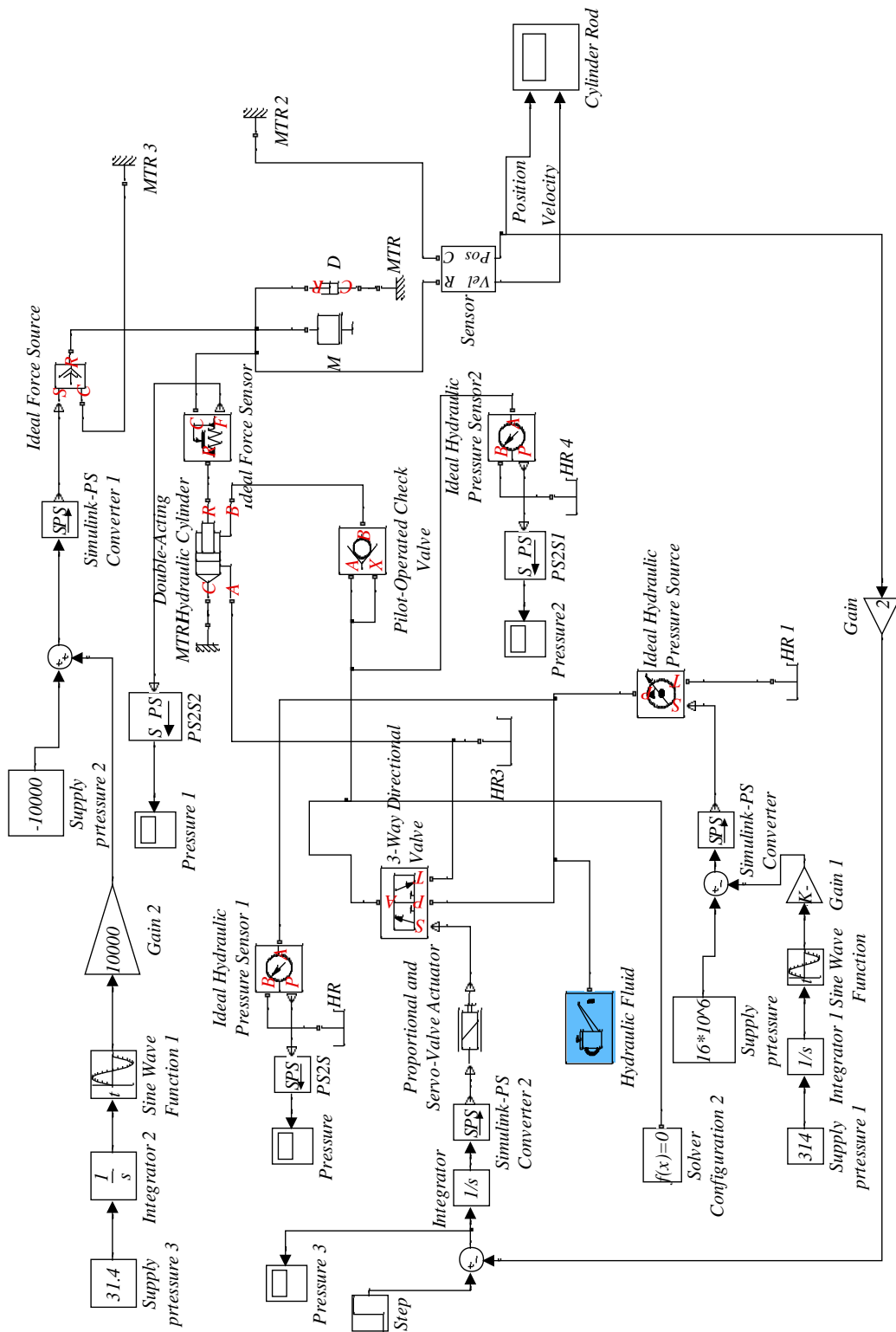


Рис. 2.24. Схема имитационной модели следящей системы гидропривода выглаживающей плиты асфальтоукладчика, реализованной в Simulink

- пропорциональный сервоклапан гидропривода (электрогидравлический распределитель, преобразующий электрический сигнал в перемещение);
- возмущающее воздействие «микрорельеф»;
- PS-конвертор;
- ёмкость для рабочей жидкости;
- возмущающее воздействие, обусловленное влиянием работы других элементов.

Пример задания исходных данных гидроцилиндра в Simulink представлен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные гидроцилиндра

Параметры	Величина
Площадь штока, м ²	0,0059
Площадь поршня, м ²	0,00785
Ход поршня, м	0,25
Начальное расстояние от верха штока, м	0,24
«Мертвый» объем штока, м ³	0,0019625
«Мертвый» объем поршня, м ³	0,0019625
Коэффициент исполнения	1,33
Контактная жесткость, Н/м	1000000
Контактное демпфирование, Н/(м/с)	20

Кроме того, в рассмотренную гидравлическую схему входят такие элементы, как сумматор, интегратор, усилитель, блок задания синусоиды, константа и т. п.

2.3.1. Результаты имитационного моделирования

Авторами была исследована отработка перемещений следящей системы гидропривода в диапазоне 0,005 – 0,25 м. Результаты моделирования динамики системы, при заданном перемещении 0,005 м, показаны на рис. 2.25 – 2.27.

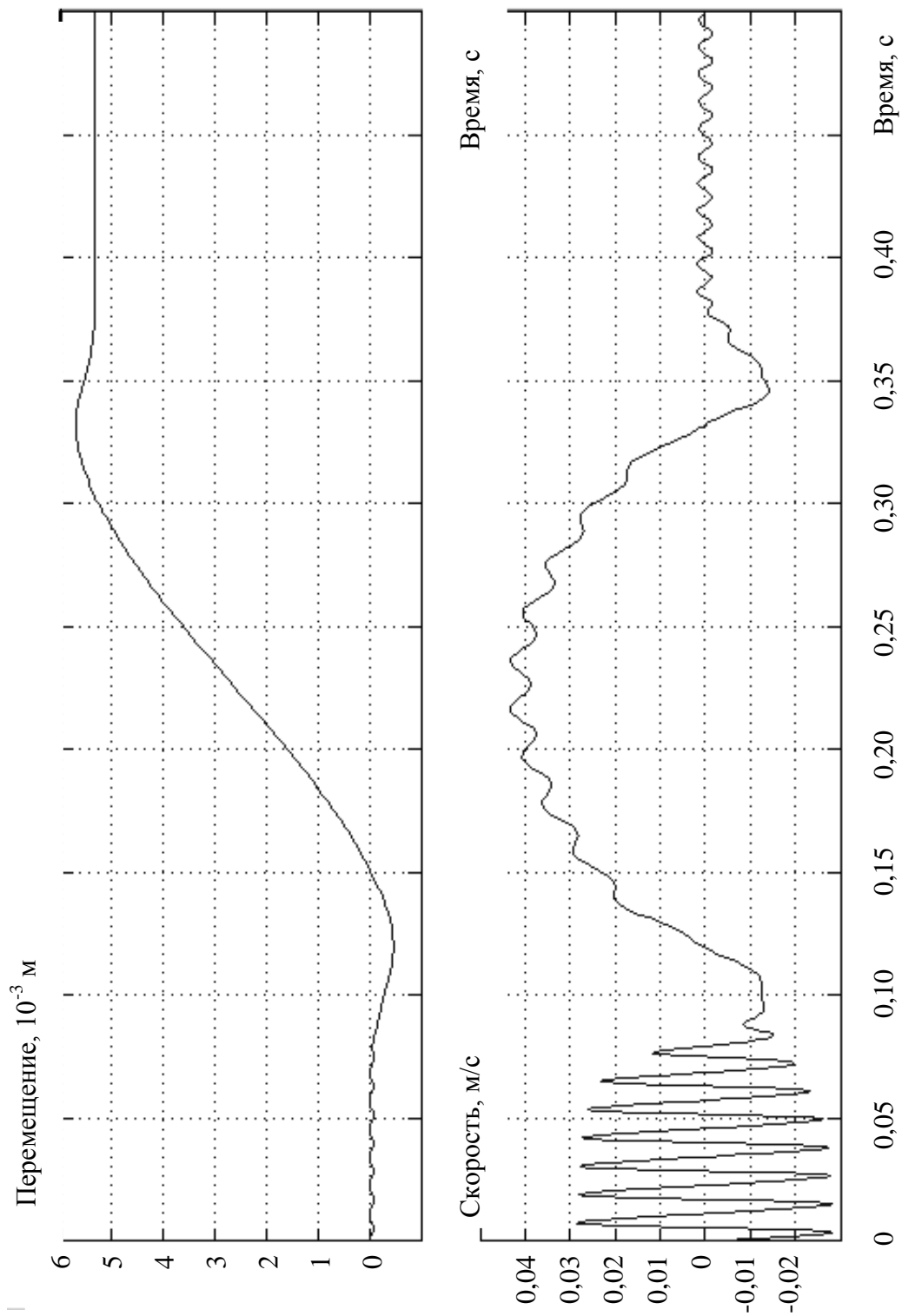


Рис. 2.25. Результаты моделирования при перемещении в 0,005 метра

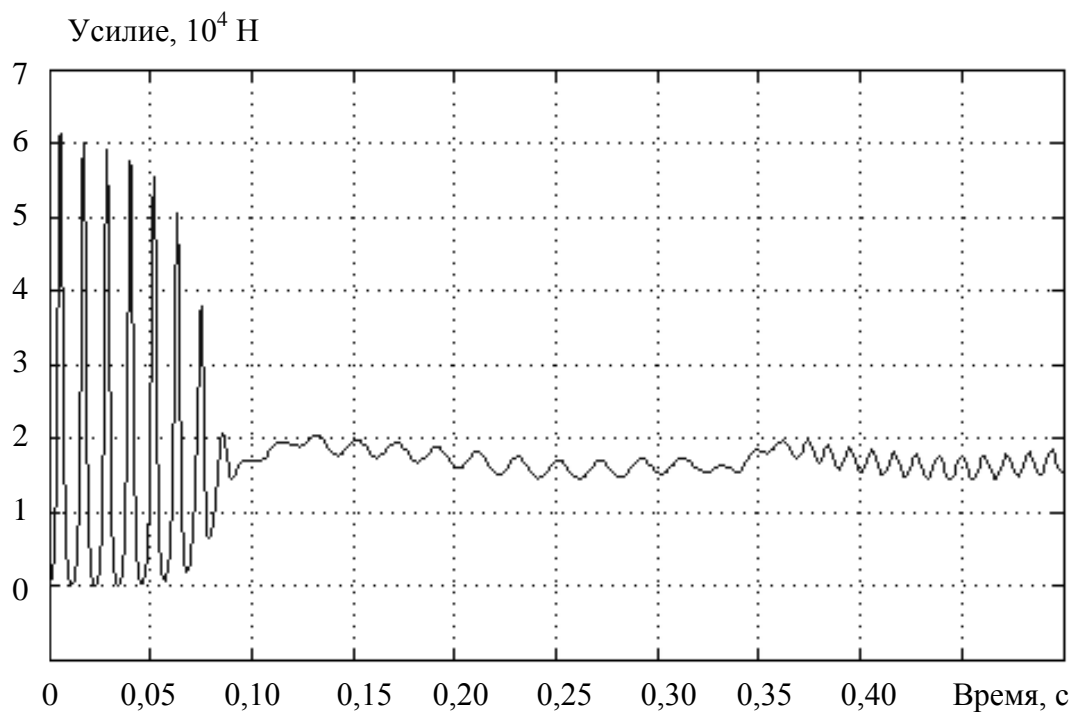


Рис. 2.26. Усилие на штоке при перемещении в 0,005 метра

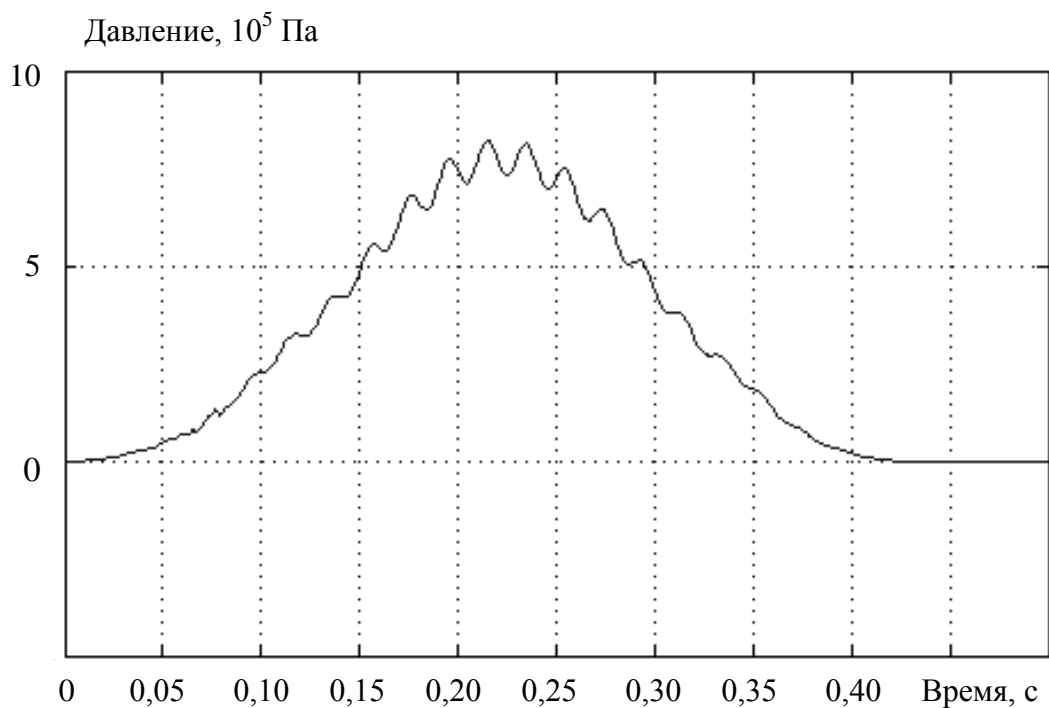


Рис. 2.27. Изменение давления в штоковой области

Система обрабатывает заданное перемещение в 0,005 метра.

Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе.

Частота колебаний объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

Результаты моделирования динамики системы при перемещении в 0,055 м показаны на рис. 2.28 – 2.30.

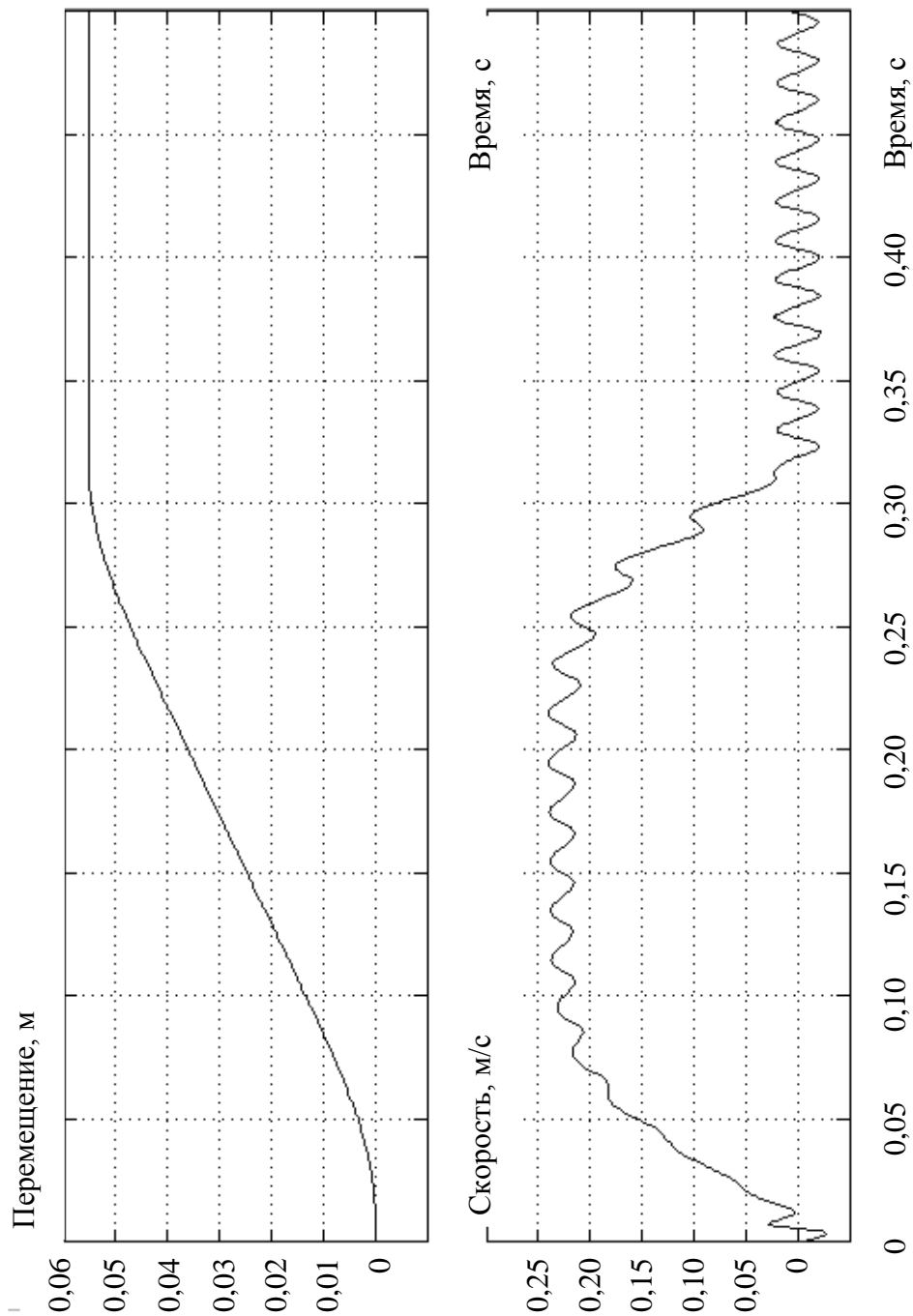


Рис. 2.28. Результаты моделирования при перемещении в 0,055 метра

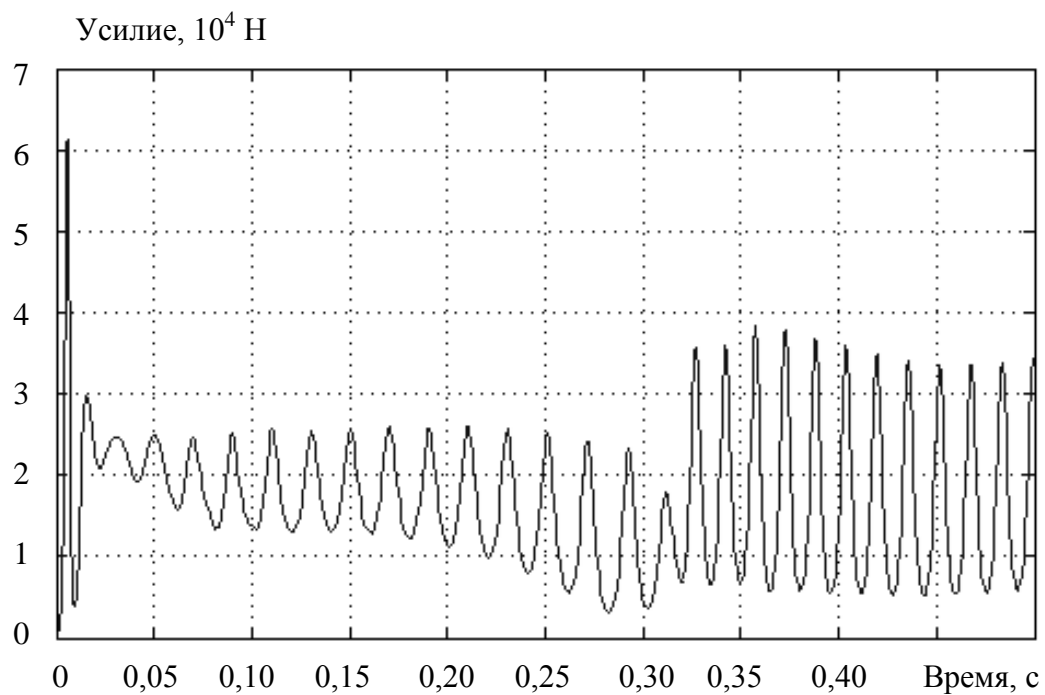


Рис. 2.29. Усилие на штоке при перемещении в 0,055 метра

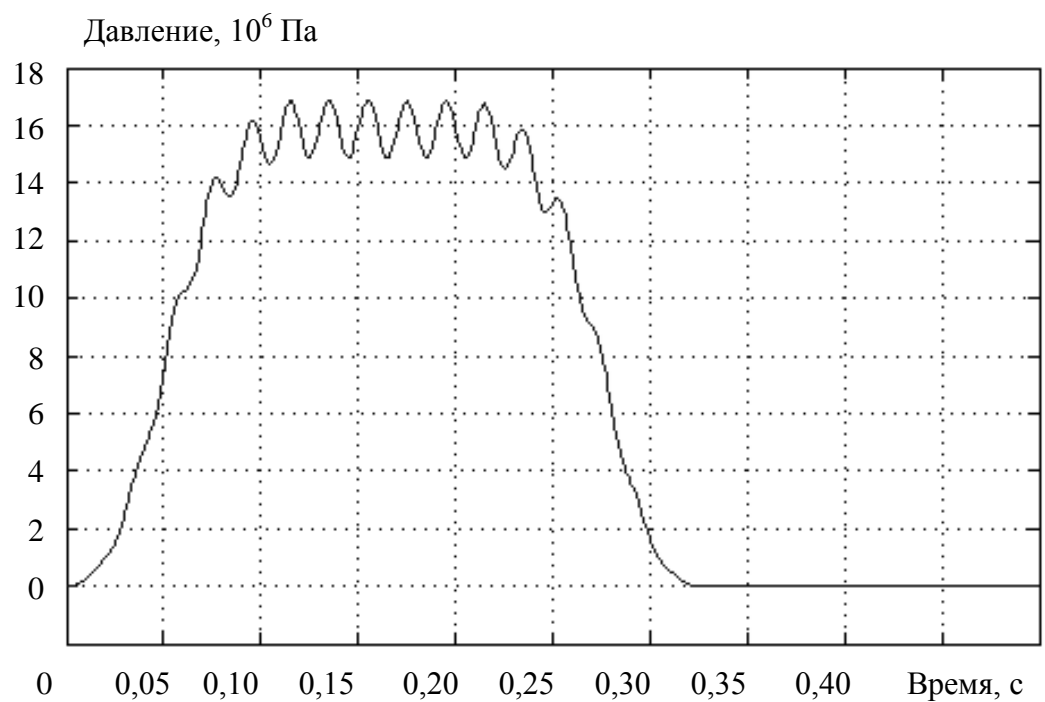


Рис. 2.30. Изменение давления в штоковой области при перемещении в 0,055 метра

Система обрабатывает заданное перемещение 0,055 метра. Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе. Частота колебаний объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

Результаты моделирования динамики системы при перемещении в 0,1 м показаны на рис. 2.31 – 2.33.

