

М.У.
№2640
03.15940

Полянский А.В. уч.
Мониторинг технологичес-
кого процесса возве[07]

ЕРСИТЕТ

ительством»



А.В. ПОЛЯНСКИЙ

**МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ВОЗВЕДЕНИЯ НАСЫПЕЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

Рекомендовано редакционно-издательским советом
университета в качестве методических указаний к
лабораторным занятиям и самостоятельной работе студентов
специальности 270204 «Строительство железных дорог, путь и
путевое хозяйство»

Москва – 2007

УДК 69:625.122

П 54

Полянский А.В. Мониторинг технологического процесса возведения насыпей земляного полотна: Методические указания к лабораторным занятиям и самостоятельной работе студентов по дисциплине «Технология, механизация и автоматизация железнодорожного строительства». – М.: МИИТ, 2007. – 56 с.

Методические указания предназначены для студентов Института путей, строительства и сооружений (специальность 270204 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство») и могут быть использованы при изучении дисциплины «Технология, механизация и автоматизация железнодорожного строительства», а также в дипломном и курсовом проектировании.

Табл. 4, рис. 11, библиогр. 23 назв.

© Московский государственный
университет путей сообщения
(МИИТ), 2007

1. МОНИТОРИНГ КАК ПРАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Понятие «мониторинг» представляет интерес с точки зрения его теоретического анализа, так как не имеет точного однозначного толкования, ибо изучается и используется в рамках различных сфер научно-практической деятельности. Он может рассматриваться и как способ исследования реальности, используемый в различных науках, и как способ управления различными видами деятельности посредством представления своевременной и качественной информации.

Наиболее общим образом мониторинг определяется как «постоянное наблюдение за каким-либо процессом с целью выявления его соответствия желаемому результату или первоначальным предположениям – наблюдение, оценка и прогноз состояния окружающей среды в связи с деятельностью человека».

Впервые мониторинг был использован в почвоведении, затем в экологии и других науках. В настоящее время в ряде сфер научно-практической деятельности мониторинг только осваивается, как на теоретическом, так и на практическом уровне. В некоторых сферах деятельности освоение мониторинга находится на завершающем этапе. Поэтому есть основания говорить, что осталось достаточно мало областей деятельности, где в той или иной мере не использовался бы мониторинг. Такое положение дел предоставляет достаточно уникальную возможность, исследовав теорию и практику освоения мониторинга в различных научных и практических областях, его современное состояние в системе строительного производства и определить пути повышения эффективности использования мониторинга для реализации поставленных целей.

Например, в экологии понятие мониторинг определяется как непрерывное слежение за состоянием окружающей среды с целью предупреждения нежелательных отклонений по важнейшим параметрам. В рамках социологии мониторинг рассматривается как средство обеспечения эффективного функционирования системы прогнозирования. А в области медицины предметом мониторинга является интегральное воздействие на человека окружающей природной среды. Осуществляется он с целью выявления и предупреждения критических ситуаций, опасных для здоровья человека. Строительный мониторинг подразумевает получение информации о статических и динамических характеристиках объектов нового строительства, реконструкции или переустройства, технологических процессов и средств строительного производства. Последующая обработка информации, полученной в результате мониторинга, позволяет разрабатывать варианты принятия проектных и управлеченческих решений. Именно такой подход отражен в работах посвященных системотехнике строительства [17],[18].

Существование большого количества различных систем мониторинга порождает необходимость их определенного упорядочивания. С этой целью можно классифицировать существующие системы мониторинга по нескольким основаниям (табл. 1.1).

Следует отметить, что для тех видов мониторинга, в процессе которых осуществляется прямое измерение или накопление информации, наиболее значительным является структурирование и хранение полученной информации, обеспечение свободного доступа к информационным ресурсам. А для тех видов мониторинга, в процессе которых осуществляется опосредованное измерение, в частности строительного мониторинга, наиболее важным является обеспечение высокого качества инструментария, разработка критериев оценивания, индикаторов и показателей, сам процесс измерения, статистическая обработка результатов и их адекватная интерпретация.