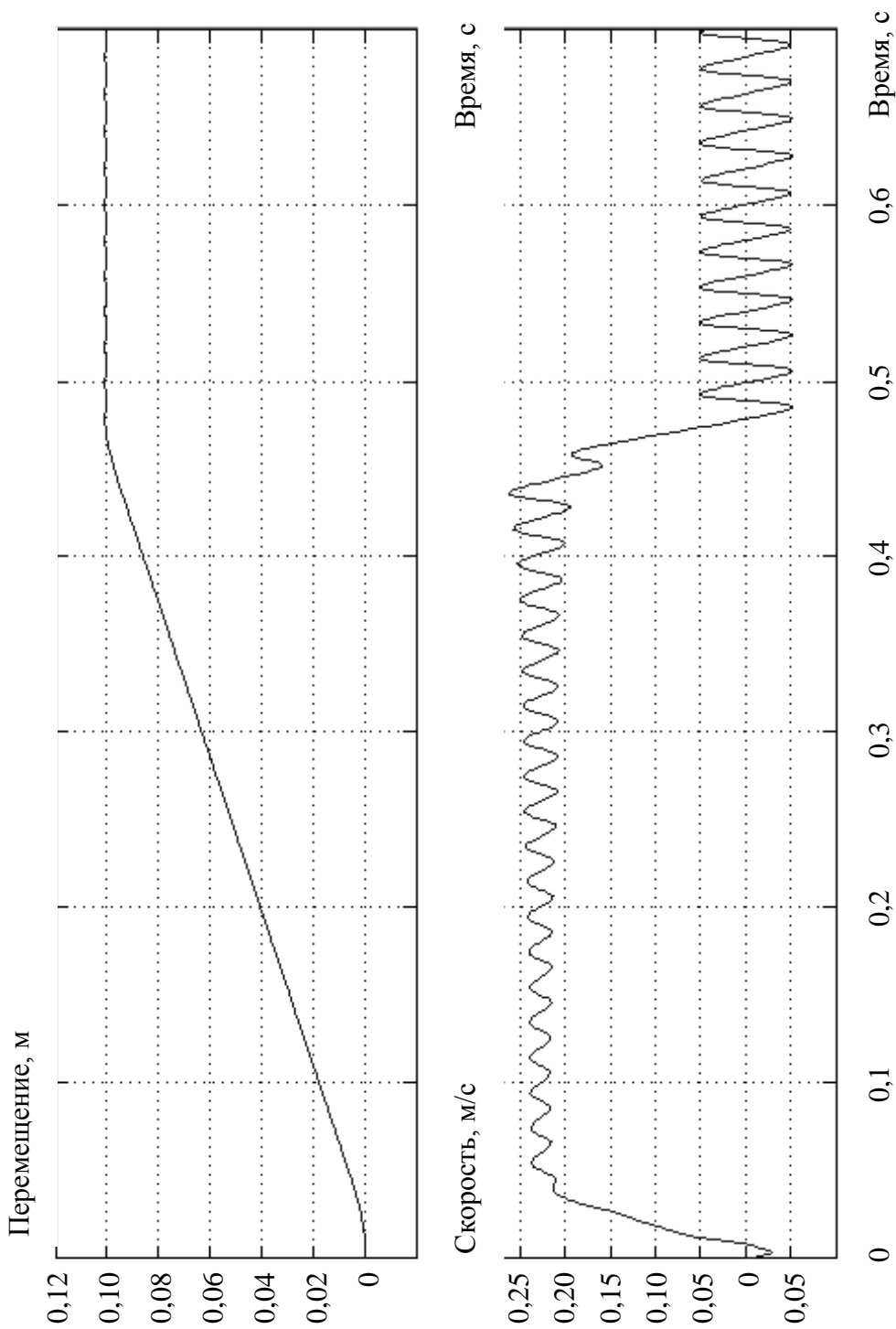


Рис. 2.31. Результаты моделирования при перемещении в 0,1 метра

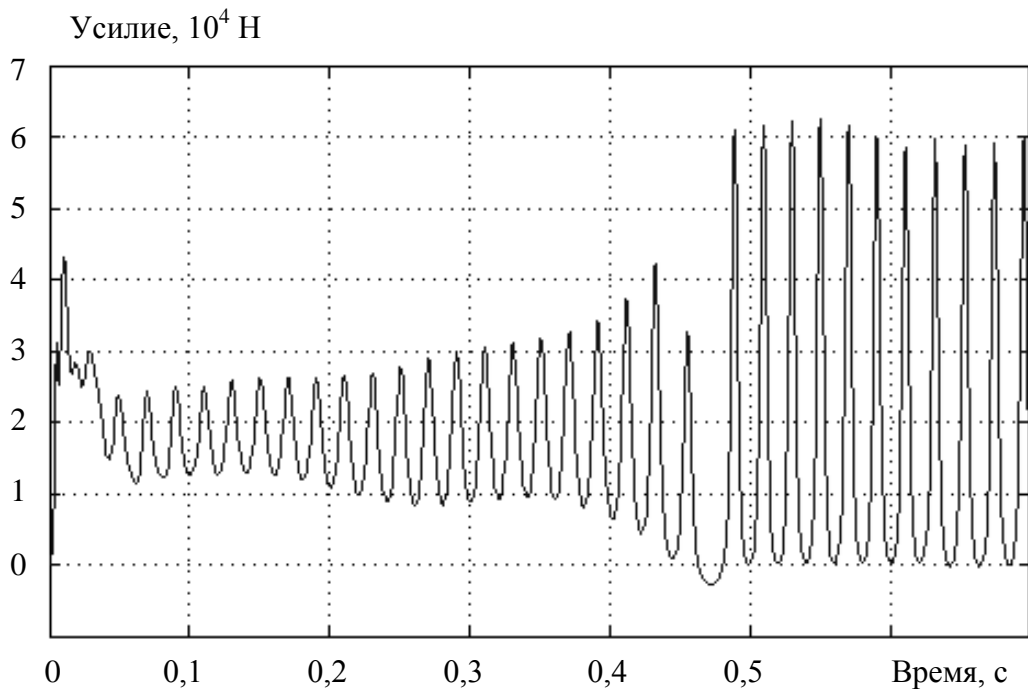


Рис. 2.32. Усилие на штоке при перемещении в 0,1 метра

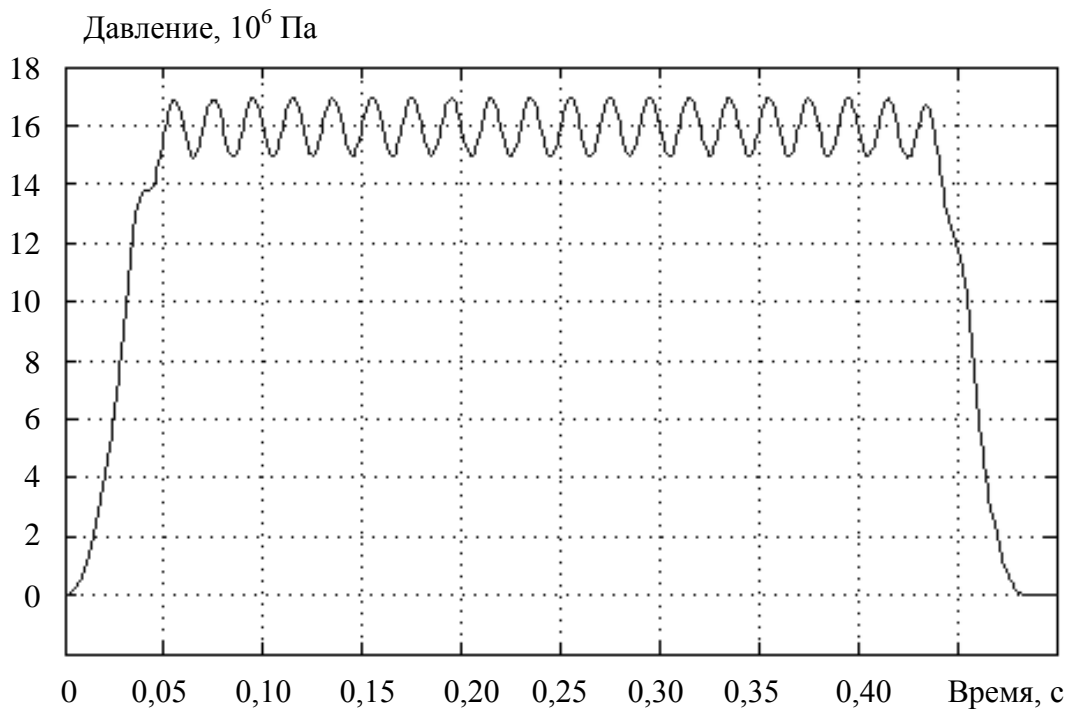


Рис. 2.33. Изменение давления в штоковой области при перемещении в 0,1 метра

Система обрабатывает заданное перемещение в 0,1 метра.

Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе. Колебание давления объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

Результаты моделирования динамики системы при перемещении 0,15 м показаны на рис. 2.34 – 2.36.

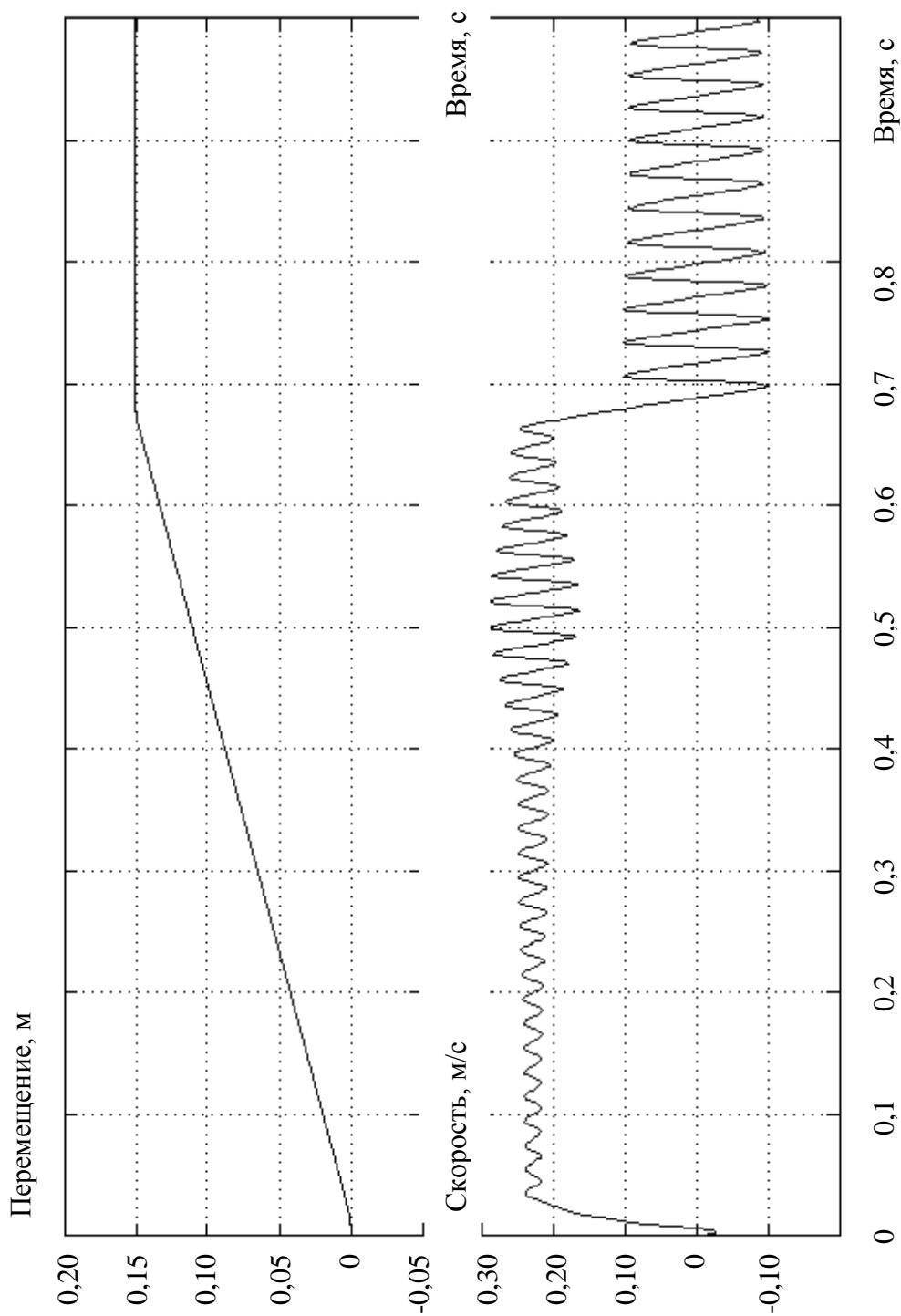


Рис. 2.34. Результаты моделирования при перемещении в 0,15 метра

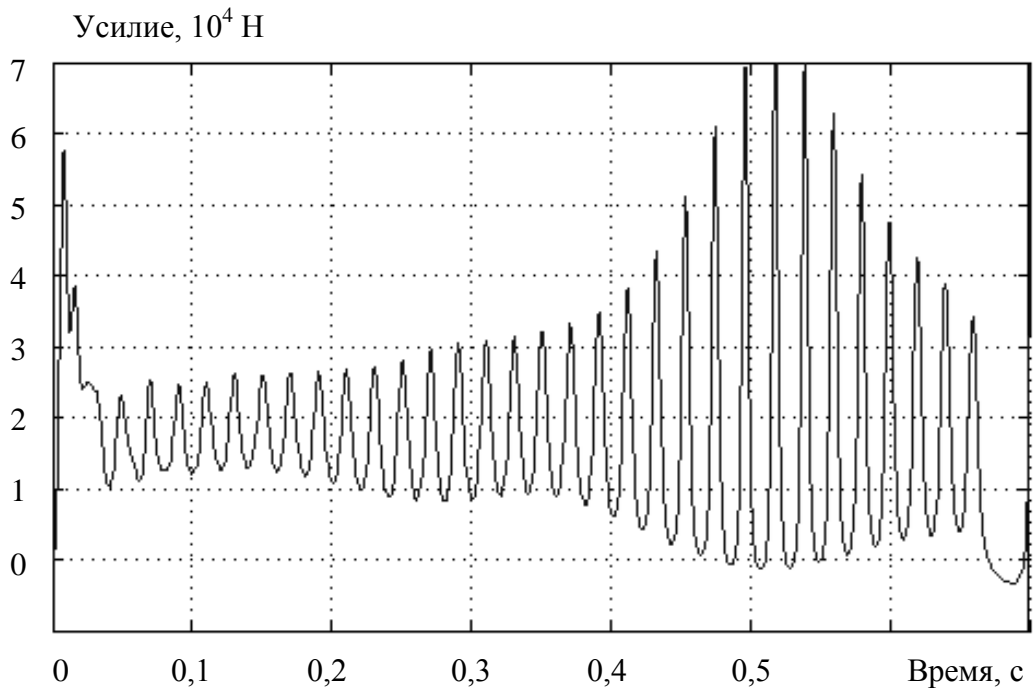


Рис. 2.35. Усилие на штоке при перемещении в 0,15 метра

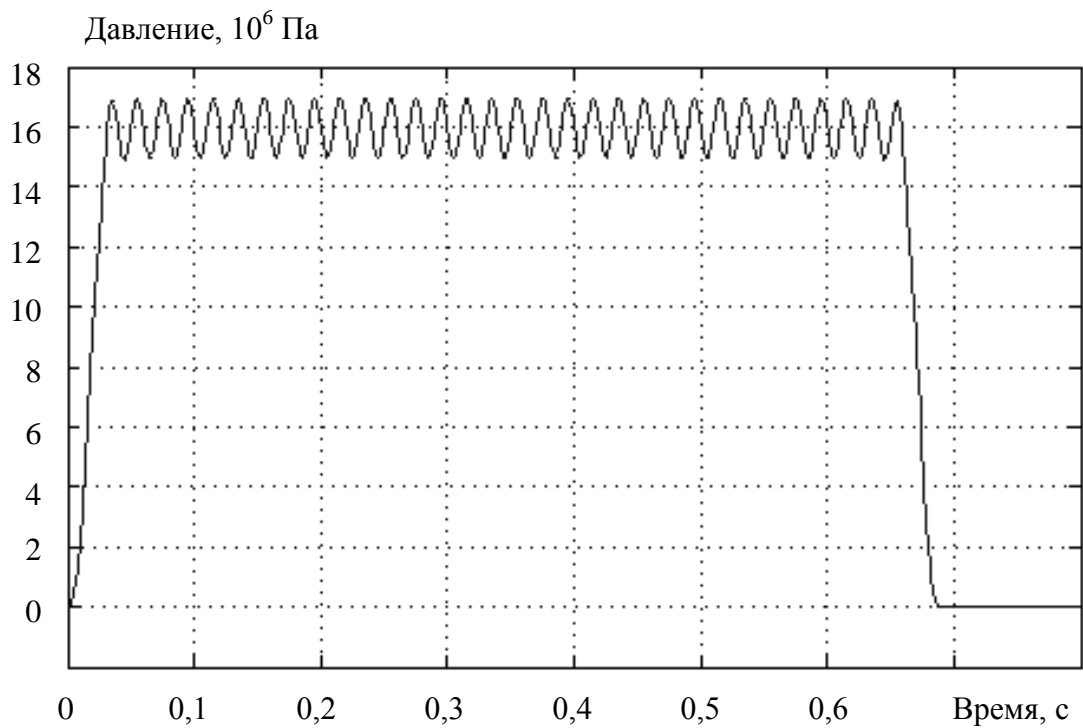


Рис. 2.36. Изменение давления в штоковой области при перемещении в 0,15 метра

Система обрабатывает заданное перемещение 0,15 метра.

Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе. Частота колебаний объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

Результаты моделирования динамики системы при перемещении 0,2 м показаны на рис. 2.37 – 2.39.

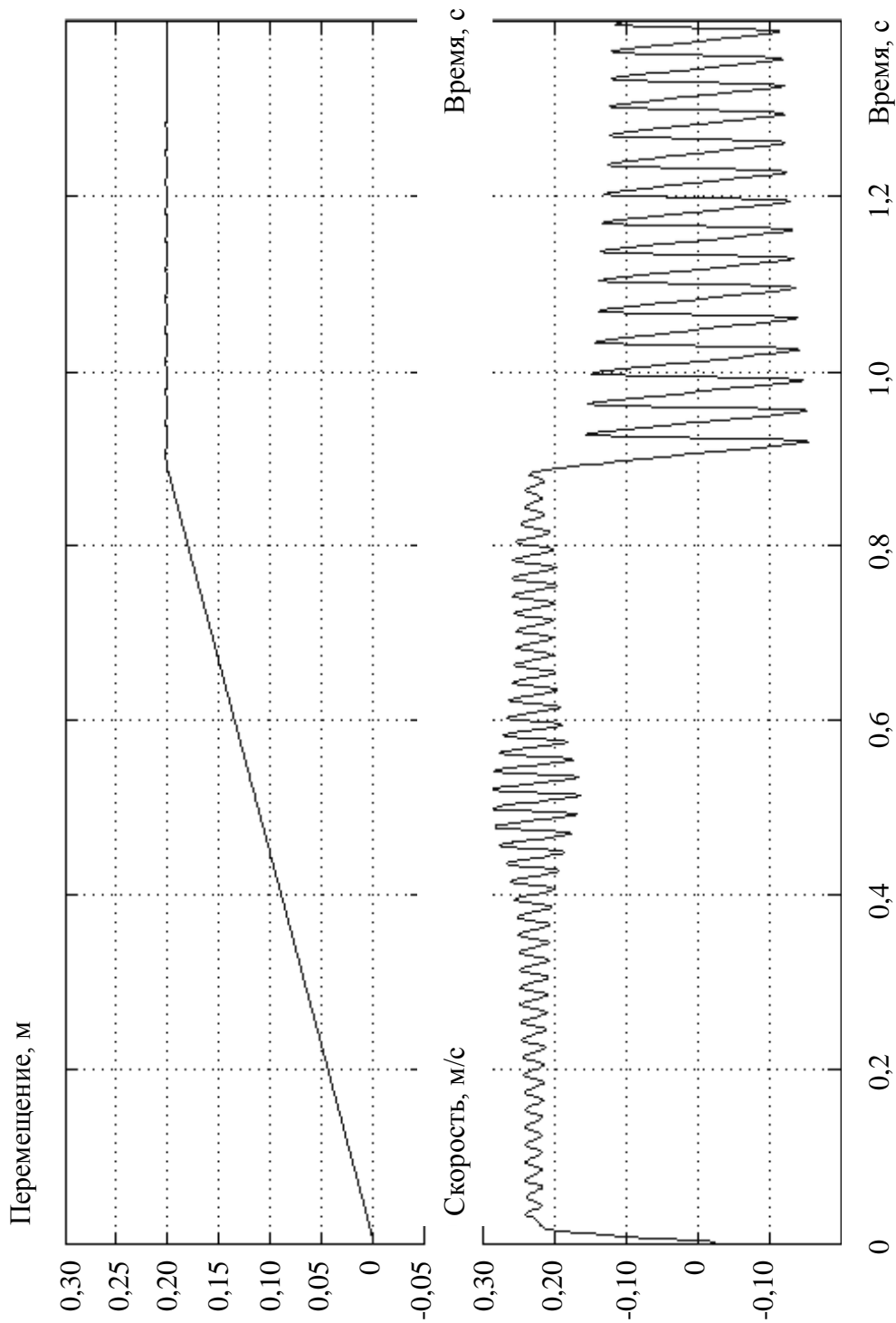


Рис. 2.37. Результаты моделирования при перемещении в 0,2 метра

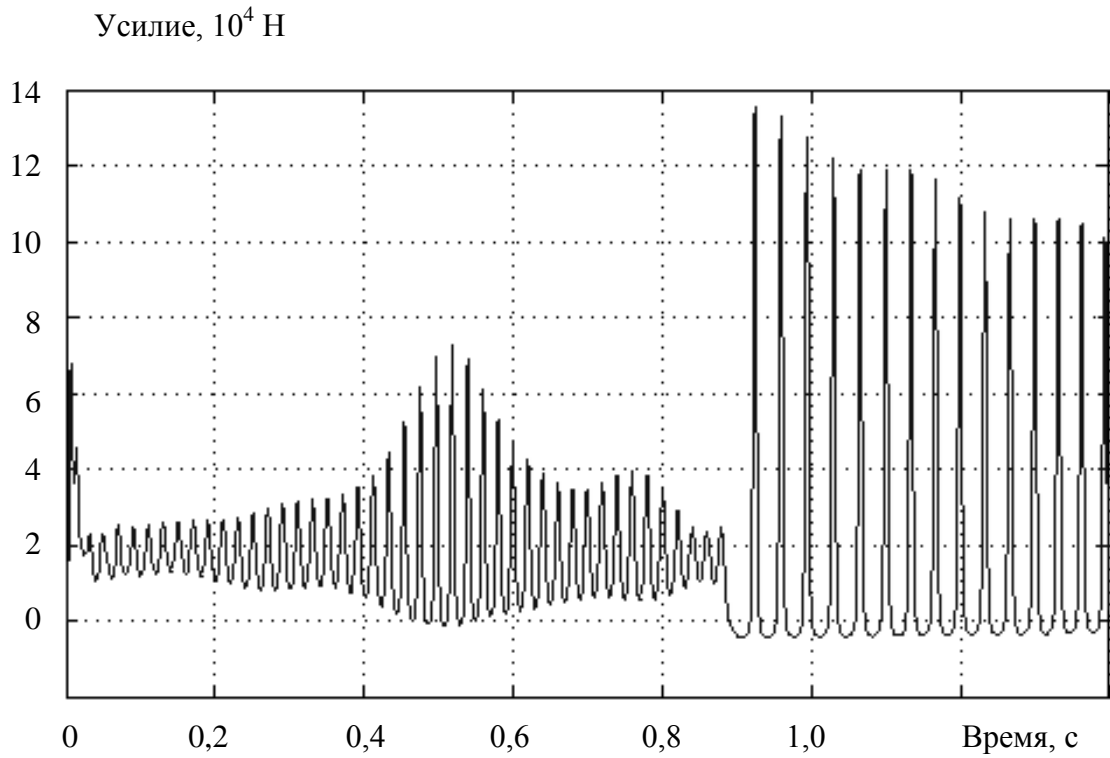


Рис. 2.38. Усилие на штоке при перемещении в 0,2 метра

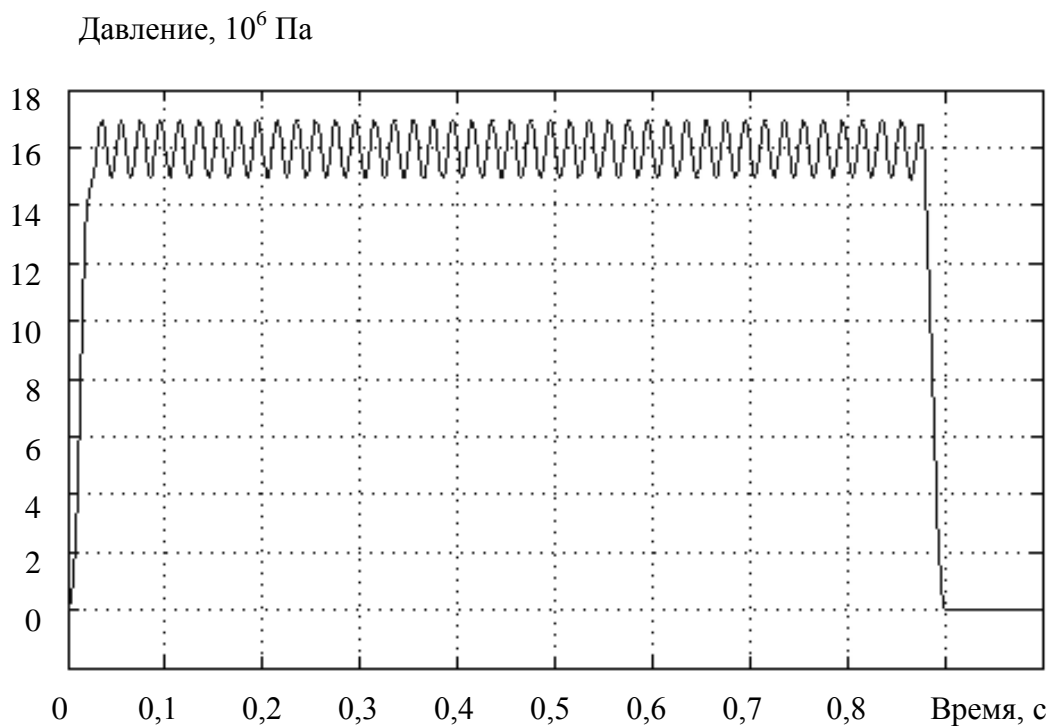


Рис. 2.39. Изменение давления в штоковой области при перемещении в 0,2 метра

Система обрабатывает заданное перемещение в 0,2 метра.

Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе. Частота колебаний объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

Результаты моделирования динамики системы при перемещении в 0,25 м показаны на рис. 2.40 – 2.42.

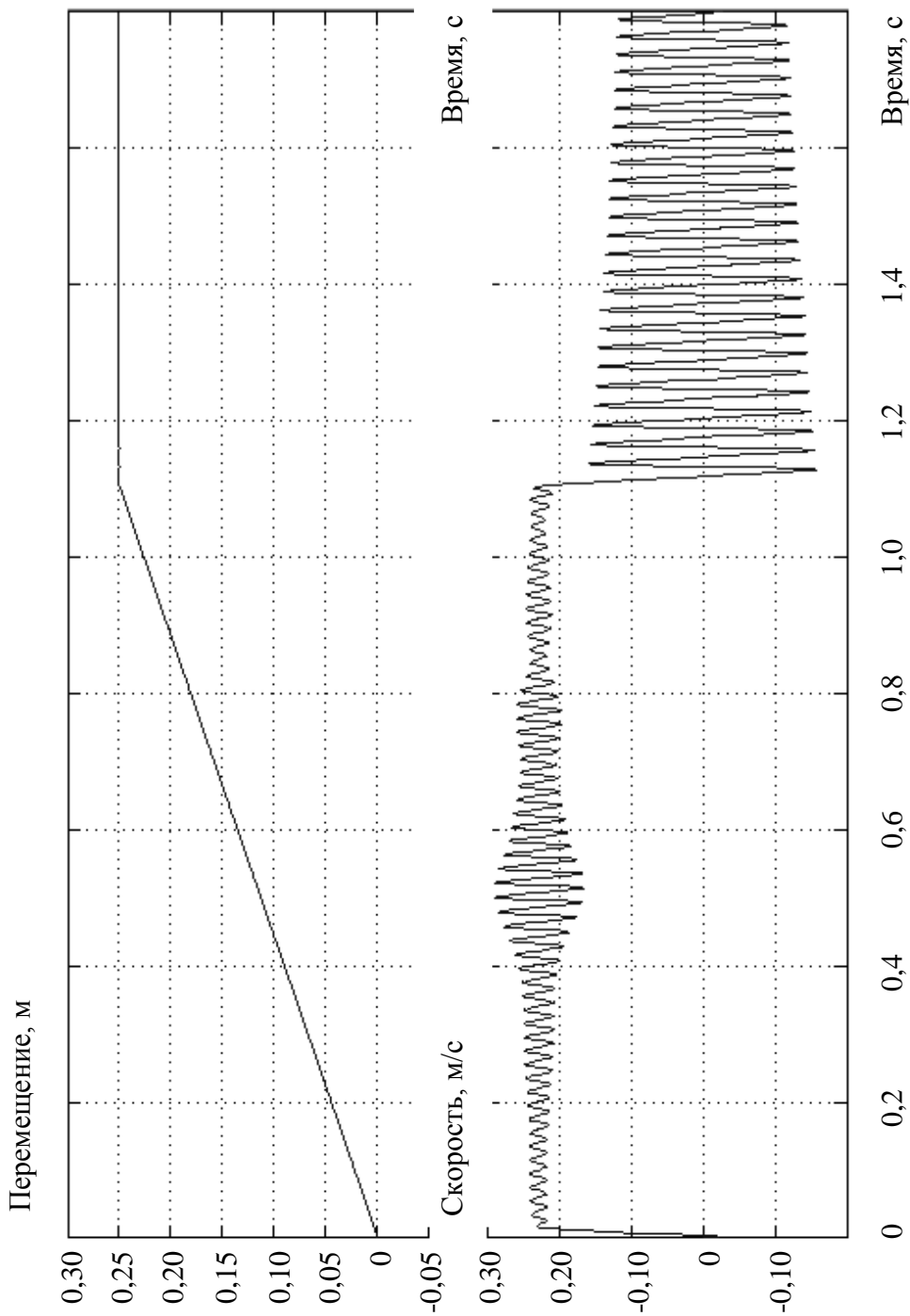


Рис. 2.40. Результаты моделирования при перемещении в 0,25 метра

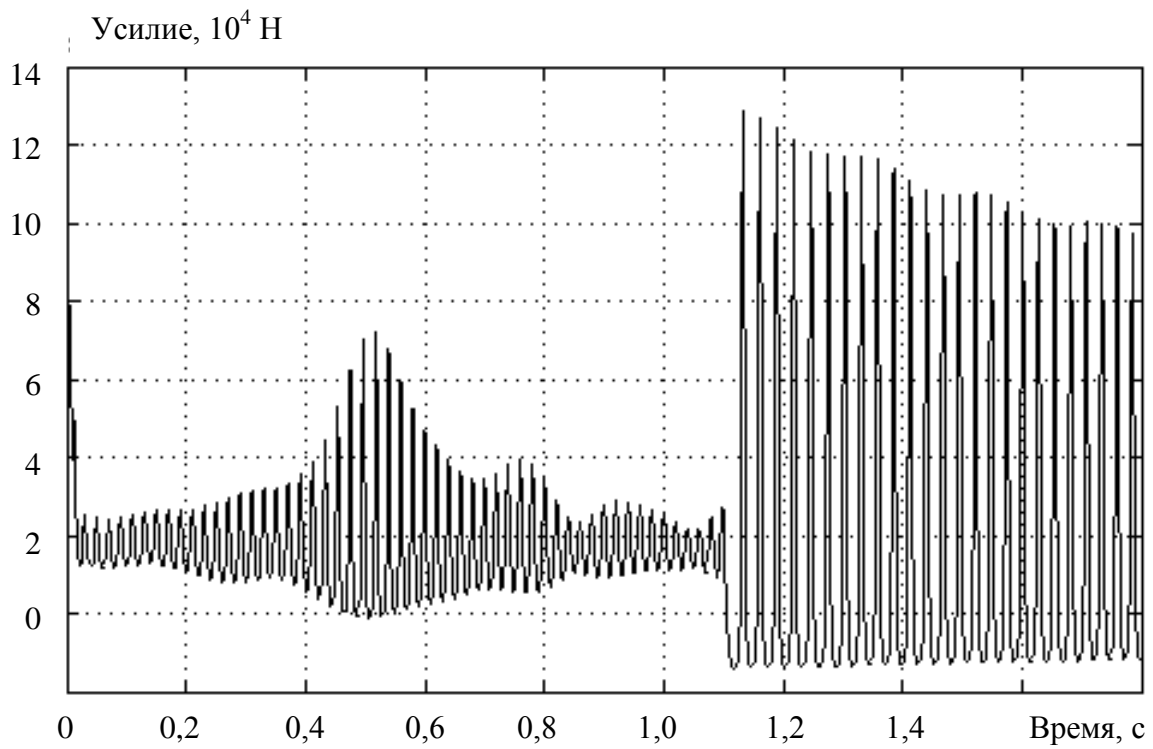


Рис. 2.41. Усилие на штоке при перемещении в 0,25 метра

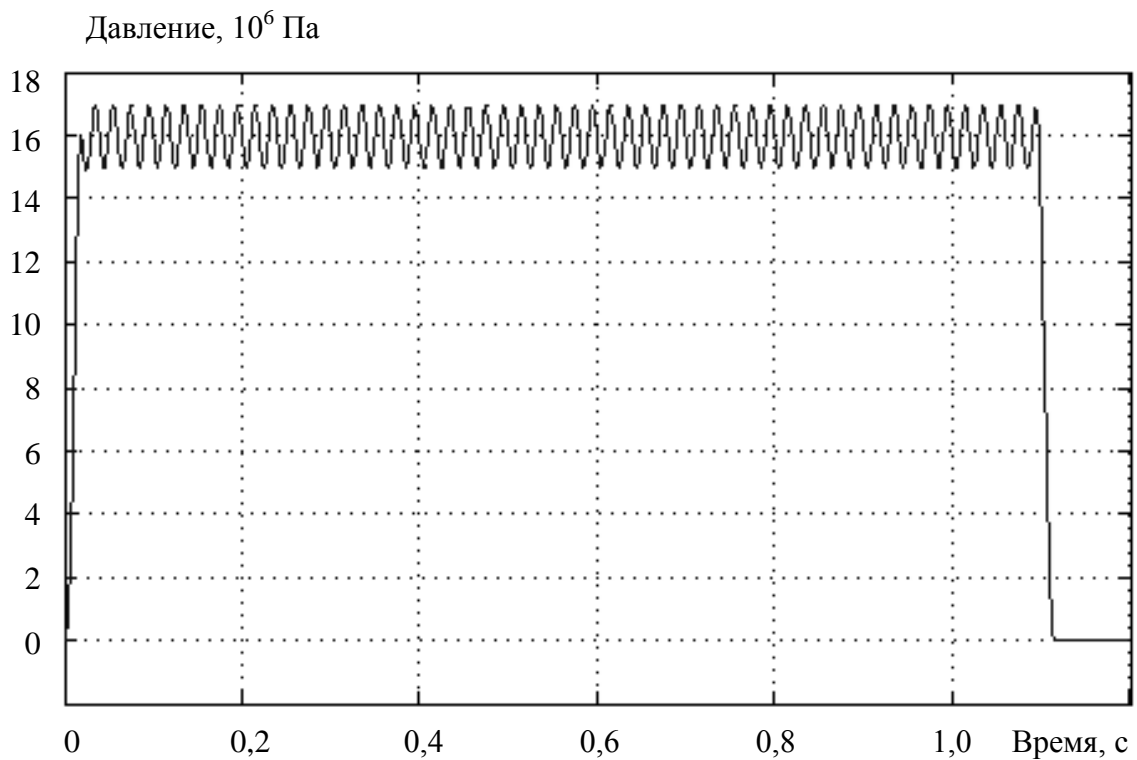


Рис. 2.42. Изменение давления в штоковой области при перемещении в 0,25 метра

Система обрабатывает заданное перемещение в 0,25 метра.

Статическая ошибка отсутствует, что соответствует астатической системе. Частота колебаний объясняется воздействиями, связанными с работой других элементов гидросистемы.

При изменении заданного перемещения давление на поршне остаётся постоянным, рис. 2.43.

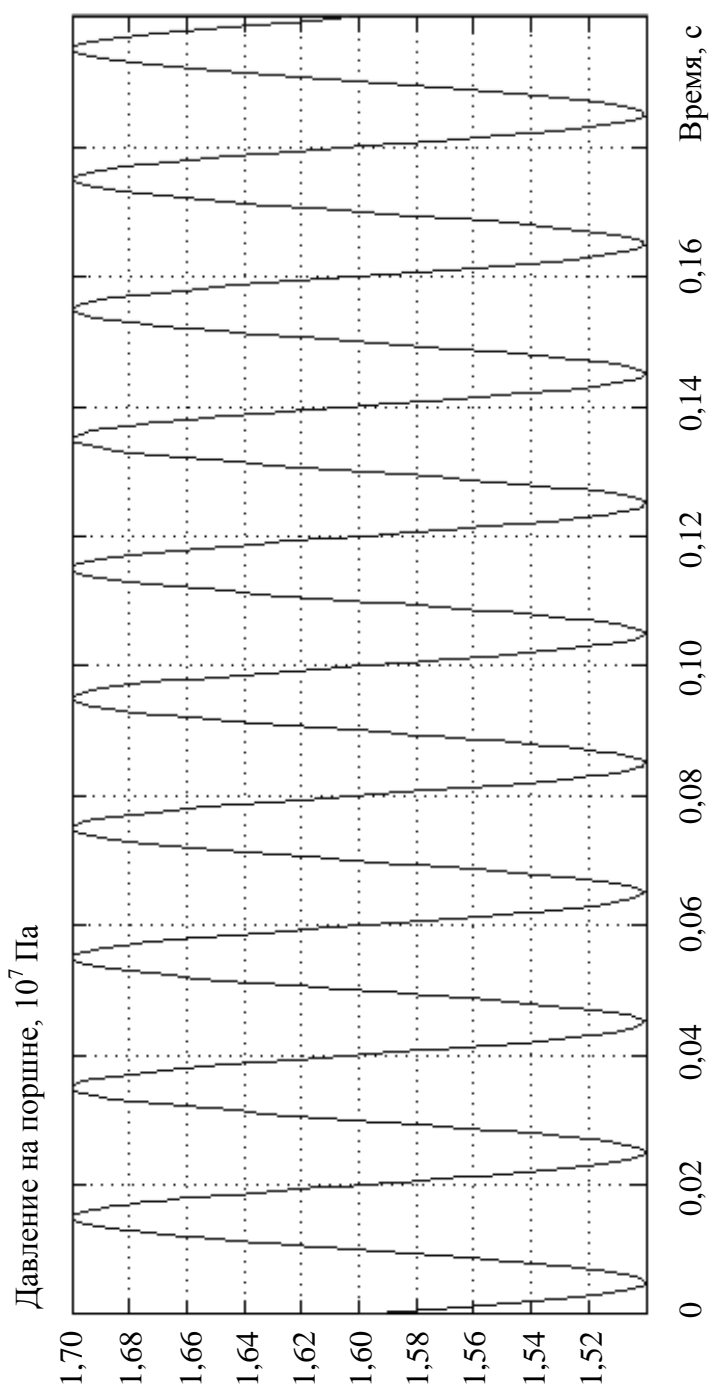


Рис. 2.43. Давление на поршне гидроцилиндра при перемещении в 0,25 метра

Результаты моделирования приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты моделирования

Заданное перемещение, м	Средняя скорость, м/с	Время отработки, с	Перерегулирование, %	Усилие на штоке, Н
0,005	0,022	0,38	14,0	$6,10 \times 10^4$
0,055	0,212	0,31	1,80	$6,12 \times 10^4$
0,10	0,22	0,48	0,67	$4,30 \times 10^4$
0,15	0,22	0,68	0,67	$5,80 \times 10^4$
0,20	0,22	0,95	0,75	$6,80 \times 10^4$
0,25	0,22	1,10	0,40	$8,00 \times 10^4$

Значения скорости совпадают с расчетными: следовательно, систему можно считать адекватной.

2.3.2. Структурно-параметрическая оптимизация. Выбор регулятора

Уравнение динамики, характеризующее перемещение штока гидроцилиндра, пренебрегая постоянными времени датчиков и упругостью [25], можно записать так:

$$F(t) - F_c(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt}, \quad (2.5)$$

где $F(t)$ – воздействие, определяемое усилием на штоке цилиндра; $F_c(t)$ – воздействие, определяемое весом выглаживающей плиты; m – масса выглаживающей плиты, кг; b – параметр вязкого трения; x – перемещение, м.

После преобразования уравнение (2.5) примет следующий вид:

$$\frac{1}{m} \left(F(t) - F_c(t) - b \frac{dx(t)}{dt} \right) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}. \quad (2.6)$$

По дифференциальному уравнению (2.6) составим функциональную схему следящей системы гидропривода выглаживающей плиты, рис. 2.44.

Передаточная функция $W(p)$ линейной части разомкнутой системы, рис. 2.45:

$$W(p) = \frac{k_\varepsilon}{p(Tp + 1)},$$

где $k_\varepsilon = \frac{F_m}{b\Delta l}$, $T = \frac{m}{b}$.

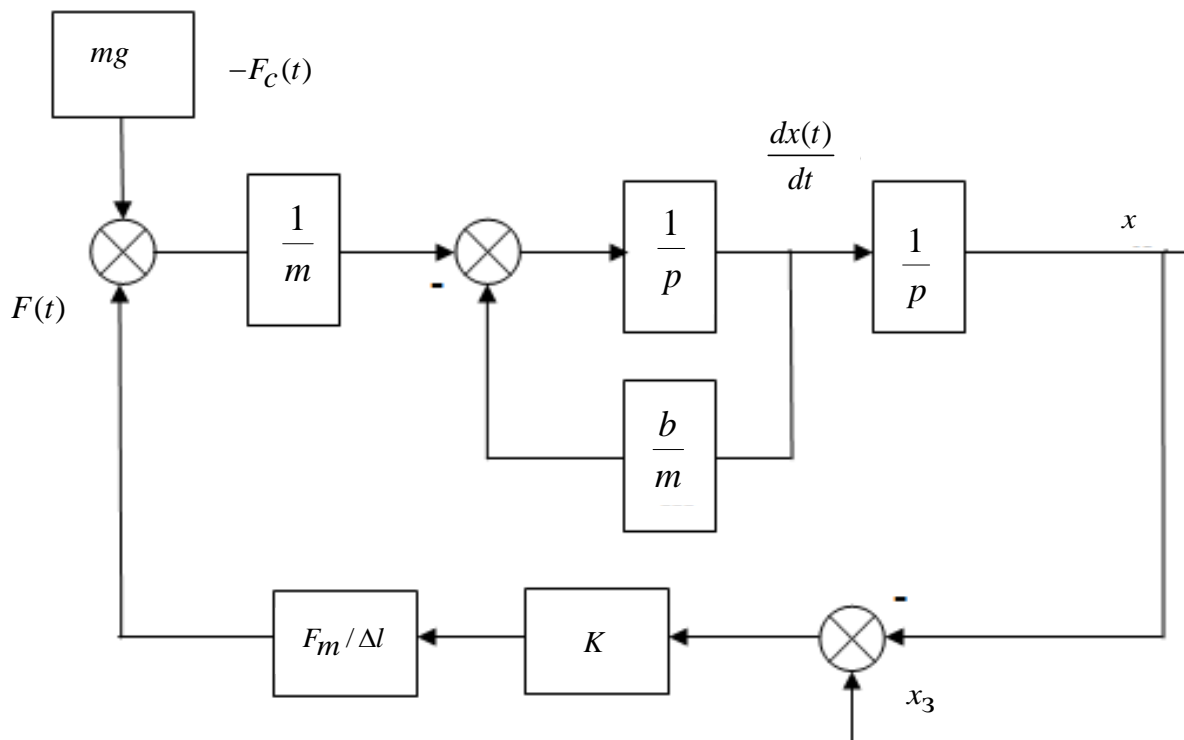


Рис. 2.44. Структурная схема следящей системы гидропривода выглаживающей плиты асфальтоукладчика

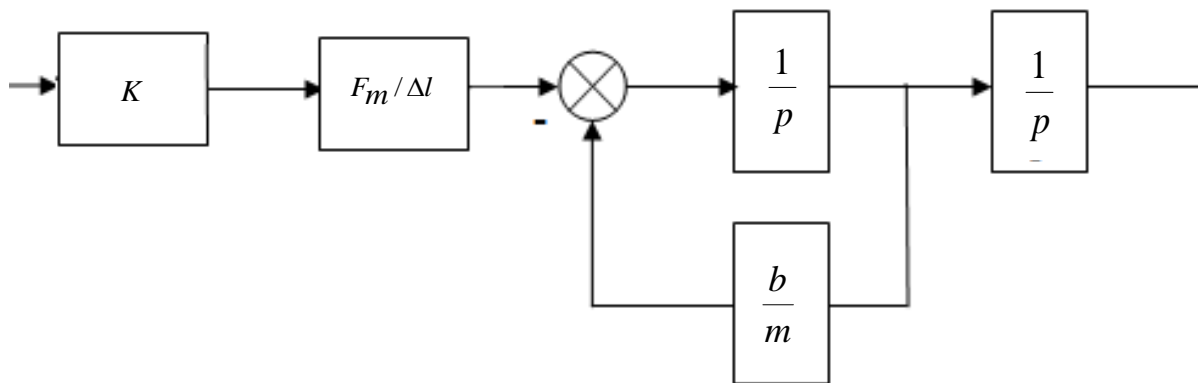


Рис. 2.45. Разомкнутая система гидропривода выглаживающей плиты асфальтоукладчика

Для обеспечения устойчивости системы введём ПИ-регулятор. Тогда передаточная функция разомкнутой системы примет вид:

$$W(p) = \frac{k_{\varepsilon}(T_p p + 1)}{p^2(T_p + 1)} = \frac{B(p)}{C(p)}. \quad (2.7)$$

Структурно-параметрическая оптимизация регулятора выполнена с помощью критерия модульного оптимума [16]. Он требует, чтобы настраиваемая система приближалась по своим частотным и передаточным характеристикам к идеальному фильтру низкой частоты. Тогда при отсутствии помехи на входе система будет наилучшим образом воспроизводить задающее воздействие и подавлять возмущение.

Настройка системы по критерию модульного оптимума обеспечивает незначительное перерегулирование и достаточно быстрое протекание переходного процесса.