Таблица 1.1
Классификация систем мониторинга

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ		
экология	воздух, вода, лес, уровень моря, климатическая система, климат, температура, окружающая среда, сейсмичность, токсические газы, шум, излучение, почва и др.	
экономика	сельскохозяйственная продукция, цены, бизнес, налоги, оборудование, доходы, рынок труда, рынок продуктов питания, строительные товары и др.	
промышленность	коррозия металлов, каталитические процессы и др.	
компьютеры и средства связи	сети, радиокоммуникации, компьютерные системы, коротковолновые радиопередачи, надежность данных	
2. СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА		
радиолокационный	Данные определения отражают развитие мониторинга, степень и уровень инструментального оснащения	
авиационный		
космический		
дистанционный		
спутниковый		
инструментальный		
социологический		
статистический		
3. СПОСОБЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ		
I группа	непосредственное описание объекта мониторинга, без каких-либо измерений, используя технологии структуризации результатов, построение схемы и технологии сбора информации	мониторинг средств массовой информации, текущего законодательства
II группа	непосредственное физическое измерение параметров объекта	мониторинг шума, уровня моря, коррозии металлов, компьютерных сетей, рынка продуктов
III группа	измерение параметров объекта проводится с использованием системы хорошо разработанных и общепринятых критериев или индикаторов	мониторинг воздуха, доходов почвенно-химический мониторинг
IV группа	измерение проводится опосредованно, с привлечением технологий научного исследования, с использованием системы критериев и показателей	мониторинг санитарно-гигиенический, социально-экономической ситуации

Задачей мониторинга является предупреждение о том или ином неблагополучии, опасности, в широком понимании этого слова, для эффективного функционирования объекта или процесса. Причем не просто констатация факта появления изменений, представляющих опасность, а именно предупреждение о ней до того как ситуация может стать необратимой. Тем самым создается возможность предотвратить или минимизировать возможное деструктивное развитие событий.

2. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

На всех этапах сооружения железнодорожного земляного полотна осуществляется контроль качества технологического процесса, заключающийся в систематической проверке соответствия характеристик объекта строительства и технологии их возведения проектам, строительным нормам и правилам, инструкциям (табл. 2.1) [9],[20],[22].

Контроль качества процесса состоит из двух этапов:

- получение информации о фактическом состоянии технологического процесса (его количественных и качественных признаках);
- сопоставление полученной информации с заранее установленными технологическими требованиями.

Интенсификация технологий строительного производства требует применения технических средств наблюдения за ходом технологического процесса и контроля качества результата труда. Любое производство можно рассматривать в качестве совокупности процессов и состояний, из множества которых всегда можно выделить элементарный процесс, связывающий два текущих состояния: исходное (начальное) S_n и результирующее S_p (рис.2.1) [7],[8].

Таблица 2.1

**Контроль качества процесса возведения насыпи
железнодорожного земляного полотна**

По цели контроля	входной	Лабораторные испытания грунтов
	операционный	Динамические индикаторы, автоматические датчики
	приемочный	
По объему контролируемой продукции	сплошной	Контроль объема грунта доставляемого к месту отсыпки
	выборочный	
По характеру контроля	текущий	Динамические индикаторы, методы контроля качества грунта (метод проб, вибродинамический метод и др.)
	инспекционный	
По срокам проведения	плановый	
	внезапный	В условиях уплотнения насыпи
По принимаемым решениям	активный	Решение по доуплотнению грунта, на основании показаний динамических датчиков
	пассивный	Контроль параметров насыпи по окончании работ
По контролируемому параметру	по количественному признаку	
	по качественному признаку	Контроль качества основания, грунта, степени уплотнения
	по альтернативному признаку	Контроль геометрических характеристик
По способам контроля	визуальный	
	органолептический	
	инструментальный	Динамические индикаторы, плотномеры
По возможностям использования проконтролированной продукции	разрушающий	Контроль качества грунта, степени уплотнения
	неразрушающий	

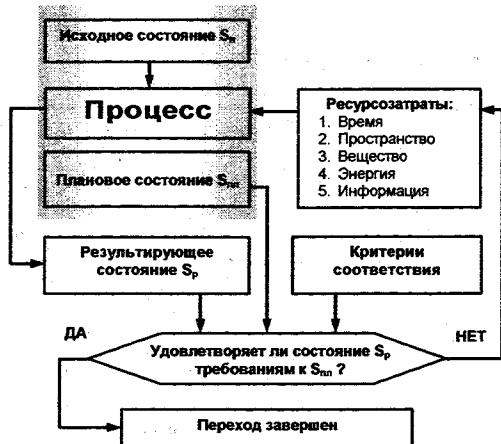


Рис.2.1. Информационная модель производственного процесса

равенства реального результирующего состояния плановому заданию, проекту и т. п. [7],[8]. При несоответствии фактических данных технологическим требованиям осуществляется управляющее воздействие на объект контроля (процесс) с целью устранения выявленного отклонения от технологических требований [3],[21].

Управление качеством необходимо осуществлять поэтапно в условиях отдельных операций, составляющих комплексный технологический процесс. Для этого необходимо произвести декомпозицию процесса, т.е. представить процесс в виде отдельных технологических операций (состояний).