Приведём характеристическое уравнение к нормализованному виду, учитывая только знаменатель:

$$D(p) = T_p^3 + p^2 + k_{\varepsilon} T_p p + k_{\varepsilon} = C(p) + B(p).$$

Разделим числитель и знаменатель передаточной функции (2.7) ПИ-регулятора на k_ε :

$$K(p) = \frac{(T_p p + 1)}{\frac{T}{k_\varepsilon} p^3 + \frac{1}{k_\varepsilon} p^2 + T_p p + 1} = \frac{B(p)}{C(p) + B(p)}. \quad (2.8)$$

Определим масштабный множитель T_m :

$$T_m^3 = \frac{T}{k_\varepsilon}.$$

Перейдем к уравнению безразмерных операторов p в знаменателе:

$$\bar{p}^3 + \frac{T_m \bar{p}^2}{T} + \frac{T_p \bar{p}}{T_m} + 1;$$

$$\bar{p}^3 + A_1 \bar{p}^2 + A_2 \bar{p} + 1;$$

$$A_1 = \frac{T_m}{T}, \quad A_2 = \frac{T_p}{T_m},$$

где $\bar{p} = T_m \cdot p$ – оператор Лапласа, соответствующий безразмерному (относительному) времени; A_1, A_2 – коэффициенты, которые соответствуют коэффициентам фильтра Баттерворта. Они обеспечивают желаемую форму амплитудной характеристики [16].

Коэффициенты A_1, A_2 , обеспечивают желаемую форму амплитудной характеристики, т.е.:

$$\frac{T_m}{T} = 2 ; \frac{T_p}{T_m} = 2 .$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} T_m &= 2T ; \\ T_p &= 2T_m = 4T . \end{aligned}$$

Передаточная функция (2.7) примет вид:

$$W(p) = \frac{k_\varepsilon(4Tp + 1)}{p^2(Tp + 1)} . \quad (2.9)$$

Реализуем схему гидропривода, используя параметры ПИ-регулятора (2.9) с добавлением нелинейного элемента (насыщение), обусловленного работой гидрораспределителя, в среде MATLAB&Simulink, рис. 2.46.

Также добавим в схему фильтр, предназначенный для уменьшения перерегулирования.

Пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования:

$$W_p(p) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} = k_p + \frac{k_p}{T_{\text{И}}p} = \frac{k_p(T_{\text{И}}p + 1)}{T_{\text{И}}p} .$$

Благодаря интегральной составляющей ПИ-закон регулирования обеспечивает высокую точность обработки в установившихся режимах работы объекта управления, а при определённом соотношении коэффициентов k_{Π} и $k_{\text{И}}$ – хорошие показатели и в переходных динамических процессах [16].

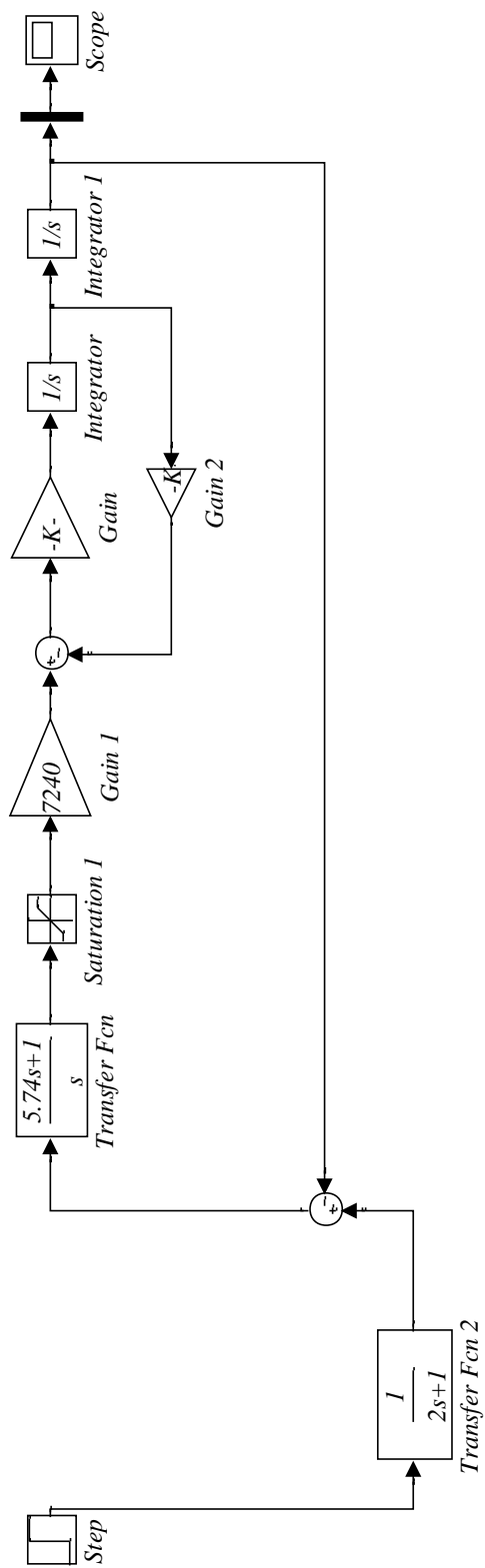


Рис. 2.46. Функциональная схема нелинейной следящей системы гидропривода выглаживающей плиты

При перемещении системы, равном 0,125 м (заданный диапазон 0,005 м – 0,25 м), получим следующий результат зависимости перемещения штока гидроцилиндра от времени, рис. 2.47. Система управляет заданное перемещение. Время отработки составляет 15 с, что значительно больше времени отработки при моделировании гидравлической схемы. Это объясняется тем, что гидравлическая схема имеет более сложные процессы и моделирует значения, близкие к реальным параметрам. Перерегулирование системы составляет 4 %.

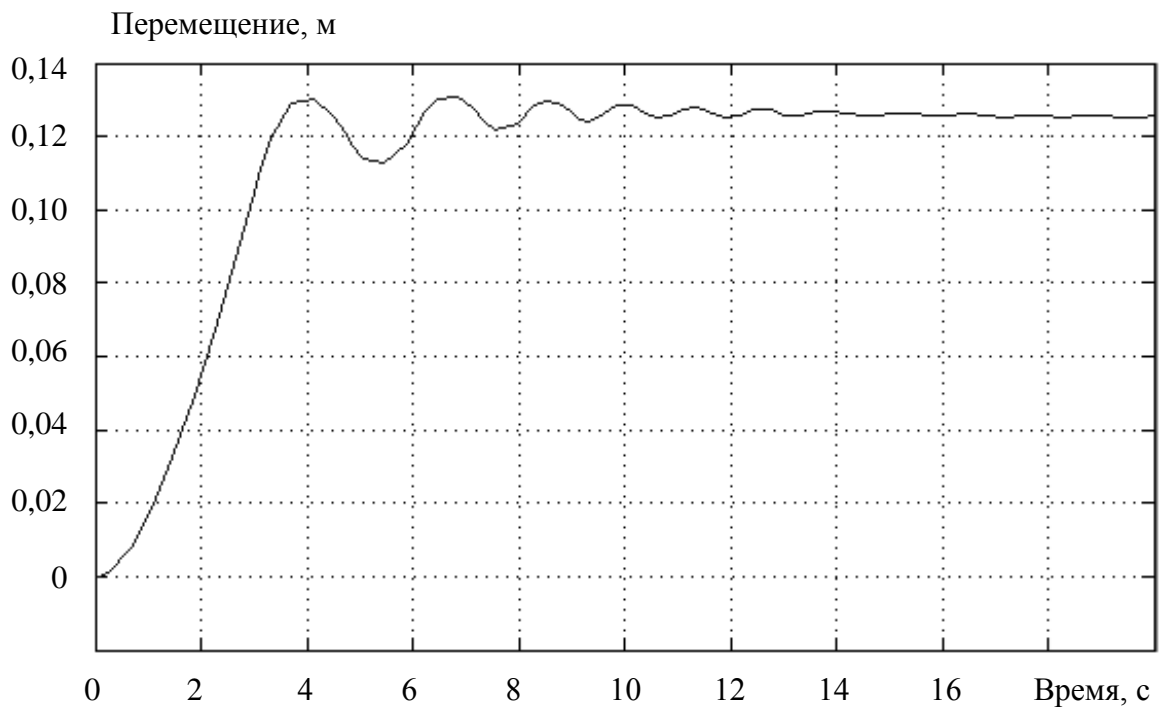


Рис. 2.47. Результат моделирования при перемещении системы в 0,125 метров

2.3.3. Исследование абсолютной устойчивости системы с помощью критерия В. М. Попова

Удобный критерий для суждения об абсолютной устойчивости нелинейных систем предложил в 1959 г. румынский ученый В.М. Попов. Его критерий основан, как и критерий Найквиста, на использовании амплитудно-фазовой частотной характеристики (а. ф. х.) и имеет простую геометрическую трактовку [16].

Абсолютной устойчивостью называется устойчивость системы при любых начальных отклонениях для любой формы нелинейной характеристики, принадлежащей к одному из определенных классов. Нелиней-

ности считаются одного класса, если их характеристики $f(x_H)$ находятся в секторе $[0, k_H]$ между осью абсцисс и прямой с угловым коэффициентом k_H . Критерий В. М. Попова относится к частотным методам определения абсолютной устойчивости нелинейных систем.

Формулировка критерия абсолютной устойчивости равновесия нелинейной системы, которая состоит из линейной части с а. ф. х. $W_L(j\omega)$ и нелинейного элемента с характеристикой $f(x_H)$, расположенной в секторе $[0, k_H]$:

для абсолютной устойчивости равновесия достаточно, чтобы модифицированная характеристика $W_L^*(j\omega)$ не охватывала точку $(-1/k_H, 0)$ и через эту точку можно было провести прямую, не пересекающую характеристику $W_L^*(j\omega)$ (последняя лежит справа от прямой).

Определим устойчивость системы с помощью критерия В. М. Попова.

По критерию В. М. Попова для определения абсолютной устойчивости необходимо построить модифицированный годограф выражение, которого имеет вид:

$$W_L^*(j\omega) = U(\omega) + j \cdot \omega \cdot V(\omega).$$

Для обеспечения абсолютной устойчивости модифицированный годограф линейной части должен располагаться левее кривой Попова – прямой проходящей через точку $(-1/K, 0)$ под любым углом, где K класс нелинейности.

Получим аналитическое выражение для модифицированного годографа линейной части

$$W_L^*(j\omega) = U(\omega) + j\omega V(\omega).$$

Выполним замену переменных:

$$p = j\omega;$$

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = \frac{7240(4 \times 1,43j\omega + 1)}{(j\omega)^2(1,43j\omega + 1)};$$

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = \frac{41412,8j\omega + 7240}{-1,43\omega^3j - \omega^2}.$$

Умножим числитель и знаменатель на сопряженное знаменателю:

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = \frac{(41412,8j\omega + 7240)(-1,43\omega^3j + \omega^2)}{(-1,43\omega^3j - \omega^2)(-1,43\omega^3j + \omega^2)};$$

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = U(\omega) + j\omega V(\omega);$$

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = \frac{-59220,304\omega^4 + 31059,6\omega^3j + 7240\omega^2}{-2,0449\omega^6 - \omega^4};$$

$$U(\omega) = \frac{-59220,304\omega^4 + 7240\omega^2}{-2,0449\omega^6 - \omega^4};$$

$$V(\omega) = \frac{31059,6\omega^3}{-2,0449\omega^6 - \omega^4};$$

$$W_{\text{Л}}^*(j\omega) = \frac{-59220,304\omega^4 + 7240\omega^2}{-2,0449\omega^6 - \omega^4} + \frac{31059,6\omega^3}{-2,0449\omega^6 - \omega^4}\omega.$$

Получен модифицированный годограф В. М. Попова при изменении частоты в диапазоне от 0,01 до 1000, см. рис. 2.48. Следовательно, прямая В. М. Попова может быть проведена для любого положительного значения коэффициента передачи $k=1$ нелинейного элемента так, что вся характеристика $W^*(j\omega)$ будет лежать справа от этой прямой.

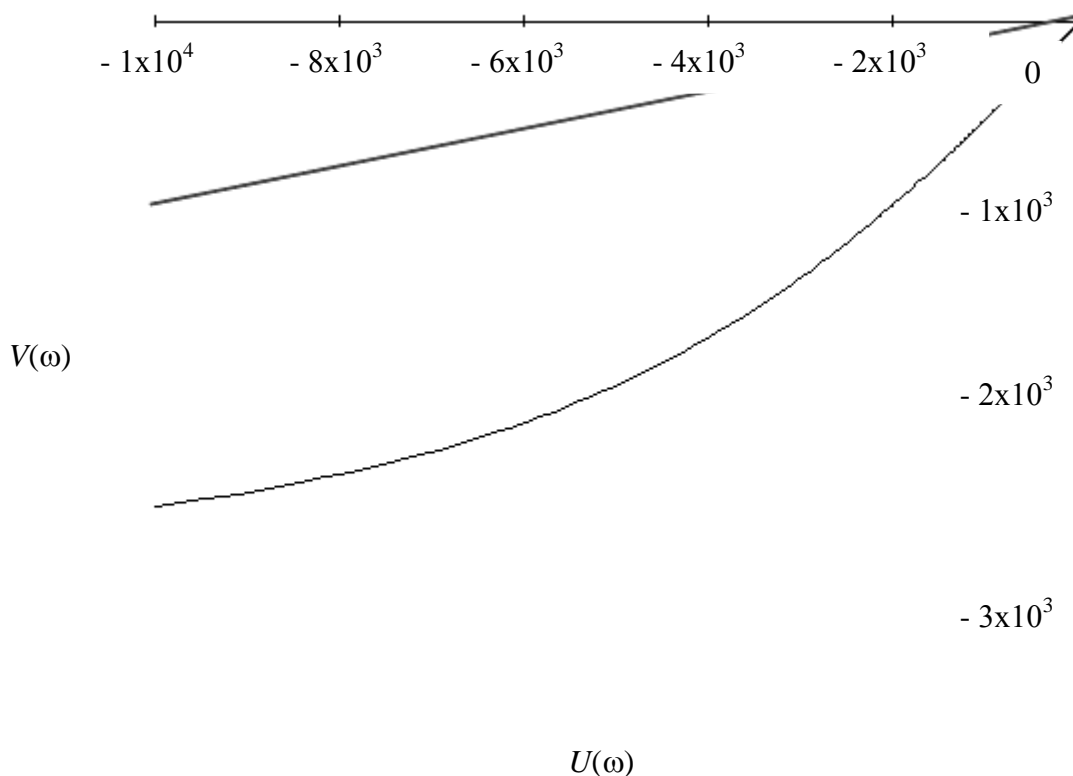


Рис. 2.48. Модифицированный годограф Попова В. М.

Таким образом, исследуемая нелинейная система абсолютно устойчива при $k > 0$ [16].

2.3.4. Выводы по разделу

Сложность и высокая стоимость технологических процессов дорожного строительства с применением горячих смесей, научные задачи автоматизированного управления дорожно-строительными машинами требуют **создания имитационных моделей процессов** с применением современных программных продуктов.

Рассмотренный метод исследования и построения систем управления нелинейными динамическими объектами на примере следящей системы с учетом динамики процессов в гидроприводе позволяет построить **высококачественные системы автоматического управления**, в которых меньше ошибок регулирования.

2.4. Моделирование систем адаптивного управления укладкой и уплотнением дорожных покрытий нежесткого типа

Непрерывно изменяющиеся свойства внешней среды, с которой взаимодействуют асфальтоукладчики и дорожные катки, отсутствие достаточного объема информации об их динамике, сложность теоретического исследования рабочих процессов затрудняют проектирование и настройку АСУ. Ручная корректировка настроек параметров системы, основанная на экспертном опыте, не гарантирует качественной работы АСУ. То есть, имеются предпосылки создания адаптивных АСУ подстраивающихся под изменение внешней среды и параметров машин.

Адаптивностью будем называть способность системы управления некоторого управляемого объекта добывать знания о свойствах системы «среда – объект управления – система управления», накапливать эти знания в своей памяти и использовать эти знания для управления с целью дальнейшего их пополнения и сохранения накопленных знаний путем обеспечения физического выживания объекта, как носителя памяти и средств работы с ней (при неимении других способов к сохранению и использованию знаний) [7].

2.4.1. Управление уплотнением смеси с применением тензометрических преобразователей

В итоге анализа рабочего процесса асфальтоукладчика можно выделить основные сигналы системы автоматического регулирования (САР): *управляемая величина* – частота вращения вала гидродвигателя, которая влияет на изменение коэффициента уплотнения; *управляющая величина* – поток жидкости, создаваемый гидрораспределителем; *возмущение* – изменение давления в гидравлической системе, изменение скорости движения асфальтоукладчика.

Построение функциональной схемы САР [26]. Поскольку предлагаемый вариант САР имеет выход системы – текущий коэффициент уплотнения дорожного покрытия, – рассматривается замкнутая САР с управлением по отклонению с учетом относительной простоты измерения управляемой величины (частоты вращения вала гидродвигателя). Функциональная схема САР с управлением по отклонению представлена на рис. 2.49.

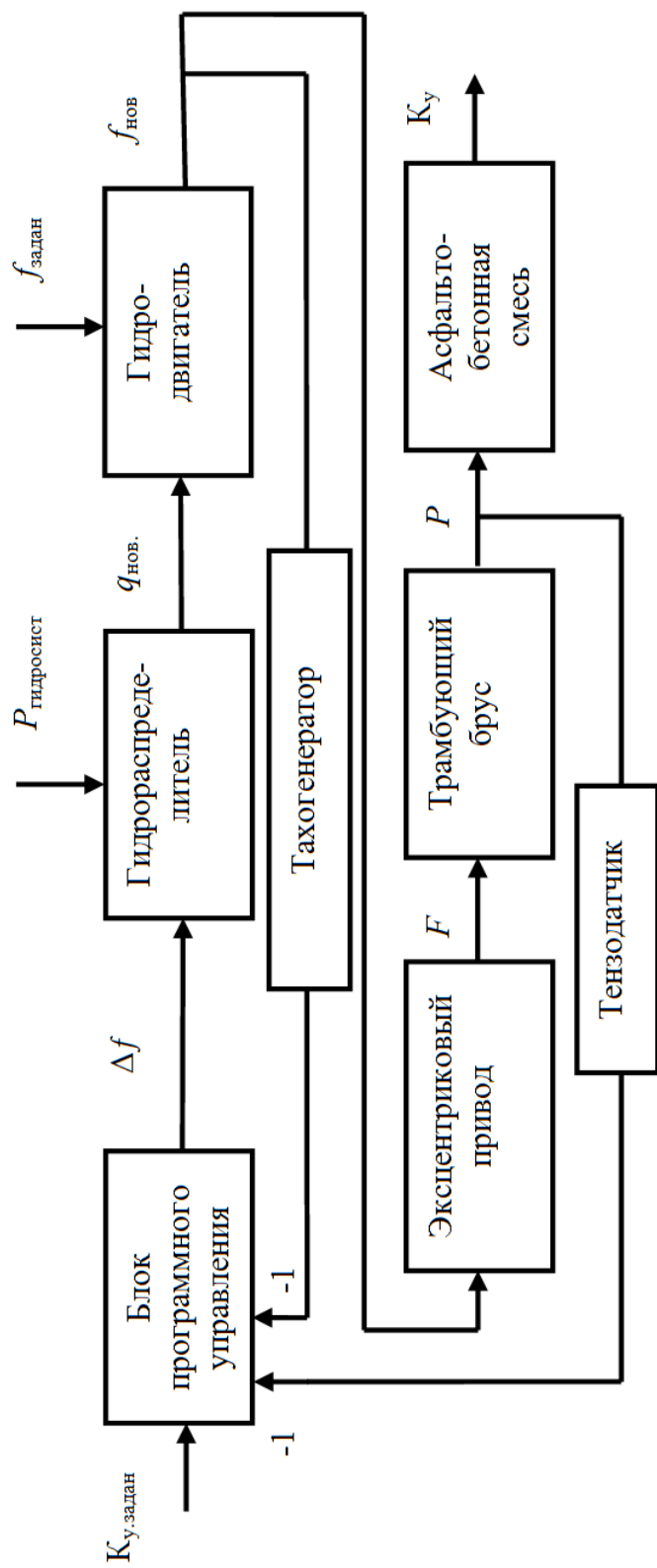


Рис. 2.49. Функциональная схема САУ с управлением по отклонению: $K_{y,задан}$, K_y – соответственно заданный коэффициент уплотнения и достигнутый; Δf – сигнал корректировки; $P_{гидросист}$ – давление в гидросистеме; $q_{нов}$ – расход жидкости; $f_{задан}$, $f_{нов}$ – соответственно заданная и новая частота; F – усилие на трамбующий брус; P – давление на смесь

Схема включает два контура обратной связи: внутреннюю (с датчиком частоты вращения эксцентрикового вала) и главную (с тензодатчиком, установленным на металлоконструкции трамбуемого бруса). С учетом динамики привода уплотняющего рабочего оборудования сформулированы основные требования, предъявляемые к системе: обеспечение заданного коэффициента уплотнения (диапазон); отсутствие перерегулирования системы в процессе работы; простота настройки режимов.

В состав системы автоматического регулирования коэффициента уплотнения смеси входят:

- 1) блок программного управления;
- 2) гидрораспределитель;
- 3) гидродвигатель;
- 4) эксцентриковый преобразователь (вал);
- 5) трамбуемый брус;
- 6) тензодатчик давления;
- 7) асфальтобетонная смесь.

Требования к САР. Необходимо обеспечивать управление оборудованием по степени уплотнения смеси. Особенностью рабочего процесса асфальтоукладчика является то, что настройка режимов оборудования осуществляется машинистом-оператором с использованием имеющихся органов управления и на основе информационных данных методических рекомендаций. Такая настройка субъективна и не позволяет оперативно учитывать текущее напряженно-деформированное состояние среды в целях оптимальной степени уплотнения.

Формирование системы автоматического регулирования данным процессом, должно быть основано на *информации о динамике* рабочего процесса асфальтоукладчика. А это значит, что САР должна оперативно принимать информацию и при необходимости влиять на параметры для качественного регулирования коэффициента уплотнения смеси.

К основным требованиям, предъявляемым к системе, относятся такие:

- обеспечение требуемого коэффициента уплотнения;
- отсутствие перерегулирования системы в процессе работы;
- простота настройки.

Универсальность САР проявляется в том, что:

- система автоматически переформирует необходимые параметры в зависимости от величины давления, снимаемого с тензодатчика давления;
- система позволяет отслеживать ошибки при вводе первоначальных данных о смеси, гидросистеме и начальном давлении;
- интуитивно понятный интерфейс дает возможность быстрее вводить необходимые данные, что экономит время работы;

– диалоговые окна позволяют оператору-машинисту правильно реагировать на изменение внешних параметров, влияющих на работу;

– человеку-оператору нет необходимости самому отслеживать и настраивать данные о системе при изменяющемся коэффициенте уплотнения; тем самым исключается фактор ошибки.

Возможности развития САР. Дальнейшее развитие системы автоматического регулирования коэффициента уплотнения смеси сводится к совершенствованию интерфейса пользователя, выявлению и исправлению недочетов программы, модернизации и введению новых зависимостей величин, корректирующих работу системы.

Требования к информационной и программной совместимости. Разрабатываемый программный продукт должен поддерживать спецификацию Win32, т. е. нормально функционировать под управлением операционных систем семейства Windows .