На железной дороге актуальным является обеспечение безопасности движения путем обеспечения надежного функционирования транспортного объекта. Этого можно достигнуть в результате систематического и непрерывного контроля качества технологического процесса сооружения объекта, т.е.

Характеристики (параметры) исходного состояния считаются известными. Характеристики результирующего состояния задаются планом, проектом, заданием, нормами или иными документами. Целью процесса является выполнение условия: $S_p = S_{nn}$, то есть

строительного мониторинга (мониторинга технологического процесса).

Функциональное содержание мониторинга технологического процесса состоит из упорядоченного набора процедур, организованного в циклы [5], [13], [14], [16]: наблюдений (H_1), оценки состояний процесса по результатам наблюдений и математического моделирования развития процесса (O_1), прогноза динамики технологического процесса (Π_1) и выработки управлеченческих решений (Y_1). Далее наблюдения будут дополняться новыми данными, на новом цикле, и затем циклы повторяются на новом временном отрезке H_2, O_2, Π_2, Y_2 и т.д. На рис. 2.2 показана схема функционирования строительного мониторинга во временном аспекте. На этой схеме показаны циклы мониторинга, начинающиеся и заканчивающиеся в определенные временные интервалы (t_i) по спирали. Параллельно оси времени на функциональной схеме выделяются соответствующие функциональные цепи мониторинга, отражающие его содержательную часть: цепь последовательных наблюдений. В результате можно заключить, что мониторинг любого технологического процесса представляет собой сложно-построенную, циклически функционирующую и развивающуюся во времени постоянно действующую систему.

Строительный мониторинг является информационной основой для процедуры управления технологическим процессом и может осуществляться по целевой программе, состоящей из:

- наблюдений и измерения параметров процесса;
- оценки по результатам визуальных наблюдений и измерений параметров состояния процесса;
- прогноза развития состояния системы на стадии проектирования и динамики технологического процесса;

- разработки сценариев по управлению процессом, заключающихся в рекомендациях с последующим изменением технологических режимов функционирования.

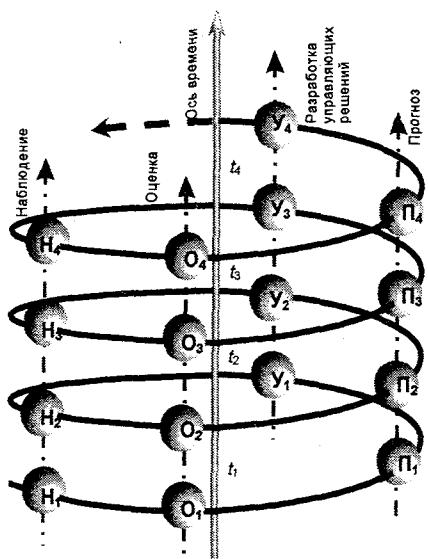


Рис. 2.2. Схема функционирования мониторинга технологического процесса возведения насыпи железнодорожного земляного полотна H_i – наблюдения; O_i – оценка наблюдений; Π_i – прогноз развития процесса; Y_i – разработка управляемых решений, t_i – временные интервалы

Для того чтобы реализовать сценарии управления процессом на основе данных строительного мониторинга следует использовать возможности математического моделирования производственных процессов.

Для количественной оценки динамики процесса целесообразно воспользоваться понятием отказа из теории надежности, так как надежность является важнейшей технической характеристикой качества. Вероятностные методы определения показателей надежности позволяют

вполне определенно и достаточно хорошо оценивать надежность технологических процессов.

Сложность получения количественной оценки надежности исследуемого технологического процесса состоит в том, что это свойство процесса обычно направлено в его будущее состояние, т.е. оно «развернуто во времени», а именно его про-

текание разнообразно и малопредсказуемо. Иначе говоря, характеристики надежности носят по отношению к технологическому процессу вероятностный, прогнозный характер [21].

Далее вышеуказанный подход будет проиллюстрирован на процессе уплотнения грунта в железнодорожной насыпи.