Представим процесс *реализации программы.*

Выбор средства разработки. MATLAB (сокращение от англ. «Matrix Laboratory») – термин, относящийся к пакету прикладных программ для решения задач технических вычислений, а также к используемому в этом пакете языку программирования.

Основной особенностью языка MATLAB являются его широкие возможности для работы с матрицами, которые создатели языка выразили в лозунге «думай векторно» (англ. Think vectorized). Общую структуру этапов разработки САР можно представить в виде UML-диаграммы, см. рис. 2.50.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках.

Применяемая методология и технология разработки программного обеспечения САР. При разработке программного обеспечения САР была применена технология *функционального программирования* – раздела дискретной математики и парадигмы программирования, в которых вычисление трактуется как расчет значений функций в математическом понимании последних (в отличие от функций как подпрограмм в процедурном программировании).

Функциональное программирование позволяет ограничиться вычислением результатов функций от исходных данных и других функций без явного хранения программы. Соответственно не учитывает оно и изменяемости этого состояния (в отличие от императивного, когда одной из базовых концепций является переменная, хранящая своё значение и позволяющая менять его по мере выполнения алгоритма).

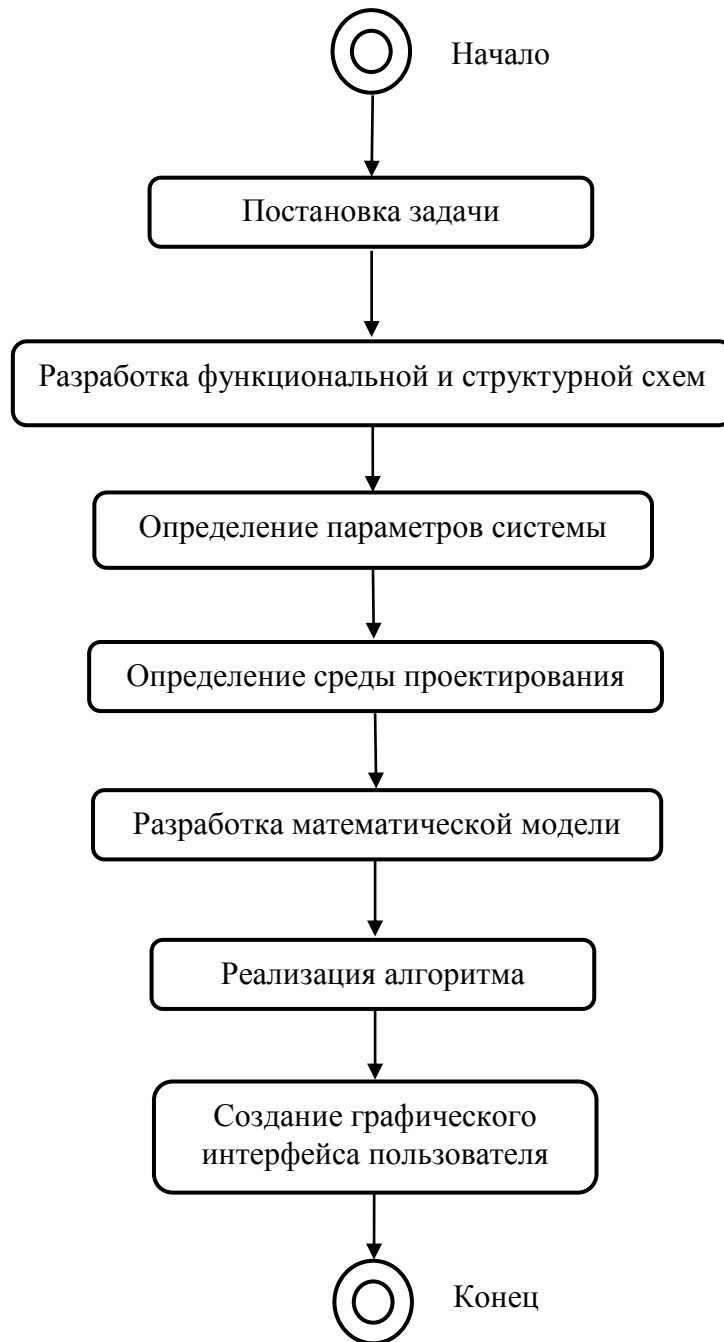


Рис. 2.50. UML-диаграмма этапов разработки

На практике отличие математической функции от понятия функции в *императивном программировании* заключается в том, что императивные функции могут опираться не только на аргументы, но и на состояние переменных, внешних по отношению к функции, а также иметь побочные эффекты и менять состояние внешних переменных. Таким образом, в *императивном программировании* при вызове одной и той же функции с

одинаковыми параметрами, но на разных этапах выполнения алгоритма на выходе можно получить разные данные из-за влияния на функцию состояния переменных. А в функциональном языке при вызове функции с одними и теми же аргументами мы всегда получим одинаковый результат: выходные данные зависят только от входных. Это позволяет средам выполнения программ на функциональных языках кэшировать результаты функций и вызывать их в порядке, не определяемом алгоритмом.

В традиционных языках программирования (например, C++) вызов функции приводит к определению всех аргументов. Этот метод называется *вызов – по – значению*. Если какой-либо аргумент не использовался в функции, то результат вычислений пропадает; следовательно, расчеты были произведены впустую. В каком-то смысле противоположностью *вызова – по – значению* является *вызов – по – необходимости* («ленивые» вычисления). В этом случае аргумент определяется только в случае, если он нужен для вычисления результата. Для реализации описываемой системы была выбрана среда разработки MATLAB.

Моделирование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси трамбующим брусом [11]. Модель системы автоматического регулирования коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси разработана с помощью прикладных программ для решения задач технических вычислений – MATLAB.

Реализация моделирования на языке MATLAB. Система реализована в исполняемом файле, имеющем расширение *.m.

Через графический интерфейс пользователя в файл заносятся все необходимые данные, такие как:

- масса трамбующего бруса;
- радиус эксцентрикового вала;
- частота вращения эксцентрикового вала;
- начальное давление на асфальтобетонную смесь;
- начальная толщина уплотняемой смеси;
- величина уплотнения смеси за первый удар;
- скорость движения асфальтоукладчика;
- давление больше начального;
- давление меньше начального.

Графический интерфейс пользователя. Графический интерфейс пользователя (ГИП), графический пользовательский интерфейс (ГПИ) (от англ. Graphical user interface, GUI) – разновидность пользовательского интерфейса, в котором его элементы (меню, кнопки, значки, списки и т. п.), представленные на дисплее, имеют вид графических изображений.

Благодаря устройствам ввода, т. е. клавиатуре, мыши, джойстику и т. п., пользователь обладает произвольным доступом ко всем видимым

экранному объектам (элементам интерфейса) и непосредственно манипулирует ими (в отличие от интерфейса командной строки).

Чаще всего элементы интерфейса в ГПИ реализованы на основе метафор и отображают их назначение и свойства, что облегчает понимание и освоение программ неподготовленными пользователями.

Можно выделить следующие виды графического пользовательского интерфейса:

- простой (типовые экранные формы и стандартные элементы интерфейса, обеспечиваемые самой подсистемой);
- истинно графический, двумерный: нестандартные элементы интерфейса и оригинальные метафоры, реализованные собственными средствами приложения или сторонней библиотекой;
- трёхмерный на данный момент классифицирован слабо.

Одним из требований к хорошему графическому интерфейсу программной системы является концепция «делай то, что я имею в виду» или DWIM (англ. Do What I Mean). DWIM требует, чтобы система работала предсказуемо, чтобы пользователь заранее интуитивно понимал, какое действие выполнит программа после получения его команды. Графический интерфейс пользователя системы реализован с помощью стандартных средств разработки GUI интерфейса MATLAB.

Код пользовательского интерфейса представлен в прил. 1.

2.4.2. Пользовательский интерфейс программы моделирования

Пользовательский интерфейс программы обеспечивает интерактивную поддержку работы пользователя с помощью диалоговых окон. Сообщения, выводимые ими, максимально объясняют работу системы и позволяют оператору-машинисту вовремя реагировать на возникающие изменения, рис. 2.51 – 2.53.

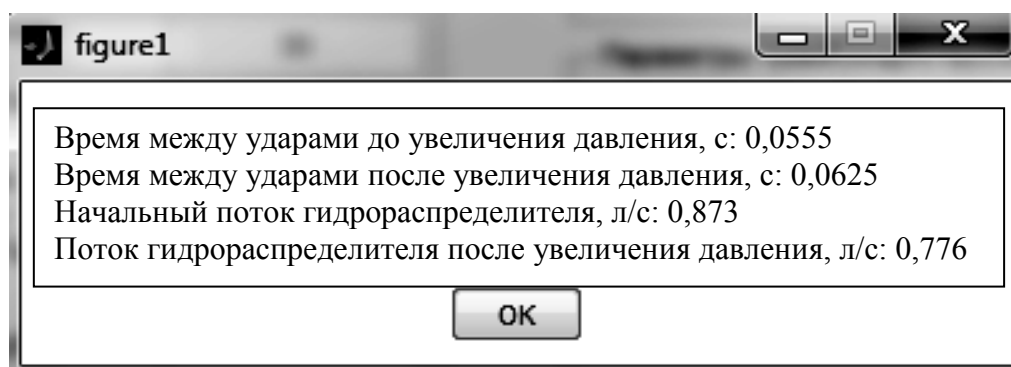


Рис. 2.51. Сообщение, возникающее при изменении контактного давления

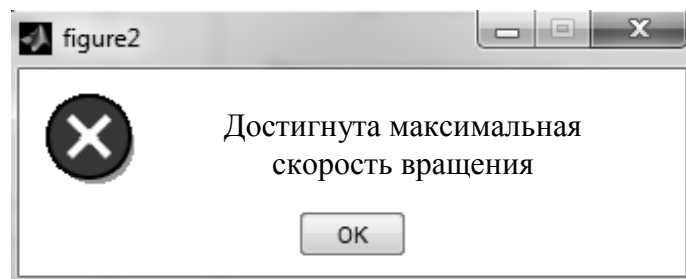


Рис. 2.52. Сообщение, возникающее при достижении максимальной частоты вращения вала гидродвигателя

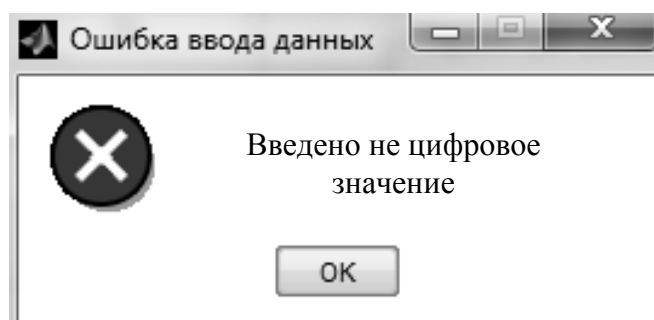


Рис. 2.53. Сообщение, возникающее при ошибке ввода данных о системе

Пользовательский интерфейс программы моделирования повышает эффективность работ, за счет визуализации этапов моделирования.

2.4.3. Моделирование динамического уплотнения при увеличении контактного давления на смесь

Выбор уплотняющих машин для устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от параметров укладчика, который определяет темп строительства, а также состав машин для уплотнения покрытий нежесткого типа. Современные асфальтоукладчики оборудуются эффективными рабочими органами, работающими в динамическом режиме, что позволяет одновременно с распределением смеси производить и предварительное ее уплотнение при температуре доставки смеси к месту производства работ, обеспечивая при этом достаточно высокий коэффициент предварительного уплотнения.

Коэффициент предварительного уплотнения зависит от типа смеси, температуры при укладке, режимов работы рабочего органа и скорости движения асфальтоукладчика. Максимальный эффект нагрузки на смесь достигается при малой вязкости битума, что соответствует высокой температуре асфальтобетонной смеси.

Степень уплотнения покрытия оценивается по данным лабораторных испытаний образцов. Она определяется как отношение средней плотности образца, взятого из покрытия (вырубки, керна), к средней плотности переформированного образца, уплотненного стандартизованной нагрузкой.

При увеличении контактного давления, снимаемого с тензодатчика давления, система *автоматически* вычисляет новое значение расхода потока жидкости от гидрораспределителя к гидродвигателю. При уменьшении потока до необходимого значения, которое обеспечивает заданный коэффициент уплотнения, снижается частота вращения вала гидродвигателя: в итоге за меньшее количество ударов при возросшем давлении достигается необходимый коэффициент уплотнения.

В данном примере, см. рис. 2.54 – 2.55, при увеличении давления с 1,3 МПа до 1,5 МПа частота вращения вала гидродвигателя уменьшилась с 22 Гц до 16 Гц.

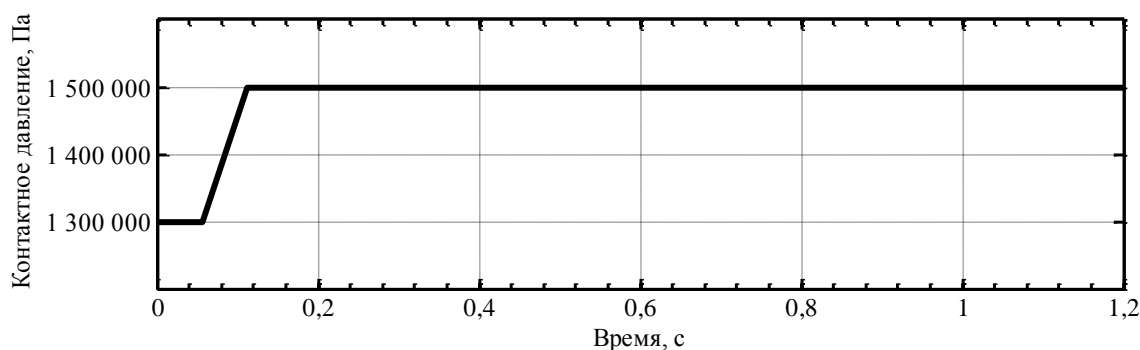


Рис. 2.54. Изменение контактного давления от времени

В результате моделирования динамики гидравлической системы привода уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика время перерегулирования составило примерно 2 с, а коэффициент уплотнения смеси, достигаемый за 8 ударов трамбуемого бруса равен 0,91 при скорости движения асфальтоукладчика 0,03 м/с, см. рис. 2.56.

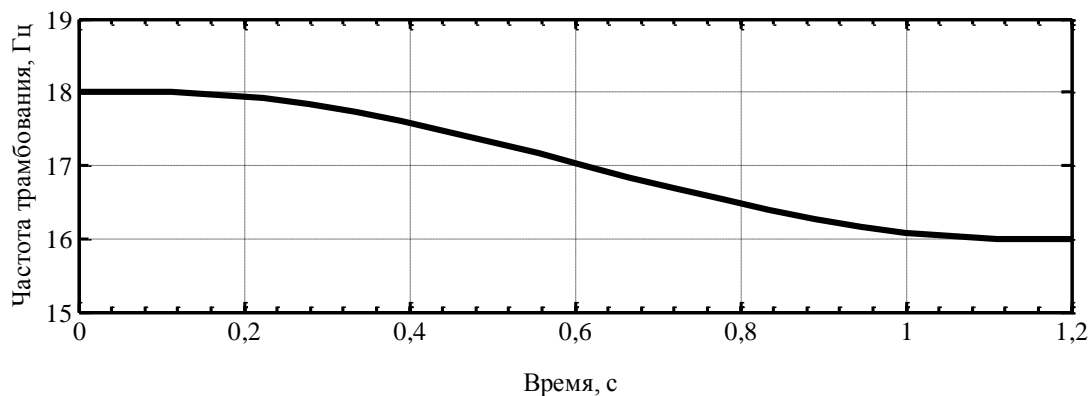


Рис. 2.55. Изменение частоты вращения вала гидродвигателя



Рис. 2.56. Изменение коэффициента уплотнения

При моделировании рабочего процесса уплотнения смеси трамбуемым брусом, при той же скорости укладчика, за 11 воздействий брусом коэффициент уплотнения увеличился до величины 0,92.

2.4.4. Моделирование регулятора частоты вращения вала гидродвигателя

Схема регулирования реализована с помощью программного комплекса MATLAB&Simulink. На основе языка Simulink разработана имитационная модель регулирования частоты вращения вала гидродвигателя привода трамбуемого бруса, рис. 2.57.

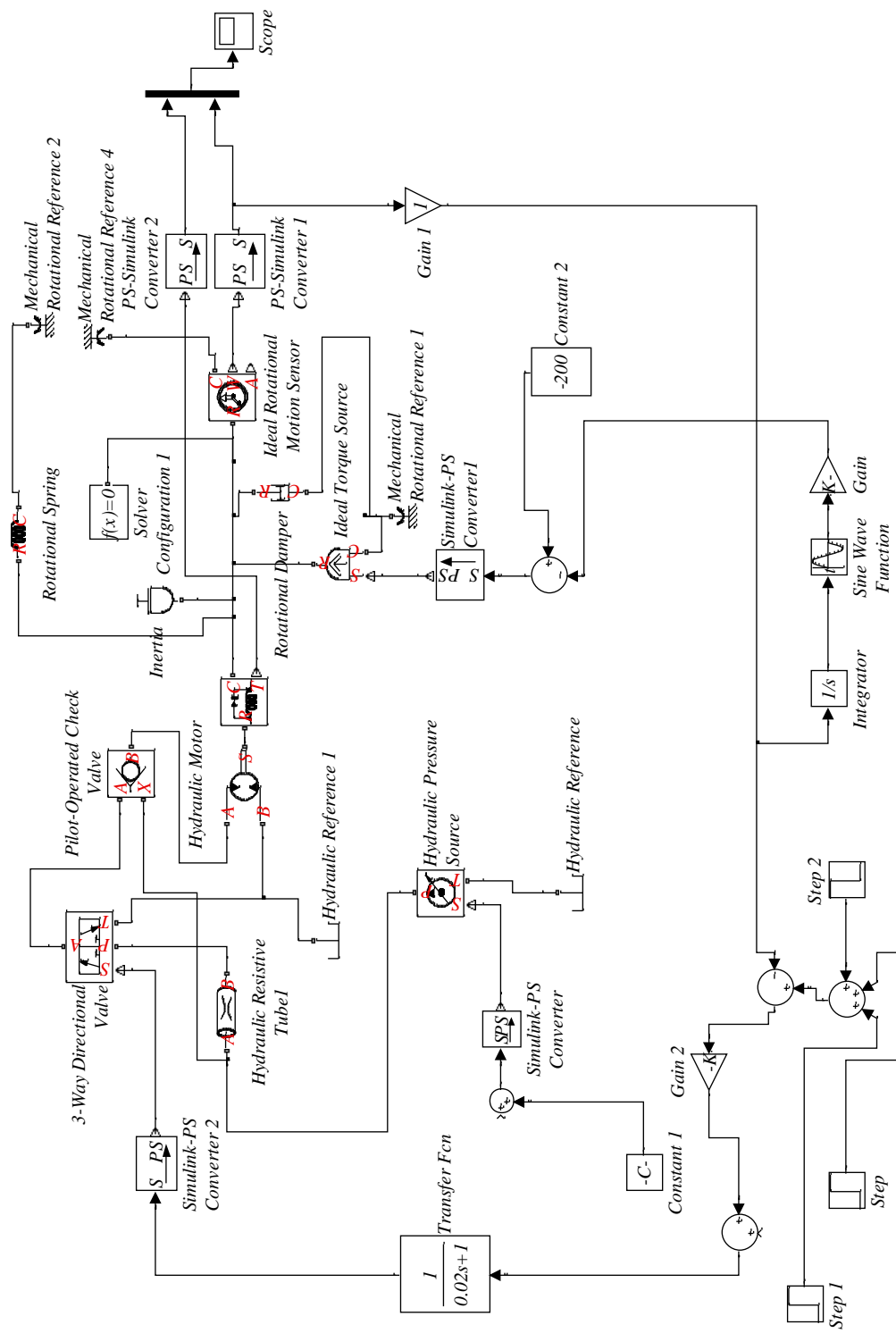


Рис. 2.57. Имитационная модель регулирования частоты вала гидродвигателя на языке Simulink

Результаты моделирования представлены на рис. 2.58. Заданное значение частоты вращения – 100 с^{-1} . Рабочий диапазон частоты вращения составляет от 50 с^{-1} до 200 с^{-1} . За 2,7 с имитационная модель обрабатывает заданное значение частоты вращения вала гидродвигателя при величине крутящего момента 540 Н м.

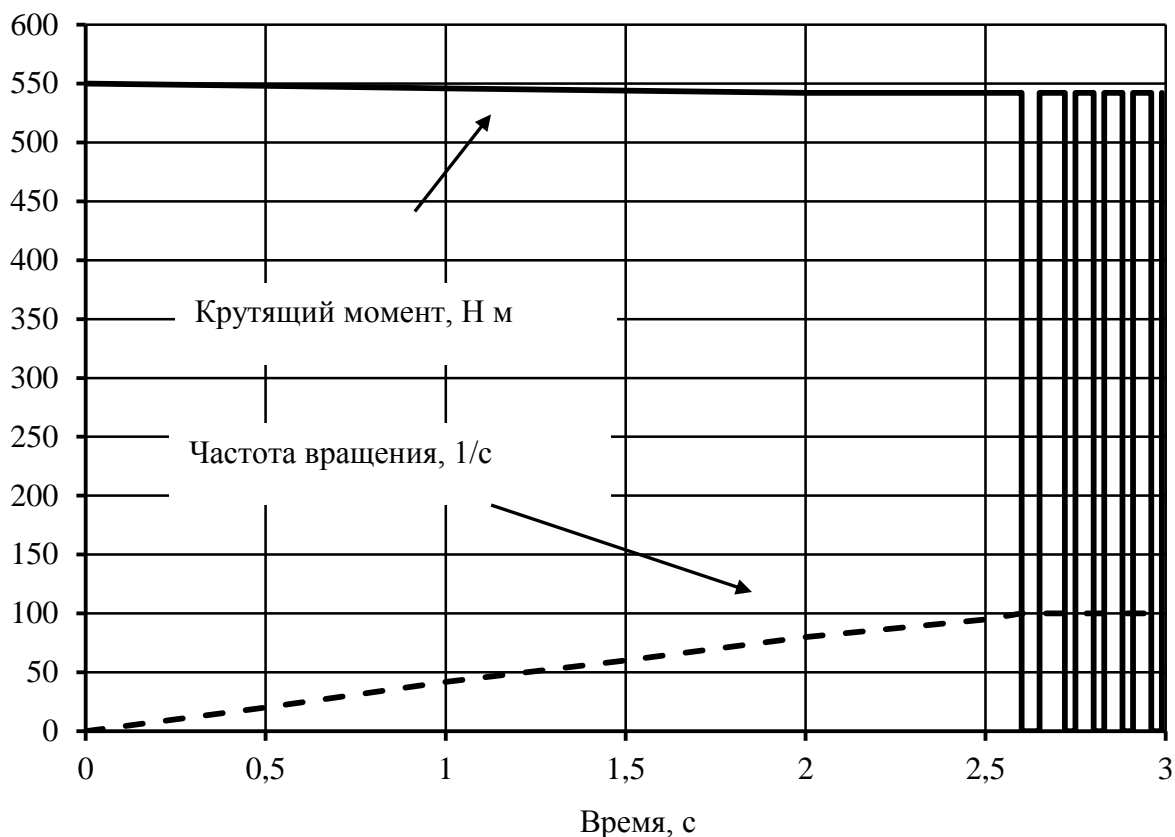


Рис. 2.58. Зависимость крутящего момента и частоты вращения вала гидродвигателя от времени

Было выяснено, что технологические процессы дорожного строительства с применением горячих смесей являются многофакторными и сложными для теоретического исследования, что создает предпосылки создания имитационных моделей рабочих процессов с применением современных программных продуктов.

Рассмотренный в статье метод исследования и построения систем управления нелинейными динамическими объектами, на примере подсистемы уплотнения рабочим органом асфальтоукладчика, с учетом динамики процессов в гидроприводе, позволяет построить качественные системы автоматического управления.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Экспериментальные исследования дорожно-строительных машин в реальных условиях эксплуатации всегда являлись задачей высокого уровня сложности. Особенно сильно это проявляется в испытаниях машин работающих с горячими асфальтобетонными смесями.

3.1. Исследование уплотнения смеси по ширине укладки

Технологическая настройка асфальтоукладчика обеспечивает наиболее высокий уровень укладки и предварительного уплотнения слоев основания или покрытия и, по существу, является важным элементом системы управления качеством работ на дороге.

Она осуществляется перед началом рабочих операций и ведется с учетом конструктивных и технологических возможностей и особенностей выбранного укладчика, а также заложенных в проект производства работ (ППР) приемов выполнения и контроля этих операций [27].

Еще до начала работы дорожных катков самыми важными и потому непрерывно контролируемые являются следующие пять показателей [12]:

- ширина полосы;
- поперечный уклон поверхности слоя;
- начальная толщина уложенного слоя;
- степень предварительного уплотнения слоя после работы укладчика;
- ровность поверхности слоя.

Первые три показателя нормы отклонения от проекта задаются проектом и СНиПом 3.06.03 – 85 «Автомобильные дороги». Два последних не задаются и не нормируются, но без знания их начальных значений невозможно управлять процессом и обеспечить требуемые величины плотности, толщины слоя и ровности готового основания или покрытия [12]. Практика показала, чем выше плотность слоя после работы укладчика, тем ровнее покрытие.

Качество готового покрытия окончательно формируется на стадии укладки и уплотнения смеси. При этом обобщенно данный технологический процесс может быть представлен в виде рис. 3.1.



Рис. 3.1. Технологический процесс укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси

В итоге процесса создаётся плотная и устойчивая структура, от плотности которой зависит прочность, эксплуатационная надёжность и долговечность дорожного покрытия.

Получение требуемой плотности неразрывно связано с многократными силовыми воздействиями на материал, что вызывает его деформирование. Интенсивность накопления деформаций зависит как от состояния материала, так и от параметров и режимов работы машин.

Особенности технологии уплотнения смеси заключается в том, что она реализуется два этапа:

- на первом идет предварительное уплотнение смеси трамбуящим брусом и виброплитой, установленными на асфальтоукладчике;
- на втором идет окончательное уплотнение смеси дорожными катками, количество типоразмеров (лёгкие, средние, тяжёлые) которых зависит от плотности смеси после прохода асфальтоукладчика.

Перспективность совершенствования данной технологии в значительной мере связана с обеспечением высокой плотности смеси на первом этапе. В итоге появляется возможность проведения работ в сжатые сроки при незначительном изменении температуры смеси, получить качество производства работ и высокие темпы строительства [3].

В результате многократного воздействия машин происходит сближение минеральных частиц смеси и уменьшение её объёма. Плотность минерального остова сильно влияет на свойства асфальтобетона (устойчивость к природно-климатическим и механическим воздействиям и долговечность покрытий).

Свойства смеси в значительной степени определяются температурой. В процессе уплотнения её сопротивление рабочим органам уплотняющих машин возрастает не только в итоге роста плотности, но и в итоге снижения температуры. При этом увеличиваются силы сцепления, вязкого трения и, как следствие, энергетические затраты на создание необходимых деформаций.

Следовательно, для обоснования принимаемых инженерных решений необходимо учитывать особенности этого материала.

3.1.1. Постановка задачи исследования

При строительстве автомобильных дорог с покрытием нежесткого типа с применением асфальтоукладчика могут возникнуть *следующие дефекты, влияющие на эксплуатационные свойства и срок службы дорожного покрытия:*

- 1) поверхностные волны;
- 2) разрывы;
- 3) неравномерность структуры;
- 4) следы от выглаживающей плиты;
- 5) недостаточное предварительное уплотнение по ширине покрытия.

Первые четыре дефекта можно устранить, корректируя состав смеси, четко выдерживая технологический регламент по устройству слоев и контролируя плотность со стороны службы качества.

Для устранения последнего дефекта необходимо иметь информацию о плотности (коэффициенте уплотнения) в разных точках дорожного покрытия.

Цель раздела: опытным путем проверить равномерность уплотнения смеси трамбуемым брусом рабочего органа современного асфальтоукладчика; установить возможность использования динамического плотнoмера ДПУ-1 для оценки степени уплотнения смеси.

3.1.2. Методика исследования

Работы выполняются асфальтоукладчиком MARINI MF-805 (рис. 3.2) при ширине полосы 7,5 м. На машине установлены вибробрус и виброплита. Рабочий орган имеет четыре дополнительных уширителя. Температура окружающего воздуха – 15 - 22 °С.

Место проведения исследований – объект реконструкции ИВПП аэропорта «Красноярск». На данном участке устраивался слой покрытия с переменной толщиной $h = 90 - 110$ мм из горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси (тип А, марка I).



Рис. 3.2. Широкозахватный асфальтоукладчик MARINI MF-805 во время экспериментальных исследований

Во время экспериментальных исследований замерялись (рис. 3.3):

- частота вращения эксцентрикового вала привода;
- плотность асфальтобетонной смеси в пяти точках (по ширине рабочего органа);
- давление в гидроприводе рабочего органа;
- толщина слоя смеси;
- скорость движения асфальтоукладчика (1,4 – 2 м/мин);
- ширина полосы (7,5 м);
- температура смеси в автосамосвалах, °С;
- температура смеси в покрытии (сразу после укладки), °С.



Рис. 3.3. Общий вид экспериментального участка реконструкции взлетно-посадочной полосы

Для определения плотности смеси брались пробы свежеложенного слоя. Для этого в горячую смесь (без сдвигов и перекосов) погружалось стальное кольцо. Затем оно извлекалось при помощи лопаты, а яма немедленно засыпалась. В дальнейшем, после остывания смеси, образец извлекался из стального кольца и определялась его плотность в лабораторных условиях (согласно ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства».

Методы испытаний»). Рядом с местом взятия проб производилось испытание плотности динамическим плотномером ДПУ-1.

Этот плотномер с наконечником типовой конструкции не позволил выполнить измерения при температуре асфальтобетона 110 – 140 °С из-за быстрого заглубления в асфальтобетонное покрытие. В итоге конструкция плотномера изменена в целях оценки степени уплотнения смеси по ширине укладываемой полосы. Изменили форму наконечника-конуса, см. рис. 3.4, входящего в смесь.

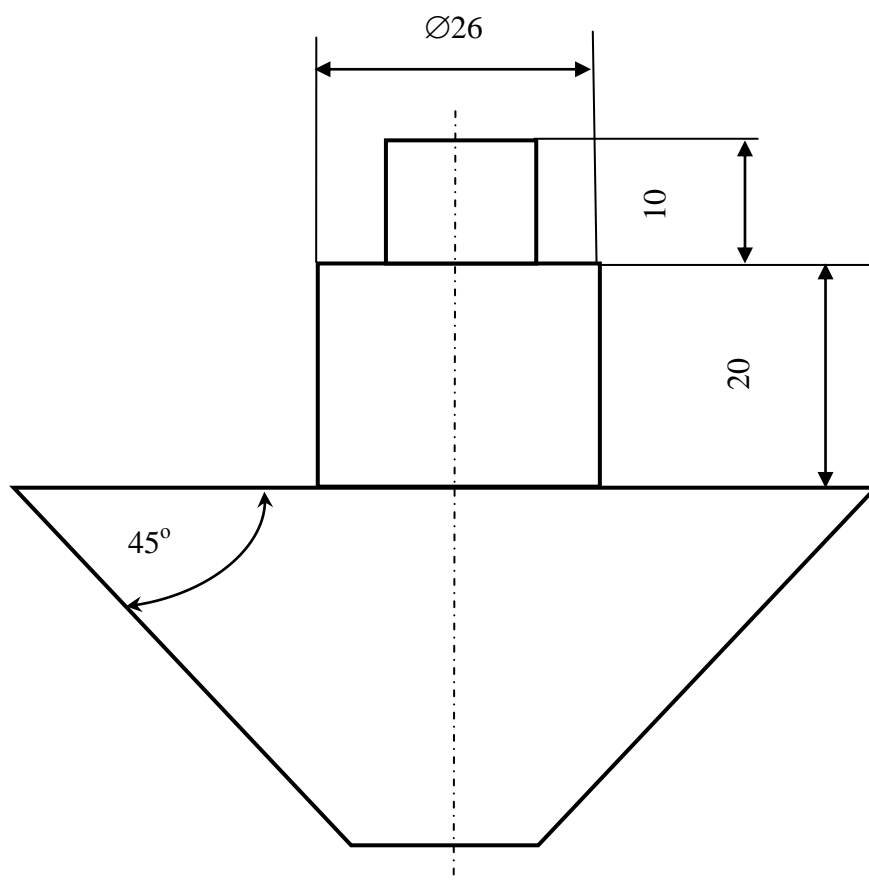


Рис. 3.4. Опытная модель наконечника плотномера ДПУ-1

Форму конуса подбирали опытным путем. Изготовили несколько видов наконечников, см. рис. 3.5. Выбрали наконечник с усеченным конусом. *Критерий уплотнения – количество ударов (падений груза), в результате которых конус погружается в горячую смесь до насечки.*



Рис. 3.5. Динамический плотномер ДПУ-1 с опытными наконечниками

Процесс испытания данного динамического плотномера ДПУ-1 показан на рис. 3.6.

Продольное сечение верхнего слоя готового покрытия толщиной 90 мм показано на рис. 3.7.



Рис. 3.6. Испытание плотномера ДПУ-1



Рис. 3.7. Продольное сечение верхнего слоя готового покрытия толщиной 90 мм

Схема измерений по ширине покрытия приведена на рис 3.8.

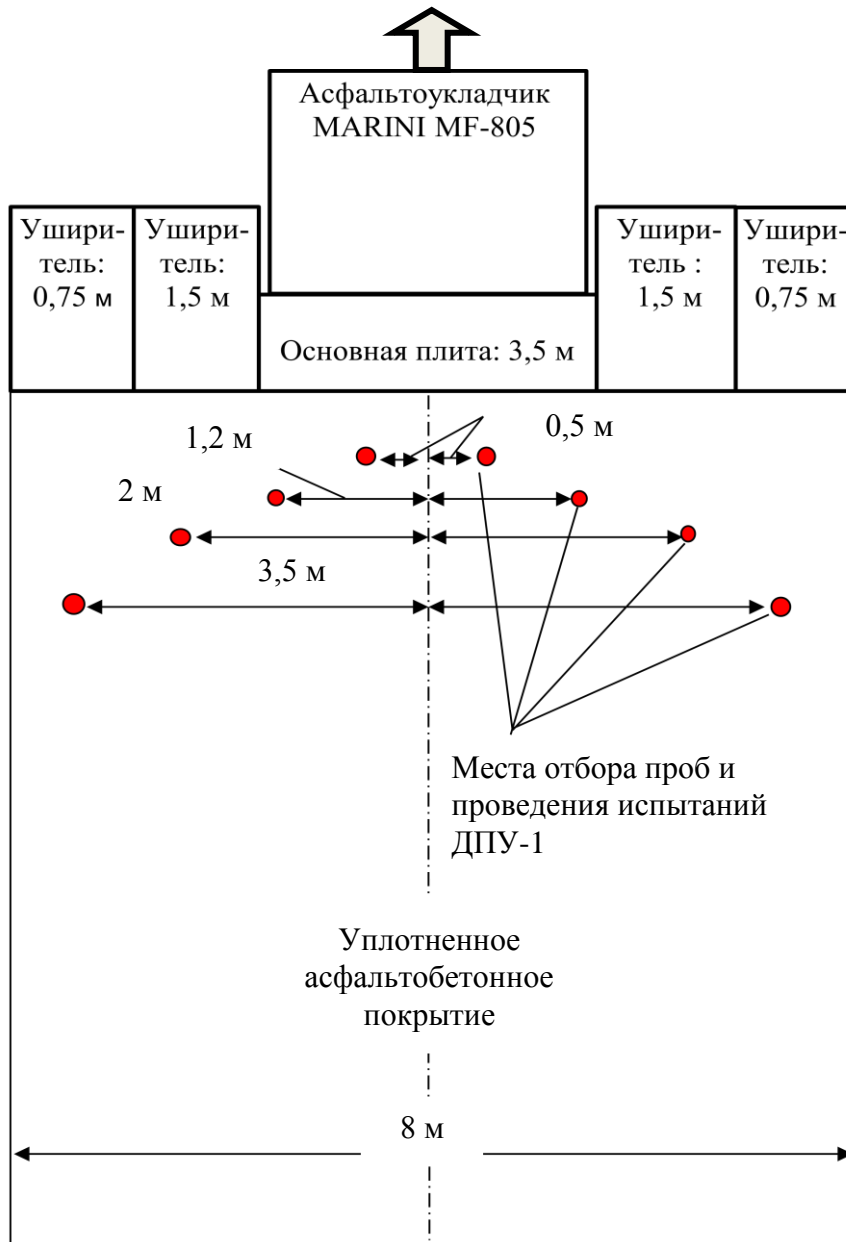


Рис. 3.8. Схема измерений по ширине покрытия

Измерения проводились в реальных условиях строительства.

3.1.3. Результаты исследований

Результаты экспериментов проведенных в реальных условиях эксплуатации, даны в табл. 3.1, 3.2.

Таблица 3.1

Асфальтоукладчик MARINI MF-805 (Дата: 02.06.2005).

Скорость движения асфальтоукладчика – 1,4 м/мин.

Ширина укладки – 7,5 м. Температура воздуха – 15 °С

Номер испытаний	Температура смеси, °С	Место проведения испытаний и взятия проб (в метрах от оси)	Плотность уложенной смеси	Плотность уплотненной смеси (по результатам вырубок)	Количество ударов ДПУ-1	Коэффициент уплотнения
1.	120	0,5	2,28	2,63	7	0,87
2.	115	1,2	2,28	2,63	7	0,87
3.	115	2	2,23	2,63	6	0,85
4.	118	3,5	2,18	2,63	5	0,83
5.	120	0,5	2,28	2,63	7	0,87
6.	120	1,2	2,28	2,63	7	0,87
7.	115	2	2,23	2,63	6	0,85
8.	115	3,5	2,18	2,63	5	0,83

Таблица 3.2

Асфальтоукладчик MARINI MF-805 (Дата: 09.06.2005).

Скорость движения асфальтоукладчика – 2,0 м/мин.

Ширина укладки – 7,5 м. Температура воздуха – 22 °С

Номер испытаний	Температура смеси, °С	Место проведения испытаний и взятия проб (в метрах от оси)	Плотность уложенной смеси	Плотность уплотненной смеси (по результатам вырубок)	Количество ударов ДПУ-1	Коэффициент уплотнения
1.	123	0,5	2,23	2,62	6	0,85
2.	119	1,2	2,23	2,62	6	0,85
3.	119	2	2,18	2,62	5	0,83
4.	119	3,5	2,12	2,62	4	0,81

Окончание табл. 3.2

Номер испытаний	Температура смеси, °С	Место проведения испытаний и взятия проб (в метрах от оси)	Плотность уложенной смеси	Плотность уплотненной смеси (по результатам вырубок)	Количество ударов ДПУ-1	Коэффициент уплотнения
5.	120	0,5	2,23	2,62	6	0,85
6.	120	1,2	2,23	2,62	6	0,85
7.	117	2	2,18	2,62	5	0,83
8.	117	3,5	2,12	2,62	4	0,81

Графические зависимости коэффициента уплотнения от расстояния опытных точек до оси укладчика при скорости 1,4 – 2 м/мин представлены на рис. 3.9, 3.10.

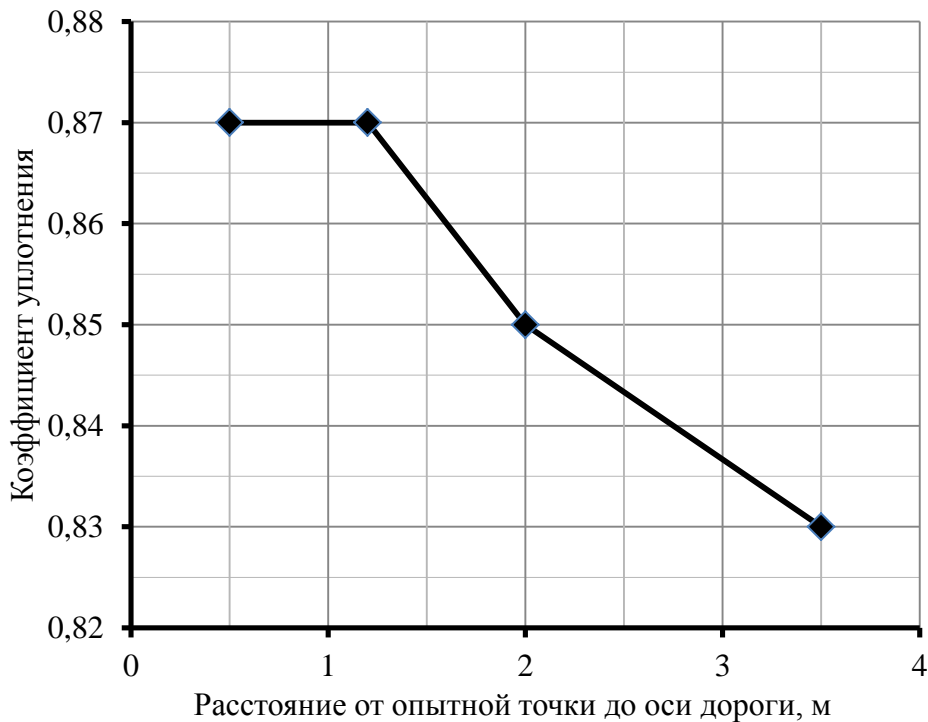


Рис. 3.9. Зависимость степени уплотнения смеси от расстояния от опытной точки до оси дороги (при скорости 1,4 м/мин, толщине слоя 90 – 100 мм)

Коэффициент уплотнения по ширине дорожного покрытия уменьшается до 6 – 9% в крайних точках (3,5 м от оси укладчика). Эти данные подтверждаются результатами экспериментальных исследований в реальных условиях эксплуатации асфальтоукладчика с рабочим органом шириной 3,5 м производства завода «Дормашина» (Николаев), проведенных в МАДИ [29].

Получена зависимость коэффициента уплотнения от числа ударов плотномером ДПУ-1 с наконечником с усеченным конусом (рис. 3.11), что подтверждает возможность модернизации прибора в целях практического использования при контроле степени уплотнения. Плотномер позволяет осуществлять текущий оперативный контроль без нарушения покрытия и рационально управлять режимными параметрами асфальтоукладчика и дорожных катков.

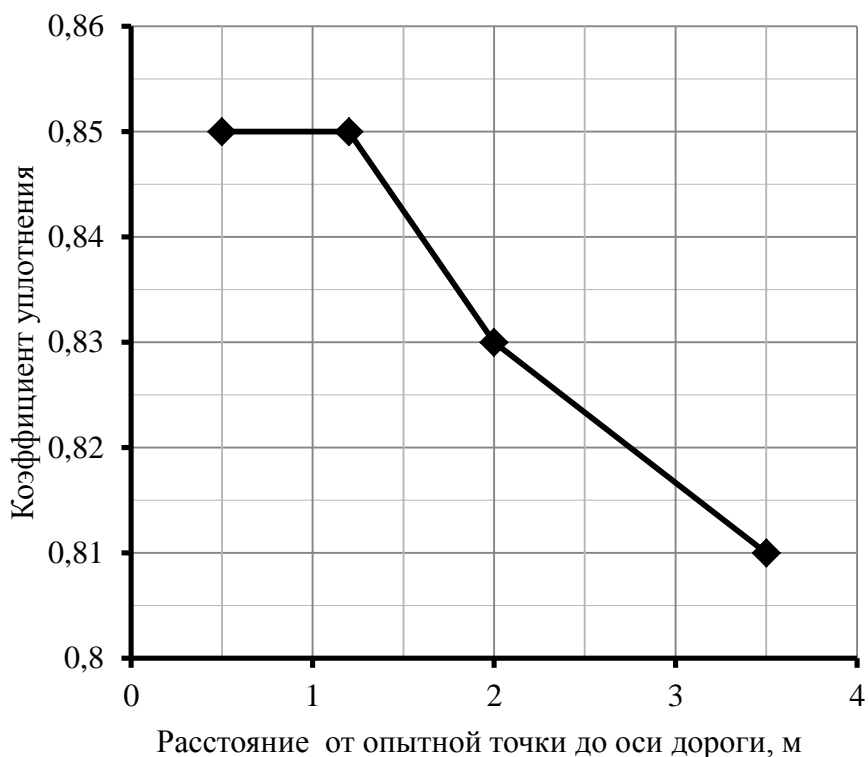


Рис. 3.10. Зависимость степени уплотнения смеси от расстояния от опытной точки до оси дороги (при скорости 2 м/мин, толщине слоя 90 – 100 мм)

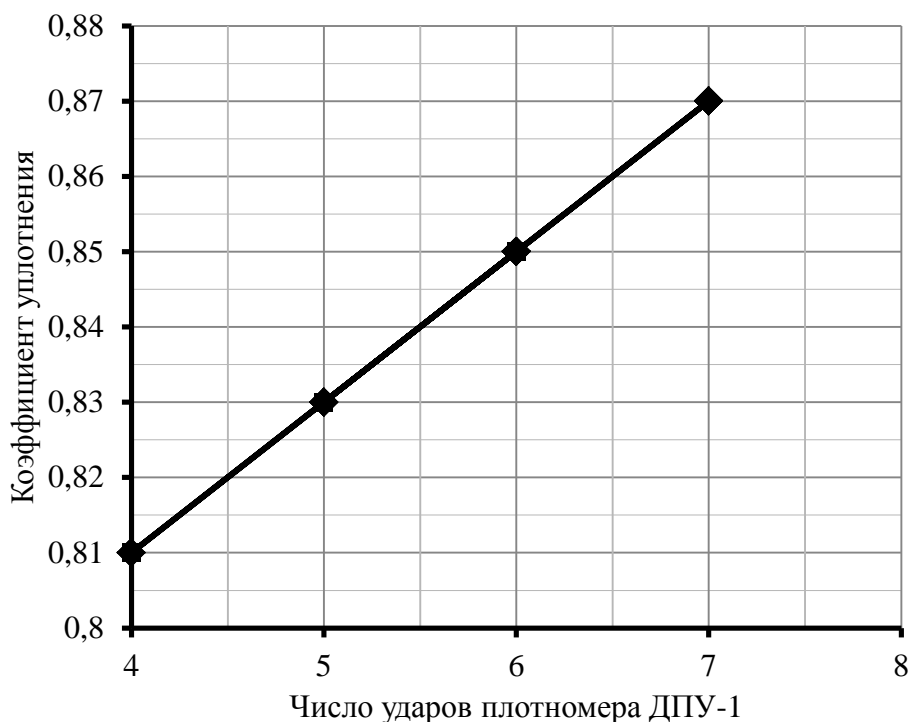


Рис. 3.11. Зависимость степени уплотнения смеси от числа ударов плотномера ДПУ-1 при толщине слоя 90 – 100 мм

Уменьшение коэффициента уплотнения по направлению от оси укладки до крайних точек уширителей рабочего органа (укладка слоя шириной 7 м) на 4 – 5 % должно учитываться при организации окончательного уплотнения дорожными катками. Можно увеличить число проходов дорожных катков на один – два на расстоянии 2 – 3 м от оси укладчика.