После завершения отсыпки без уплотнения очередного слоя его изначальная стоимость будет невысока. Впоследствии, уже при эксплуатации дороги, неуплотненный слой даст осадку, для компенсации которой потребуются существенные затраты ресурсов, связанные с балластировкой и подъемкой пути. Практика строительства и эксплуатации земляного полотна однозначно показала, что минимизация этой величины достигается за счет качественного уплотнения тела насыпи в процессе ее сооружения, так как затраты связанные с балластировкой и подъемкой пути много больше затрат на искусственное уплотнение. Для реализации качественного уплотнения насыпей необходим комплекс мер направленных на повышение их функциональной и конструктивной надежности за счет минимизации вероятности отказов в состояниях (последовательных операциях) рассматриваемого процесса. Под комплексом мер, в данном случае, подразумевается возможность влиять на ряд управляемых параметров, таких как толщина отсыпаемого слоя, количество проходов грунтоуплотнителя, способ уплотнения, качество уплотнения слоя, соответствие отсыпаемого грунта проектным требованиям. Однако разработка рациональных управляющих решений с позиции ресурсного подхода требует максимума информации о ходе производства работ. Получение такой информации возможно в случае организации мониторинга процесса возведения насыпи, суть которого будет заключаться в предварительном обследова-

нии грунтов, непрерывном контроле качества грунта в ходе его отсыпки, а также текущей проверки качества уплотнения.

Следует заметить, что мониторинг процесса возведения насыпи в том виде, в котором представлен выше, не может считаться полностью удовлетворяющим требованиям экономической, технологической и конструкционной эффективности. Это связано с тем, что снижение отказов в ходе работ возможно, только после анализа результатов длительных наблюдений. Реализация полноценного строительного мониторинга предполагает еще на стадии разработки проекта производства работ (ППР) предусматривать возможные отказы в процессе строительства. Для этого требуется проведение анализа и обобщения результатов опытного строительства, путем прогнозирования интенсивностей отказов технологического процесса с последующим определением динамики его развития.

Поскольку функционирование строительной (организационно-технологической) системы в условиях природной среды имеет стохастический характер, управление решения в изменяющихся ситуациях следует принимать с использованием вероятностных принципов, прогнозного моделирования на ЭВМ. А так как принятие управляемого решения связано с выбором оптимального из множества, то для этого целесообразно воспользоваться имитационным моделированием, которое позволяет организовать технологический процесс при оптимальном распределении ресурсов с сохранением качества.

Принципиально важным является то, что комплексность и многогранность задачи требует формирования единого информационного поля на стыке техники, технологии, организации, математики, кибернетики, информатики, то есть описания производственных процессов и этапов системными многоуровневыми взаимопроникающими и взаимодополняющими информационными

моделями. Многоуровневые модели по сути своей организации и структуры могут служить основой для решения задач классификации, экспертизы, прогнозирования, а также другим целям на всех стадиях инвестирования железнодорожного строительства. Их применение в сочетании с математическими методами анализа позволяет не только качественно и количественно оценивать организационно-технологические параметры производства, но и осуществлять прогнозирование с высокой степенью достоверности и надежности.

На рис. 2.3 представлена укрупненная модель подобного информационно-технологического комплекса [10],[11],[13].

3. МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА В НАСЫПИ

Практика строительства имеет немало примеров дефектов земляных сооружений, причиной которых является неудовлетворительное качество уплотнения. Наблюдения, в ходе которых устанавливаются признаки недостаточности уплотнения, проводятся путем определения показателя степени уплотнения.

В то же время возведение насыпей сопровождается надзором за ходом процесса и его результатами с целью уточнения технологии применительно к местным погодно-климатическим, инженерно-геологическим и производственным условиям. Также предполагается выявление несоответствий требованиям правил, норм и технических условий с последующим изучением причин появления нарушений, своевременному устранению этих причин и их последствий, а также исключению их появления на других участках строительства.

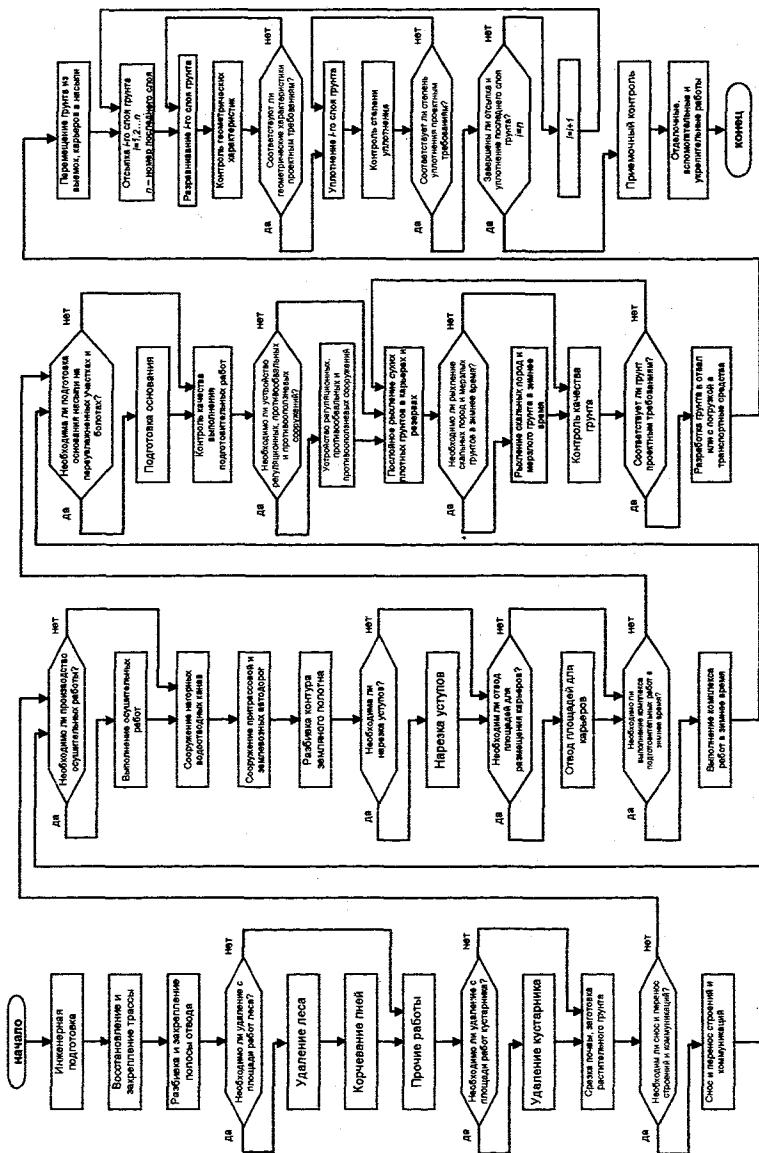


Рис. 2.3. Системная модель мониторинга технологического процесса возведения насыпи земляного полотна

Эффективность существующей системы надзора ограничена тем, что она построена на лабораторном контроле. Будучи в целом полезной, существующая система имеет существенный недостаток – недостаточную оперативность, затрудняющую использование обратной связи для корректировок допущенных отклонений. Поэтому необходима система, позволяющая вести одновременный комплексный экспресс-контроль упомянутых параметров на основе логически обоснованной последовательности операций, приводящей к достижению заданного качества земляного полотна. При таком подходе неизбежно выявляются слабые или отсутствующие звенья технологического контроля и открываются пути технической реализации этих звеньев.

Реализация системы оперативного надзора и непрерывного контроля качества процесса послойного уплотнения грунта (в рамках строительного мониторинга) требует определения критериев, по которым будут осуществляться наблюдения. Нормы и технические условия предъявляют к процессу отсыпки и уплотнения грунта в насыпи ряд требований по различным параметрам. Всю совокупность ограничений можно сгруппировать по следующим основным показателям (рис. 3.1) [7],[10],[15]:

1. ограничения по плотности (минимальной);
2. ограничения по зерновому (гранулометрическому) составу песков;
3. ограничения по влажности песков и консистенции глинистых грунтов;
4. ограничения по геометрическим характеристикам возможной насыпи.

Наиболее труднопреодолимыми являются второе и третье ограничения, потому что в ходе изысканий и проектирования земляного полотна проектировщики, как правило, не имеют

широких возможностей выбора источников грунта для насыпи. Вид грунта диктуется местными условиями. От вида грунта, и в частности, от его зернового состава и влажности зависят геометрические характеристики откосов будущей насыпи и технология ее сооружения.

Измерять в процессе производства земляных работ значения всех факторов, а тем более – пытаться управлять ими – задача трудноразрешимая. Целесообразнее выделить основные ограничения и рассмотреть их логические взаимосвязи.

Преобразующие процессы и процессы контроля представлены на рис. 3.1 в виде звеньев, объединенных в логические цепочки [7],[10],[11]:

- «ограничения по плотности» – «искусственное уплотнение» – «контроль степени уплотнения»;
- «ограничения по влажности» – «мероприятия по доувлажнению или подсушиванию» – «контроль влажности» и т.д.

В качестве первого звена каждой цепочки выступает ограничение.

Вторым звеном является технологический процесс, в ходе которого это ограничение реализуется. Процесс непременно связан с затратами ресурсов: времени, информации, труда, материалов и т. д. Следующее звено – это контроль, заключающийся в прямом или косвенном измерении параметров качества процесса. В случае несоответствия качества заданному уровню, ход процесса корректируются в нужном направлении при помощи обратных связей.

В качестве последнего этапа выступает приемочный контроль. Его ведут по критериям плотности грунта и геометрии насыпи. Чтобы эти критерии удовлетворить, необходимо в ходе работ выполнить не только все требования к плотности и геометрическим параметрам, но и требования норм в части зернового состава, влажности, геодезической разбивки сооружения в целом, а

это, в свою очередь, связано с возможностями машин и порядком их работы.