Анализ процесса укладки и уплотнения смеси и экспериментальные исследования работы асфальтоукладчика с современным уплотняющим рабочим органом с трамбуемыми брусьями позволили получить следующие результаты:

- определены технические возможности применения плотномера ДПУ-1 для установления степени уплотнения дорожных покрытий как метод экспресс-контроля качества;
- найдены экспериментальные зависимости степени уплотнения смеси (тип А, марка I по ГОСТ 9128-97) от расстояния от опытных точек до оси дороги. Коэффициент уплотнения смеси изменяется от 0,85 в центральной части рабочего органа и до 0,81 у края дороги. Данные о распределении плотности покрытия свидетельствуют о необходимости корректировки технологических и режимных параметров машин, а также

уплотняющего органа машины.

Эти результаты можно использовать при научных исследованиях, а также в дорожно-строительных организациях для создания схем укатки дорожного покрытия нежесткого типа с целью получения оптимального (по ширине) коэффициента уплотнения, уменьшения трудо- и энергозатрат и, как следствие, финансовых расходов, связанных с работой катков.

3.2. Исследование вибрационного формования инженерного обустройства автомобильных дорог

Строительство элементов инженерного обустройства автомобильных дорог (колесоотбойного бруса, барьеров безопасности, мостовых парапетов, водоотводных лотков) производится специальными машинами с использованием монолитного цементобетона [9]. При этом ключевым моментом в работе машин является использование *метода вибрационного формования в скользящей опалубке*.

Источником вынужденных колебаний оборудования является поверхностный вибратор, установленный на наружной поверхности приемного бункера со строительной смесью (цементно- или полимербетонной). Метод виброуплотнения способствует равномерному распределению смеси в форме и уплотнению упаковки заполнителя. Вибрационные машины выполняют свои функции за счет возбужденных механических колебаний рабочих органов при последовательном растяжении и сжатии слоев шихты смеси.

Бетонная смесь представляет собой трехфазную среду, состоящую из твердой (заполнители), жидкой (цементное тесто) и газообразной (пузырьки воздуха) фаз. Силами сухого трения и вязкого сопротивления в колебательный процесс вовлекаются и удаленные частицы; при этом более массивные частицы имеют меньший размах колебаний; таким образом, между частицами смеси возникают относительные проскальзывания, скорость которых уменьшается по мере удаления от излучающей поверхности, а на некотором расстоянии от последней она становится равной нулю.

При ослаблении *силы сцепления частиц* при вибрировании значения их *силы тяжести* оказываются достаточными для преодоления сил трения, т. е. происходит уменьшение коэффициента трения. К слову сказать, слои вовлекаются в колебания не мгновенно, а с запаздыванием по отношению к предыдущим вследствие их инертности; в итоге все слои шихты придут в колебательное, волновое движение. Движение системы,

положение которой зависит от пространственной и временной координат, описывается *волновыми уравнениями в частных производных*, решение которых затруднено в связи с нелинейностью свойств бетонной смеси в процессе виброформования. Поэтому некоторые значения величин, входящих в уравнения, принимаются по экспериментальным данным. Для генерирования колебаний обычно применяют разбалансированное тело, при вращении которого возникает центробежная сила

$$F = m_{\text{д}} \omega^2 r, \quad (3.1)$$

где $m_{\text{д}}$ – масса дебаланса; ω – угловая скорость дебаланса; r – эксцентриситет дебаланса.

В процессе виброформования выделяют несколько этапов:

- доведение цементного теста до псевдосжиженного состояния;
- проскальзывание частиц под давлением собственного веса и веса вышележащих слоев смеси;
- плотная упаковка частиц и полное заполнение пустот цементным тестом.

Дальнейшее вибрирование нарушает равновесие вследствие стекания цементного теста на дно формы и разрыхления уплотненной массы. Таким образом, на первой стадии вибрирования, когда в смеси еще остаются незаполненные полости, цементное тесто не представляет собой единого слоя жидкости. В связи с этими особенностями виброформования необходимо фиксировать момент полного уплотнения смеси для прекращения вибрации. При колебании стенок бункера под воздействием вибратора происходит изменение жесткости смеси. В системах, не подвергающихся вибрации, реологическая модель бетонной смеси может быть описана уравнением Шведова – Бингама

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dU}{dx}, \quad (3.2)$$

где τ, τ_0 – соответственно полное и начальное напряжение сдвига; μ – пластическая вязкость смеси; $\frac{dU}{dx}$ – градиент скорости сдвига.

В зависимости от интенсивности воздействия колебаний система укладчика может рассматриваться как колебательное звено второго порядка. Схема динамической модели бордюроукладчика приведена на рис. 3.12.

Математическая модель укладчика описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (m_0 + \rho v)\ddot{x} + b_2\dot{x} + c_2x = m_D R \omega^2 \cos \omega t \sin \gamma \\ (m_0 + \rho v)\ddot{y} + c_1y - (m_0 + \rho v) = m_D R \omega^2 \sin \omega t \cos \gamma, \end{cases} \quad (3.3)$$

где m_0 – масса колебательной системы; ρ – плотность бетонной смеси; x, \dot{x}, \ddot{x} – соответственно перемещение, скорость и ускорение системы; b_2 – вязкость бетонной смеси; c_2 – жесткость бункера; c_1 – жесткость амортизатора; m_D – масса дебаланса вибратора; R – радиус эксцентриситета; ω – частота вращения дебаланса; t – время работы; γ – угол наклона стенки бункера.

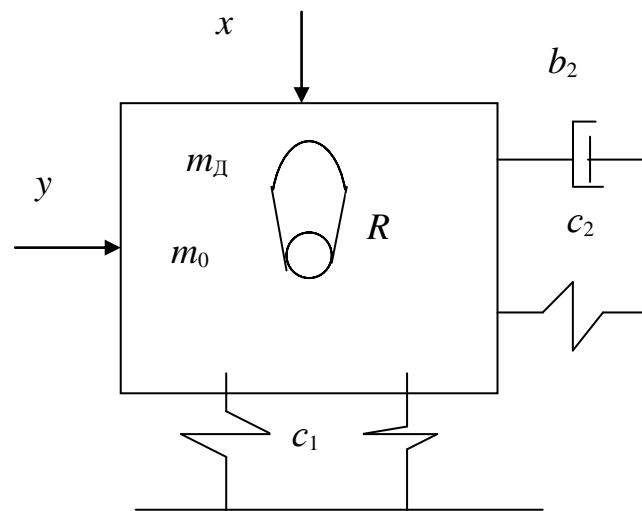


Рис. 3.12. Динамическая модель системы

Разделив левую и правую части исходных уравнений на $(m_0 + \rho v)$, получим систему линейных неоднородных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{b_2 \dot{x}}{m_0 + \rho v} + \frac{c_2 x}{m_0 + \rho v} = \frac{m_d R \omega^2 \cos \omega t \cdot \sin \gamma}{m_0 + \rho v}; \\ \ddot{y} + \frac{c_1 y}{m_0 + \rho v} - \frac{(m_0 + \rho v) g}{m_0 + \rho v} = \frac{m_d R \omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \gamma}{m_0 + \rho v}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Установившиеся вынужденные колебания системы описываются частными интегралами исходных уравнений:

$$\begin{aligned} x &= x_a \cos(\omega t - \varphi_x); \\ y &= y_a \sin(\omega t - \varphi_x), \end{aligned} \quad (3.5)$$

где x_a и y_a – амплитудные значения перемещений; φ_x – угол сдвига фаз между вынужденными колебаниями и вынужденной силой.

Продифференцировав дважды уравнения вынужденных колебаний по времени и подставив полученные значения \ddot{x} , \ddot{y} , \dot{x} , \dot{y} , x , y в систему уравнений (3.4), получим:

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{m_d \omega^2 R}{\sqrt{\left[c_2 - (m_0 + \rho v) \omega^2 \right]^2 - (b_2 \omega)^2}}; \\ y_a &= \frac{m_d \omega^2 R}{\sqrt{\left[c_1 - (m_0 + \rho v) \omega^2 \right]^2}}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Скорость колебаний:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x_a \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi\right); \\ \dot{y} &= y_a \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi\right).\end{aligned}\tag{3.7}$$

Ускорение системы:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= x_a \omega^2 \cos(\omega t + \pi + \varphi); \\ \ddot{y} &= y_a \omega^2 \sin(\omega t + \pi + \varphi).\end{aligned}\tag{3.8}$$

Математическая модель описывает процесс укладки цементобетонной смеси до того момента, пока смесь не достигнет максимальной плотности

$$0 < \rho < \rho_{\max} .\tag{3.9}$$

Критериями работоспособности в режиме воздействия на него вибрационных нагрузок являются амплитуда колебаний бункера и ее вторая производная – ускорение.

В числе других параметров, влияющих на величину динамической нагруженности, следующие: масса колебательной системы, дебаланса вибратора, радиус эксцентриситета, частота вращения дебаланса, угол сдвига фаз, объем, вязкость смеси, жесткость амортизатора, бункера, время работы.

Для выбора рациональных параметров динамической системы, описанной системой уравнений (3.3), было проведено математическое моделирование на ЭВМ.

Система уравнений решалась по разработанной программе (с разбивкой варьируемых параметров на определенные шаги). Шаг принят по плотности смеси, равной 100 кг/м^3 .

В табл. 3.3 – значения *постоянных* коэффициентов модели.

Таблица 3.3

Постоянные параметры математической модели

Параметр	Ед. изм.	Обозначение	Величина
Масса колебательной системы	кг	m_0	100
Масса дебаланса вибратора	кг	m_d	10
Радиус эксцентриситета	м	R	0,008
Частота вращения дебаланса	рад/с	ω	300
Угол сдвига фаз	рад	U	0,5
Объем бетонной смеси	м ³	V	1,0

В табл. 3.4 – значения *варьируемых* коэффициентов математической модели.

Таблица 3.4

Значения варьируемых параметров

Параметр	Ед. изм.	Обозначение	Величина
Жесткость амортизатора	Н/м	c_1	0,5; 10; 100
Жесткость бункера	Н/м	c_2	0,5; 10; 100
Время работы	с	t	10; 100; 200
Вязкость бетонной смеси	Па/с	b_2	25; 100; 200

Результаты вычислений показали, что при изменении плотности смеси от 100 до 3000 кг/м³ при постоянной жесткости 60 Н/м амплитуда колебаний вибросистемы составила от 0,09 до 0,30 мм. Её величина в вертикальной и горизонтальной плоскости существенно не отличается. Ускорение элементов системы колеблется от 0,2 до 3,0 м/с². Ускорение, возникающее в вертикальной плоскости, превышает ускорение по горизонтальной плоскости. Его значения по плоскостям распределились следующим образом:

- в вертикальной плоскости – от 0,7 до 3,0 м/с²;
- в горизонтальной плоскости – от 0,2 до 0,9 м/с².

С увеличением плотности смеси амплитуда колебаний увеличивается, а ускорение элементов системы уменьшается (рис. 3.13).

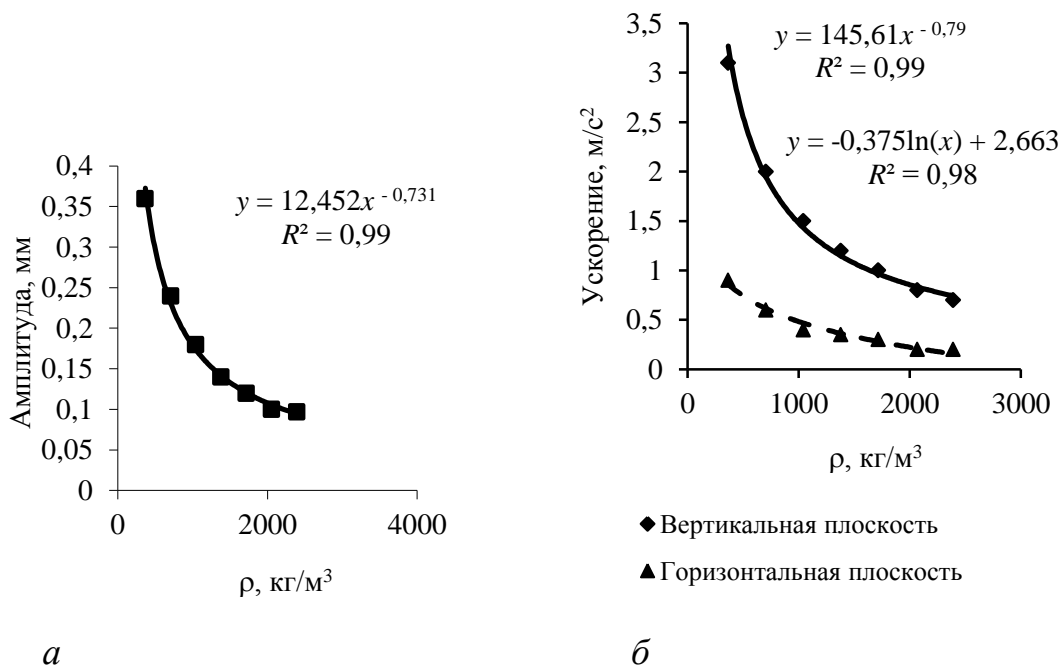


Рис. 3.13. Зависимости динамических параметров колебательного процесса системы от плотности смеси: *а* – амплитуды; *б* – ускорения

Параметры колебательного процесса :

вязкость бетонной смеси	Па/с	b_2	100,0
жесткость амортизатора	Н/м	c_1	100,0
жесткость бункера	Н/м	c_2	100,0
время работы	с	t	10,0

На рис. 3.14 – результаты исследований при уменьшении жесткости амортизатора и бункера до 0,5 Н/м и увеличении времени работы до 100 секунд. В этом случае амплитуда колебаний составила от 0,07 до 0,36 мм. Ускорение в вертикальной плоскости составляет от 0,9 до 4,5 м/с², в горизонтальной – от 0,7 до 3,2 м/с².

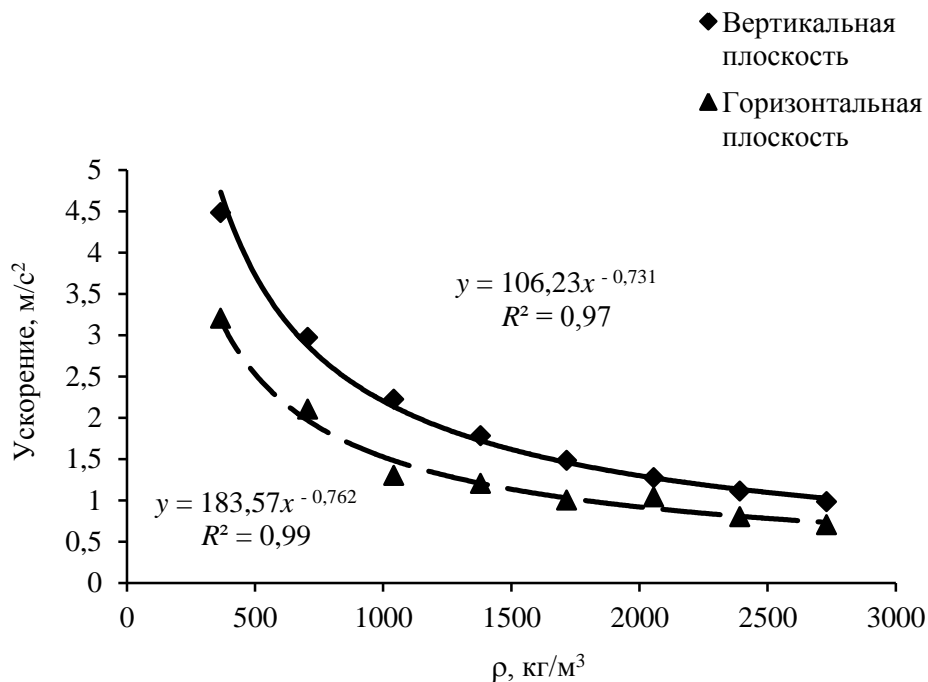


Рис. 3.14. Зависимость ускорения бункера от плотности смеси

Параметры колебательного процесса :

вязкость бетонной смеси	Па/с	b_2	100
жесткость амортизатора	Н/м	c_1	0,5
жесткость бункера	Н/м	c_2	0,5
время работы	с	t	100

Более значительные изменения в колебательной системе наблюдаются при увеличении жесткости амортизатора до 100 Н/м. Результаты исследований при указанных параметрах – на рис. 3.15. Амплитуда колебаний составляет от 0,04 до 0,07 мм. Ускорение в горизонтальной плоскости изменяется от 0,5 до 0,8 м/с²; в вертикальной – от 3 до 6 м/с².

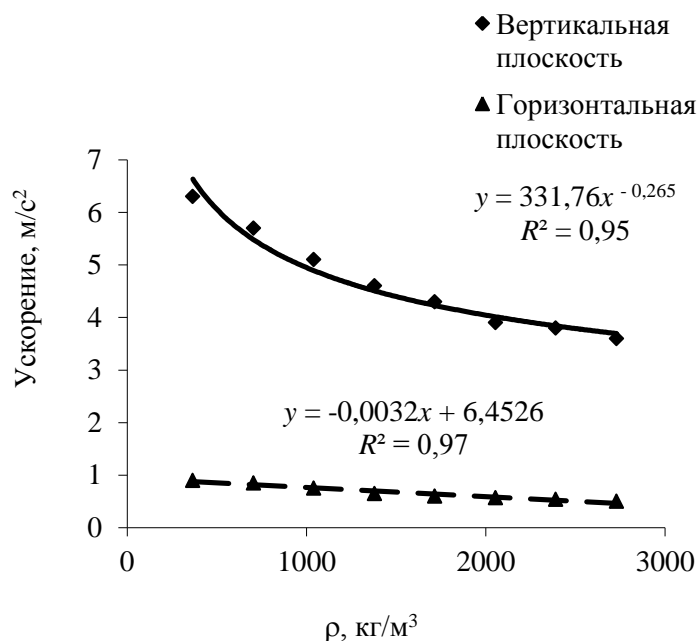


Рис. 3.15. Зависимость ускорения бункера от плотности смеси

Параметры колебательного процесса :

вязкость бетонной смеси	Па/с	b_2	100
жесткость амортизатора	Н/м	c_1	100
жесткость бункера	Н/м	c_2	100
время работы	с	t	100

Изучение вибрационного формования при изменении времени работы системы со 100 с до 300 с привело к следующим результатам. При времени работы системы 200 с амплитуда колебаний составила 0,04 – 0,07 мм. Ускорение системы в вертикальной плоскости изменялось от 2,86 м/с² до 4,56 м/с², а в горизонтальной – от 2,64 м/с² до 4,5 м/с². С увеличением времени вибрирования до 300 с амплитуда колебаний снизилось незначительно; ускорение несколько увеличилось (в вертикальной плоскости до 3,62 – 6,33 м/с², в горизонтальной – до 0,5 м/с² – 0,9 м/с²).

С некоторым приближением можно считать, что при постоянной амплитуде колебаний вибровозбудителя силы вязкого сопротивления цементного теста растут пропорционально скорости, т. е. частоте колебаний, а инерционные силы – пропорционально величине частоты колебаний в квадратной степени.

Таким образом, абсолютное перемещение мелких частиц замедляется с увеличением частоты колебаний, что в совокупности с фазовыми сдвигами приводит к росту их проскальзывания относительно окружающей среды. Этим объясняется целесообразность повышения частоты колебаний при формировании смесей с мелким заполнителем.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Задачей разработки системы автоматического управления является *повышение ровности дорожного полотна* при устройстве покрытия. На данную характеристику значительное влияние оказывает установка угла атаки выглаживающей плиты при формировании слоя смеси. Для управления установкой угла атаки предложена система автоматического управления [41] положением плиты (рис. 4.1). Задачи системы – рост эффективности автоматического управления положением плиты в итоге применения тензометрического преобразователя (датчика) на тяговом бруске, максимально приближенного к передней кромке плиты и обеспечивающего заданную ровность и регулирование угла атаки плиты без непосредственного участия в управлении процессом машиниста-оператора, а также увеличение производительности и эффективности дорожно-строительных работ.

Она может быть установлена на асфальтоукладчике с рабочим органом, в состав которого входит выглаживающая плита с вибратором (или без него) и трамбуемый брус. Наличие бруса не обязательно.

Система содержит датчик углового положения 1, имеющий индикатор ошибки и переключатели задатчика стабилизируемого угла, датчик высотного положения 2 с индикатором ошибки, тензометрический преобразователь (датчик) 3, блок управления 4 и дискретные гидравлические приводы 5. Датчик углового положения 1 вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный величине отклонения рабочего органа асфальтоукладчика от гравитационной вертикали.

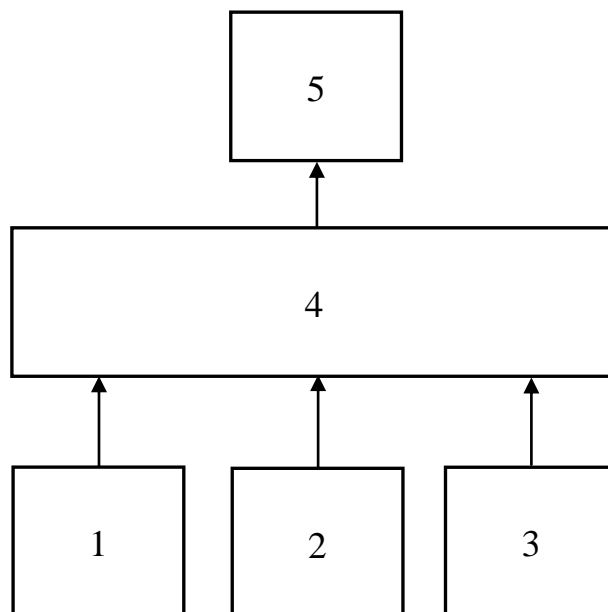


Рис. 4.1. Структурная схема системы автоматического управления положением выглаживающей плиты асфальтоукладчика : 1 – датчик углового положения; 2 – датчик высотного положения; 3 – тензометрический преобразователь; 4 – блок управления; 5 – дискретные гидравлические приводы

Сигнал ошибки поступает с выхода датчика углового положения 1 на первый вход блока управления 4. Датчик высотного положения 2 вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный величине отклонения рабочего органа от положения, заданного копиром. Далее сигнал поступает с выхода датчика высотного положения 2 на второй вход блока управления 4. Тензометрический преобразователь (датчик) 3 вырабатывает сигнал, пропорциональный усилию в металлоконструкции выглаживающей плиты и поступающий с выхода тензометрического преобразователя (датчика) 3 на третий вход блока управления 4. Последний вырабатывает сигналы управления дискретными гидравлическими приводами 5 для сведения текущих ошибок к нулю. Длительность и частота управляющих сигналов зависит от величины ошибки.

Преимущество данного технического решения заключается в повышении эффективности автоматического управления положением выглаживающей плиты асфальтоукладчика вследствие непрерывности формирования дорожного полотна и применения тензометрического преобразователя (датчика) на тяговом бруске, максимально приближенного к передней кромке выглаживающей плиты, автоматически контролирующего неровность поверхности смеси и изменяющего угол атаки выглаживающей плиты асфальтоукладчика без непосредственного участия в управлении

процессом машиниста-оператора, что в целом свидетельствует об увеличении производительности дорожно-строительных работ.