Практическое применение алгоритма, представленного на рис. 3.1, требует конкретизации и детализации всех его элементов. Это связано, в первую очередь, с отсутствием единых технических и технологических решений, обеспечивающих выполнение действующих нормативных требований. Дело в том, что реальные параметры грунта: его влажность, плотность, удобоукладываемость не остаются и не могут оставаться постоянными. Неизбежны отклонения от расчетных значений таких величин, как температура воздуха и грунта. Реальная толщина слоя в разных его сечениях может значительно отличаться от расчетной, скорость грунтоуплотнителей не зависит от толщины слоя, а число проходов по одному сечению трудно поддается регистрации [8],[11],[13].

В основу детализации кладутся требования проекта и строительных норм, регламентирующие параметры несkalьных грунтов (рис. 3.2). Принятая последовательность важна, потому что последовательность операций оптимизации влажности, для разных категорий грунта различна. Пройдя соответствующий путь отбраковки, любой грунт будет либо забракован, либо признан пригодным. В последнем случае можно назначить мероприятия по доведению влажности до оптимального значения. Конечной целью является получение удобоукладываемого грунта соответствующей кондиции и оптимальной влажности. Высокую степень детализации рис. 3.2 можно объяснить достаточно высоким качеством норм в области требований к влажности грунта и наличием соответствующего лабораторного оборудования [6],[16].

Следующим этапом работы является послойная укладка грунта в тело насыпи с искусственным механизированным уплотнением до нормативных значений. При этом в процессе укладки и уплотнения должны быть выполнены требования, касающиеся геометрических характеристик возводимой насыпи, и в первую очередь, обеспечения проектной крутизны откоса и положения бровки. Логическая последовательность этих действий представлена на рис. 3.3. Здесь отражена расшифровка системы послойной разбивки, предназначенная для обеспечения «положения бровки очередного слоя» и для «контроля положения бровки» в процессе планировочных работ, а также звено «контроль возможностей грунтоуплотнителей», детализирующее и конкретизирующее звено «контроль степени уплотнения».

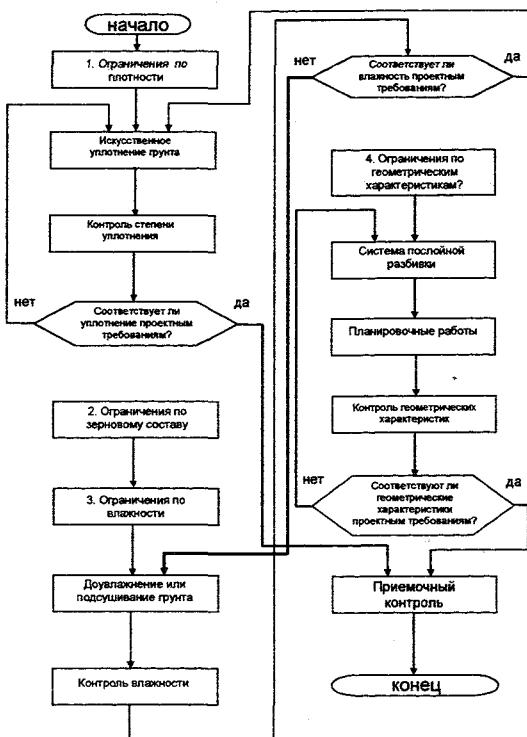
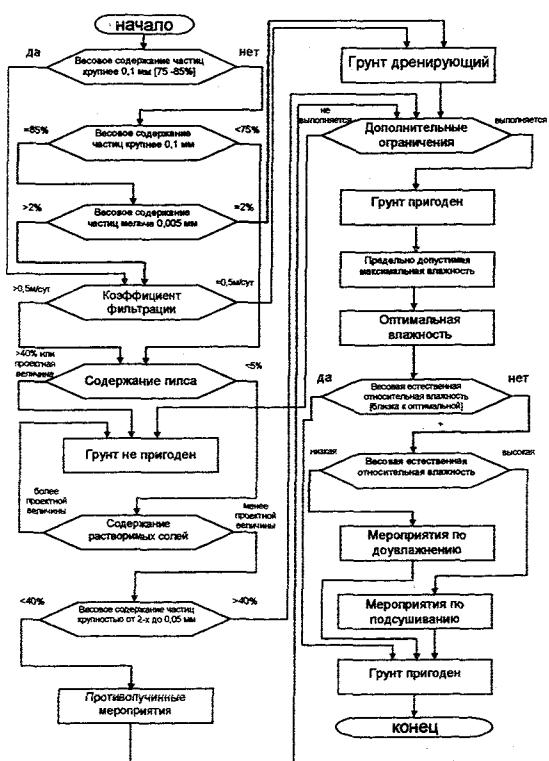


Рис. 3.1. Логические взаимосвязи работ и ограничений при возведении дорожной насыпи

Следующим этапом осуществления мониторинга процесса послойного формирования тела насыпи является оценка ре-

са геометрических характеристик возводимой насыпи, и в первую очередь, обеспечения проектной крутизны откоса и положения бровки. Логическая последовательность этих действий представлена на рис. 3.3. Здесь отражена расшифровка системы послойной разбивки, предназначенная для обеспечения «положения бровки очередного слоя» и для «контроля положения бровки» в процессе планировочных работ, а также звено «контроль возможностей грунтоуплотнителей», детализирующее и конкретизирующее звено «контроль степени уплотнения».

зультатов наблюдения. Для того чтобы оценить полученные данные необходимо располагать заранее определенными критериями, в данном случае критериями качества.



Для оценки качества грунта и процесса его отсыпки в насыпь можно использовать различные методы и приборы экспресс-контроля. Критериями качества, в этом случае, являются технологические параметры грунта, влияющие на выбор способа уплотнения, толщину отсыпаемого слоя и тип грунтоуплотнителя. Таковыми для несkalьных грунтов являются: для

Рис. 3.2. Последовательность операций контроля качества грунта

песков - модуль крупности и степень неоднородности (как величины, характеризующие гранулометрический состав), оптимальная влажность, максимальная плотность при стандартном уплотнении, коэффициент фильтрации; для глин – число пластичности и показатель текучести. Также в процессе отсыпки

грунта необходимо контролировать температура воздуха и влажность. В дальнейшем перечисленные критерии позволят установить значения интенсивностей потоков отказов отдельных технологических операций в рассматриваемом процессе.

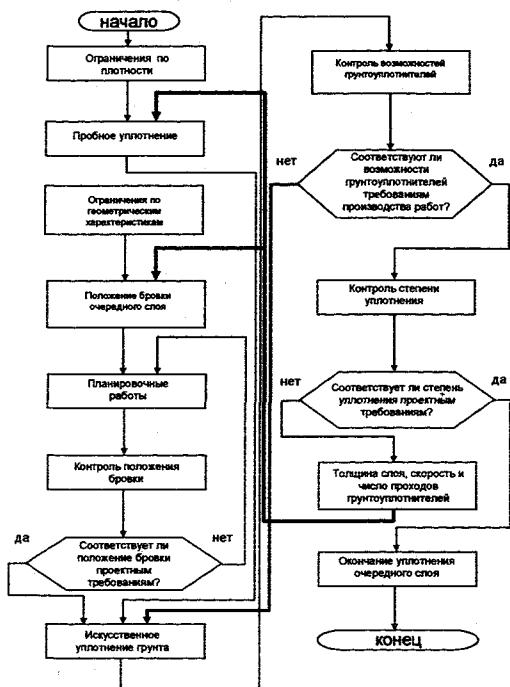


Рис. 3.3. Последовательность операций контроля качества послойной отсыпки грунта

обнаружения неудовлетворительного качества уплотнения, исправить брак будет невозможно. Кроме того, при неудовлетворительном результате, свидетельствующем о недостаточности уплотнения, останется невыясненным, что именно явилось причиной брака: недостаточное число проходов грунтоуплотнителя или, например, завышенная толщина слоев грунта. Не-

Для оценки качества уплотнения существуют методы отбора проб в нескольких точках (метод режущих колец, метод лунок и др.) с целью определения качественной характеристики: плотности грунта в уплотненном слое. Однако от момента взятия пробы до получения результата проходит не менее суток. За это время слой, из которого брали пробу, окажется под другими слоями грунта, и в случае

ясно также, были ли в каждом конкретном случае полностью использованы уплотняющие возможности машин.