Для обеспечения заданной степени уплотнения асфальтобетонной смеси без непосредственного участия в управлении процессом уплотнения машиниста-оператора разработана система автоматического управления [40] рабочего органа асфальтоукладчика (рис. 4.2).

Она устанавливается на асфальтоукладчике с трамбуемыми брусками и содержит датчик углового положения 1, имеющий индикатор ошибки и переключатели задатчика стабилизируемого угла, датчик высотного положения 2 с индикатором ошибки, тензометрический преобразователь (датчик) 3 и блок управления 4.

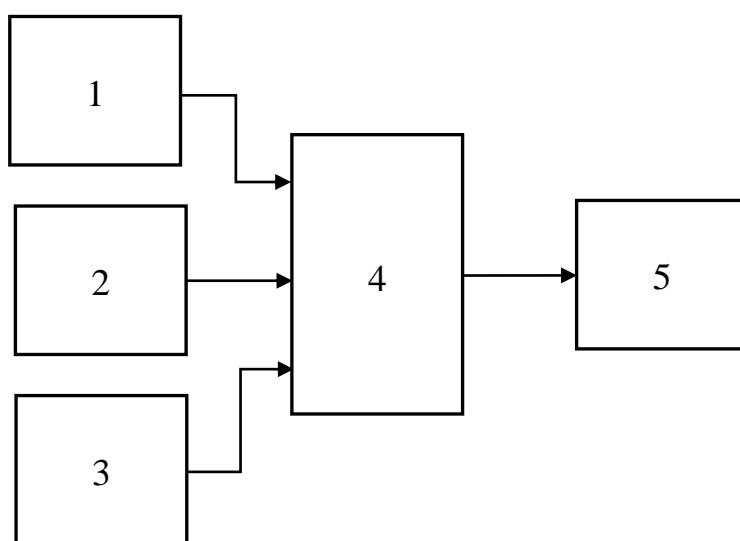


Рис. 4.2. Структурная схема системы автоматического управления рабочим органом асфальтоукладчика : 1 – датчик углового положения; 2 – датчик высотного положения; 3 – тензометрический преобразователь; 4 – блок управления; 5 – гидравлический привод

Датчик углового положения 1 вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный величине отклонения рабочего органа асфальтоукладчика от гравитационной вертикали. Он поступает с выхода датчика углового положения 1 на первый вход блока управления 4. Датчик высотного положения 2 вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный величине отклонения рабочего органа от положения, заданного копиром. Сигнал ошибки поступает с выхода датчика высотного положения 2 на второй вход блока управления 4.

Тензометрический преобразователь (датчик) 3 вырабатывает сигнал, пропорциональный усилию в металлоконструкции трамбуемого бруса и

поступающий с выхода тензометрического преобразователя (датчика) 3 на третий вход блока управления 4. Последний вырабатывает сигналы управления дискретными гидравлическими приводами 5 для сведения текущих ошибок к нулю. Длительность и частота управляющих сигналов зависит от величины ошибки.

Преимущество данного технического решения заключается в повышении эффективности автоматического управления рабочим органом асфальтоукладчика вследствие непрерывности процесса уплотнения и применения тензометрического преобразователя (датчика) усилия в металлоконструкции трамбуемого бруса, обеспечивающего заданную степень уплотнения смеси без непосредственного участия в управлении процессом машиниста-оператора, что в целом свидетельствует об увеличении производительности дорожно-строительных работ.

Для повышения качества строительства дорожного полотна разработан *способ управления формированием слоя*. В целях поставленной задачи применяется электронный блок управления асфальтоукладчиком путем поступления в него информации с датчиков о текущей степени уплотнения, сравнения контролируемого параметра с заданным проектным значением и регулирования режимных параметров работы, что предполагает непрерывное автоматическое управление процессом при скоростях движения асфальтоукладчика, соответствующей проектному значению.

В качестве режимных параметров работы машины выступают параметры его рабочего органа, а их регулирование осуществляют с помощью подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа.

При этом способе используется асфальтоукладчик с трамбуемыми брусьями, регулируемые параметры рабочего органа которого – частота вращения эксцентрикового вала привода трамбуемых брусьев и усилие в толкателях трамбуемых брусьев; параметр для оценки плотности дорожного покрытия – коэффициент уплотнения.

При этом применяют информационные параметры тензометрических датчиков в толкателях трамбуемых брусьев, датчика действительной скорости движения асфальтоукладчика, частоты вращения эксцентрикового вала привода трамбуемых брусьев, а на основе информации о текущей степени уплотнения и её сравнения с проектным значением коэффициента уплотнения осуществляют автоматическое управление уплотнением путем изменения частоты вращения эксцентрикового вала.

Устройство автоматического управления уплотнением смеси находится на асфальтоукладчике с трамбуемыми брусьями и дополнительно содержит тензометрические датчики, размещаемые в толкателях трамбуемых брусьев, а также датчики действительной скорости движения асфальтоукладчика, частоты вращения эксцентрикового вала привода

трамбуемых брусьев, связанные через устройство ввода и микропроцессор с блоком перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) и являющиеся элементами подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа, микропроцессор снабжен обратной связью с устройствами ввода и вывода.

При этом устройство вывода связано с золотниковым исполнительным механизмом, являющимся регулятором рабочего объема гидромотора, автоматически изменяющим частоту трамбования уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика при его различных проектных значениях скорости движения.

На рис. 4.3 приведена функциональная схема расположения элементов и блоков устройства автоматического управления процессом [39] с выделенным контуром подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа, с помощью которого осуществляется автоматическое управление уплотнением смеси.

Данная система, размещенная на асфальтоукладчике с трамбуемыми брусьями, содержит ввод 1, однокристалльный микропроцессор 2, вывод 3, блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) 4, тензометрические датчики 5, находящиеся в толкателях трамбуемых брусьев, датчик действительной скорости движения асфальтоукладчика 6, датчик частоты вращения эксцентрикового вала привода трамбуемых брусьев 7.

Указанные датчики связаны через устройство ввода 1 и однокристалльный микропроцессор 2 с блоком ППЗУ 4 и являются элементами подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа. Однокристалльный микропроцессор 2 снабжен обратной связью с устройствами ввода 1 и вывода 3.

При этом последнее связано с золотниковым исполнительным механизмом 8, являющимся регулятором рабочего объема гидромотора 9, автоматически изменяющим частоту трамбования уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика (бруса) 10 при различных проектных значениях скорости движения машины.

Регулировка уплотнения смеси с помощью устройства автоматического управления заключается в следующем.

Датчик действительной скорости движения машины 6 и датчик частоты вращения эксцентрикового вала привода трамбуемого бруса 7 преобразуют скорость и частоту в электрические (аналоговые) сигналы, которые поступают в аналого-цифровой преобразователь ввода 1. Здесь они преобразуются в цифровые сигналы и в цифровом виде поступают в однокристалльный микроконтроллер 2. Это вычислительное устройство, которое имеет обратную связь с устройством ввода 1, блоком ППЗУ 4 и устройством вывода 3 и выполняет расчетные операции в соответствии с

алгоритмом перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) 4, а именно сравнивает поступившие цифровые сигналы устройства ввода 1 с запрограммированным в ППЗУ 4 значением коэффициента уплотнения.

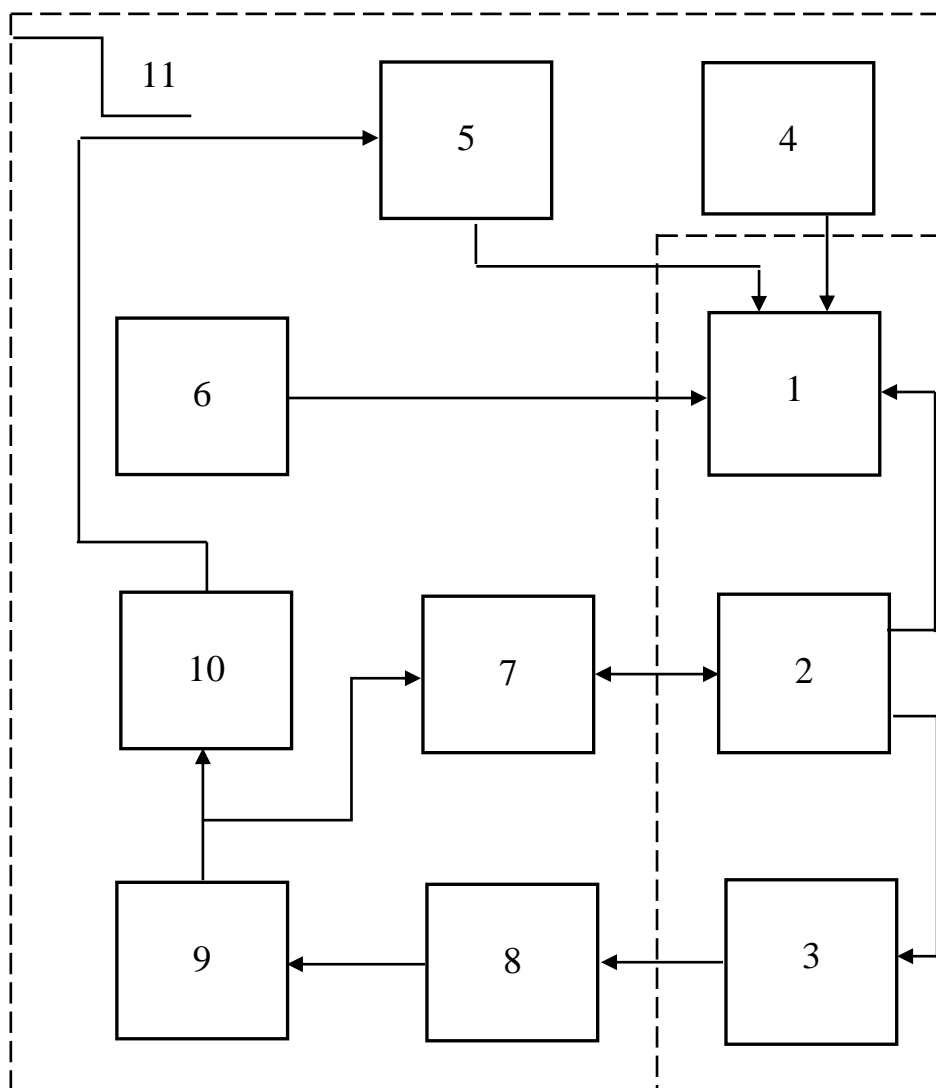


Рис. 4.3. Структурная схема расположения элементов и блоков устройства автоматического управления процессом уплотнения смеси : 1 – устройство ввода; 2 – микропроцессор; 3 – устройство вывода; 4 – блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства; 5 – тензометрические датчики; 6 – датчик действительной скорости движения асфальтоукладчика; 7 – датчик частоты вращения эксцентрикового вала привода трамбуемых брусьев; 8 – тензометрические датчики; 9 – золотниковый исполнительный механизм; 10 – уплотняющий рабочий орган асфальтоукладчика (бруса); 11 – подсистема автоматического управления режимами уплотняющего органа

Последнее найдено в результате экспериментальных исследований уплотняющей способности рабочего органа асфальтоукладчика с трамбуемыми брусьями и зависит от усилий на трамбуемых брусьях, частоты трамбования и частоты вращения эксцентрикового вала при различной скорости движения машины.

В случае несоответствия коэффициента уплотнения требуемому значению из однокристалльного микроконтроллера 2 через цифро-аналоговый преобразователь вывода 3 поступает аналоговый сигнал на электроуправляемый золотниковый исполнительный механизм 8, распределяющий и регулирующий поток жидкости в заданном направлении. В итоге меняется рабочий объем гидромотора 9, что вызывает изменение частоты трамбования уплотняющего рабочего органа асфальтоукладчика. На рабочем органе размещены тензометрические датчики 5, преобразующие растяжение и сжатие толкателей трамбуемых брусьев в электрический (аналоговый) сигнал. После преобразования в устройстве ввода 1 аналоговый сигнал поступает в цифровом виде с тензометрических датчиков 5 в однокристалльный микроконтроллер 2 как усилие, соответствующее текущему коэффициенту уплотнения, и элементы подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа, образующие контур 11, непрерывно продолжают свои действия до остановки асфальтоукладчика.

Работа подсистемы автоматического управления режимами уплотняющего органа основана на экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии заложенной в алгоритме перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) 4 зависимости коэффициента уплотнения K_y от усилия F в элементах привода уплотняющего бруса на завершающей фазе цикла уплотнения, при нарастании сопротивления смеси деформированию (условно не показано).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии авторами обобщаются результаты научных исследований, выполняемым на протяжении ряда лет в СФУ, по научному направлению механизация, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в дорожной отрасли. Получили развитие теоретические положения, касающиеся процессов управления дорожно-строительными машинами, основанные на имитационных моделях и аналитических зависимостях между параметрами рабочих процессов. На основании выполненных авторами исследований сформулированы основные выводы и получены следующие результаты.

1. В технологическом комплексе дорожно-строительных работ для обеспечения высокого качества готового покрытия необходимо внедрение автоматического управления процессами на этапе укладки и уплотнения смеси. Проблема неравномерности распределения коэффициента уплотнения по ширине рабочего органа асфальтоукладчика, выявленная в результате экспериментальных исследований, требует проведения дополнительных научных исследований для поиска новых технических решений и разработки алгоритмов управления режимными параметрами рабочего процесса.

2. Разработана имитационная динамическая модель уплотнения смеси вибрационным катком, позволяющая упростить исследование динамических процессов, вызванных изменением параметров дорожного катка и уплотняемого упруго-вязко-пластичного материала при проведении численных экспериментов.

3. Рассмотрен метод исследования и построения систем управления нелинейными динамическими объектами на примере следящей системы асфальтоукладчика с учетом динамики процессов в гидроприводе, что позволяет построить высококачественные системы автоматического управления, в которых меньше ошибок регулирования. Разработано программное обеспечение на языке MATLAB&Simulink.

4. Данные о распределении плотности покрытия свидетельствуют о необходимости корректировки технологических и режимных параметров машин, а также уплотняющего органа машины.

5. Анализ виброформования цементобетонной смеси показал, что качество строительства дорожных конструкций (например, бордюров) зависит от эффективности вибрации.

6. Предложены новые технические решения способствующие повышению эффективности работы комплектов дорожно-строительных машин выполняющих укладку и уплотнение асфальтобетонных смесей.

Список литературы

1. «Интеллектуальное» уплотнение: дерзкий замысел или объективная реальность? // Строит. и дор. машины. – 2007. – № 8. – С. 8 – 13.
2. Баловнев, В. И. Дорожно - строительные машины и комплексы / В. И. Баловнев, А. Б. Ермилов, А. Н. Новиков. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
3. Доценко, А. И. Комплексная автоматизация производства асфальтобетонной смеси с учетом влияния факторов её транспортировки, укладки и уплотнения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Анатолий Иванович Доценко. – М., 2005. – 42 с.
4. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 576 с.
5. Дьяконов, В. П. Математические пакеты расширения MATLAB: спец. справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
6. Емельянов, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Р. В. Дума. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с. (С. 5).
7. Жданов, А. А. Адаптивные машины – неизбежное направление развития техники. Задачи и проблемы / XII Всероссийская науч.-технич. конференция «Нейроинформатика – 2010»: Лекции по нейроинформатике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 162 – 211.
8. Иванченко, С. Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Сергей Николаевич Иванченко. – СПб., 1997. – 34 с.
9. Исследование процесса вибрационного формования инженерного обустройства автомобильных дорог / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, Е. С. Турышева, П. А. Постоев // Строит. и дорож. машины. – 2010. – № 10. – С. 44 – 48.
10. Клевцова, О. Г. Автоматизация процесса виброуплотнения до-рожными катками: в 2 т. Т.1 / О. Г. Клевцова, В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев / Актуал. проблемы авиации и космонавтики, 2010. – С. 321 – 322.
11. Колпаков, А. С. Система автоматического регулирования коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси / А. С. Колпаков, В. И. Иванчура, А. П. Прокопьев // Молодежь и наука: Сб. материалов VI-й Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых

ученых [Электронный ресурс] /отв. ред. О. А. Краев. – Красноярск : СФУ, 2011. – С. 751 – 767.

12. Костельов, М. П. Как правильно выбрать и настроить асфальтоукладчик / М. П. Костельов, Д. В. Пахаренко, З. К. Бринк [Электронный ресурс] // Каталог - справочник «Дорожная техника – 2007». – 2007. – Вып. № 70. – URL: <http://www.mrmz.ru/article/v70/article1.htm>.

13. Костельов, М. П. Методы и средства контроля качества уплотнения дорожного земляного полотна, щебеночного основания и асфальто-бетонного покрытия [Электронный ресурс] / М. П. Костельов, Ю. Е. Никольский, Ю. Э. Райский // Каталог-справочник «Дорожная техника – 2003». – URL: <http://www.library.stroit.ru/v-series/j-2/p-1.html>.

14. Кустарев, Г. В. «Мозги» для катков – панацея или помощник? / Г. В. Кустарев // Авт. дороги. – № 9 (934). – 2009. – С. 118 – 121.

15. Лещенко, В. П. Основные параметры и конструктивные особенности рабочих органов зарубежных асфальтоукладчиков: Обзор / В. П. Лещенко, Л. Б. Скворцова, Г. Г. Фонгауз // ЦНИИТЭстроймаш. – М., 1971. – 79 с.

16. Лукас, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

17. Марышев, Б. С. Скоростное строительство асфальто-бетонных покрытий / Б. С. Марышев, Б. М. Слепая. – М.: ВПТИ Трансстрой, 1983.

18. Новиков, А. М. Методология научного исследования / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М.: Либроком, 2010. – 280 с.

19. Пермяков, В. Б. Анализ реологических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси / В. Б. Пермяков, В. С. Щербаков, М. Н. Ахилбеков; СибАДИ. – М., 1987. – Деп. в ЦНИИТЭстроймаш 09.01.87, № 13-сд 87.

20. Пермяков, В. Б. Влияние режимных параметров катков на интенсивность уплотнения асфальтобетонных смесей / В. Б. Пермяков, К. В. Беляев // Строит. и дор. машины. – 2007. – № 1. – С. 19 – 22.

21. Пермяков, В. Б. Математическая модель процесса уплотнения асфальтобетонных смесей / В. Б. Пермяков, К. В. Беляев // Изв. вузов. Строит. и архитектура. – 2005. – № 1. – С. 110 – 116.

22. Пермяков, В. Б., Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком / В. Б. Пермяков, В. В. Дубков, В. С. Серебренников // Ом. науч. вестн. Сек. Машиностроение и машиноведение. – 2008. – № 1 (64). – С. 67 – 71.

23. Пермяков, В.Б. Исследование релаксации напряжений в асфальтобетонных смесях в процессе их уплотнения/ В. Б. Пермяков // Изв. вузов. Строит. и архитектура. – 1985. – № 5. – С.99 – 102.

24. Провести исследования работы бруса высокого уплотнения асфальтоукладчика Супер-1700 фирмы «Фёгеле» ФРГ в эксплуатационных условиях: отчет о НИР / НПО ВНИИСтройдормаш. – М., 1985 – 80 с.

25. Прокопьев, А. П. Имитационное моделирование автоматической системы управления рабочим органом асфальтоукладчика / А. П. Прокопьев, В. И. Иванчура // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях» АИТА-2011. / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – М., 2011. – С. 741 – 750.

26. Прокопьев, А. П. Моделирование систем адаптивного управления процессами укладки и уплотнения дорожных покрытий нежесткого типа / А. П. Прокопьев // Тр. междунар. научно-практ. конф. «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях» АИТА-2011. / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – М., 2011. – С. 751 – 767.

27. Прокопьев, А. П. Исследование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, А. С. Климов // Строит. и дор. машины. – 2009. – № 7. – С. 12 – 17.

28. Прокопьев, А. П. Исследование уплотняющего оборудования асфальтоукладчика / А. П. Прокопьев // Изв. вузов. Строительство. – 1994. – № 4. – С 71 – 72.

29. Прокопьев, А. П. Оптимизация параметров уплотняющего оборудования асфальтоукладчика с качающимися брусками: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Андрей Петрович Прокопьев. – М.: МАДИ, 1991. – 20 с.

30. Ращупкина, Н. М. Мир в цифрах – 2009: карманный справочник / Н. М. Ращупкина. – М.: Издательство «Олимп – Бизнес», 2009. – 272 с.

31. Стороженко, М. С. Совершенствование технологии уплотнения асфальтобетонных покрытий с целью повышения прочности и долговечности / М. С. Стороженко // Вестн. ХНАДУ. – 2008. – № 40. – С. 99 – 102.

32. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: справ. энцикл. дорожника (СЭД): в 9 т. Т. I / А. П. Васильев, Б. С.

Марышев, В. В. Силкин и др.; под ред. А. П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2005.

33. Тюкин, В. Н. Теория управления: в 2 ч. Ч. 2. Особые линейные и нелинейные системы / В. Н. Тюкин. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – 128 с.

34. Тюремнов, И. С. Нужен единый подход в совершенствовании критериев уплотнения дорожно-строительных материалов/И. С. Тюремнов, А. А. Игнатъев [Электронный ресурс] // Авт. дороги. – № 5 (942). – 2010. – URL: <http://www.avtodorogi-magazine.ru/2010-05-01/them/nuedpo.html>.

35. Электронный ресурс: http://inpromplus.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=12:relef&catid=10:sau&Itemid=17.

36. Электронный ресурс: <http://www.voegele.info>.

37. Intelligent Soil Compaction Systems. NcHrp RepoRt 676. TranSporTaT Ion reSearCh Board, Washington, D.C., 2010. (Project 21-09) URL: www.tRB.org. ISBN 978-0-309-15519-9. – ISSN 0077-5614.

38. Siminiati, D. Simulation on vibratory roller-soil Interaction / D. Siminiati, D. Hren //Advanced Engineering. – 2(2008)1. – pp. 111 – 120. – ISSN 1846-5900.

39. Пат. 95681 Российская Федерация, МПК7 В 01 С 19/42. Устройство для управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси / Р. Т. Емельянов, А. П. Прокопьев, А. С. Климов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009118046/22 ; заявл. 12.05.2009 ; опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19-10. – 2 с.

40. Пат. 95688 Российская Федерация, МПК7 В 01 С 19/42. Система автоматического управления рабочего органа асфальтоукладчика/ А. С. Климов, Р. Т. Емельянов, А. П. Прокопьев, С. С. Климов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010106464/22 ; заявл. 24.02.2010 ; опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19-10. – 2 с.

41. Пат. 97742 Российская Федерация, МПК7 В 01 С 19/42. Система автоматического управления положением выглаживающей плиты асфальтоукладчика / А. С. Климов, Р. Т. Емельянов, А. П. Прокопьев, С. С. Климов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010108004/03 ; заявл. 04.03.2010 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26-10. – 2 с.

Учебное издание

Емельянов Рюрик Тимофеевич

Жаданов Виктор Иванович

Инжутов Иван Семенович

Игнатъев Геннадий Васильевич

Прокопьев Андрей Петрович

**МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДОРОЖНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА**

Лицензия № ЛРО20716 от 02.11.1998

Формат 60*90 1/8 Бумага писчая.

Усл. печ. листов 10,0 Тираж 1000.Заказ 162

ИПК ГОУ ОГУ

460018, г. Оренбург, ГСП, пр. Победы, 13

Государственное образовательное учреждение

"Оренбургский государственный университет"