Для оперативной оценки качества уплотнения отсыпанного грунта применяются приборы экспресс-контроля, такие как: плотномеры, пенетрометры, зонды. Особенностью данных приборов является то, что они показывают не плотность грунта в месте измерения, а степень уплотнения, поэтому они лишь опосредованно отражают качественную характеристику и только на ограниченной площади.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в части контроля качества уплотнения является создание электронных технических средств, позволяющих оценивать качество процесса уплотнения грунта в процессе работ. К ним относятся многочисленные индикаторы степени уплотнения грунта. Этими индикаторами оснащают различные грунтоуплотняющие машины, для того, чтобы непосредственно в ходе работ судить о степени уплотнения очередного слоя. Очевидно, что данные индикаторы степени уплотнения грунта позволяют с высокой степенью уверенности оценить качество производства работ. Однако достижение заданной проектом степени уплотнения нередко требует дополнительных ресурсозатрат, связанных с возможными отказами технологических операций. Наиболее существенным отклонением в таких случаях является изменение свойств грунта (несоответствие проектным требованиям), вследствие воздействия на его состояние погодно-климатических условий, что приводит к изменению его влажности. В результате это негативно скажется на геометрических характеристиках насыпи, и как следствие на ее безопасной эксплуатации [1]. Достоинством индикаторов степени уплотнения является их способность влиять на технологические режимы грунтоуплотнителя.



Рис. 3.4. Информационное взаимодействие элементов системы автоматического управления процессом виброуплотнения

степени уплотнения несkalьного грунта (супеси) от числа проходов виброкатка. Иначе эту кривую называют кривой формирования качества, или – кривой качества (рис. 3.5) [7],[8].

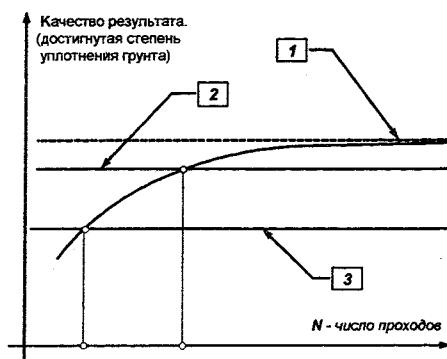
Характер кривой показывает, что дополнительные затраты энергии, труда и других ресурсов приводят к улучшению качества уплотнения не всегда, а лишь до тех пор, пока уплотняющие возможности машины не исчерпаны. Стабилизация показаний индикатора при неподвижной машине говорит о том, что ее уплотняющие возможности исчерпаны.

Итак, если достигнутая предельная степень уплотнения, измеренная с использованием индикатора степени уплотнения, не отвечает требованиям проекта, необходимо менять технологические режимы грунтоуплотнителя или параметры технологического процесса: увеличивать число проходов по сечению слоя, снижать скорость движения грунтоуплотняющей машины, уменьшать тол-

Информационное взаимодействие элементов системы автоматического управления процессом уплотнения грунта с использованием устройств контроля степени уплотнения (на примере виброуплотнения) показано на рис. 3.4 [7],[8].

Результат такого взаимодействия можно представить в виде кривой зависимости

щину слоя, попытаться изменить влажность грунта или применить другой грунтоуплотнитель.



Обозначения:

- N – число проходов катка по сечению слоя грунта,
- К - уровень качества (достигнутая степень уплотнения грунта):
 - 1 - идеальное качество, которого теоретически можно добиться в условиях данной технологии;
 - 2 - маркетинговый (потребительский) уровень качества,
 - 3 - нижний порог качества.

Рис. 3.5. Кривая качества уплотнения грунта

К сожалению, рассмотренная система контроля качества процесса послойного уплотнения грунта останется пассивной, если в ней будет фиксироваться только существующее состояние и не будет функции прогноза. Причем прогноз предусматривает ресурсные потоки и затраты с целью их оптимального распределения.

Так как технологические процессы действуют, подчиняясь общим закономерностям поведения управляемых систем, то для их описания можно адаптировать современные научные теории. Далее предлагается методика прогнозирования динамики технологического процесса с применением современных информационных технологий. Методика позволяет смоделировать и формализовать технологический процесс, представленный в виде графа переходов и состояний, определить объективный характер случайных процессов на технологическом уровне и подобрать необходимые характеристики элементов системы для прогнозирования и авторегулирования. При этом модели сводятся к совокупностям алгебраических структур (системе дифференциальных уравнений), позво-

стует, подчиняясь общим закономерностям поведения управляемых систем, то для их описания можно адаптировать современные научные теории. Далее предлагается методика прогнозирования динамики технологического процесса с применением современных информационных технологий. Методика позволяет смоделировать и формализовать технологический процесс, представленный в виде графа переходов и состояний, определить объективный характер случайных процессов на технологическом уровне и подобрать необходимые характеристики элементов системы для прогнозирования и авторегулирования. При этом модели сводятся к совокупностям алгебраических структур (системе дифференциальных уравнений), позво-

ляющих описать динамику технологического процесса, условия производства, интенсивность возможных воздействий на предмет труда и достигаемый результат, а также ввести логические связи, выполняющие роль сравнительных оценок и определяющие ветвление вычислительного процесса и возвратные циклы.

Особенно важно установить условия возникновения состояний, присущих модели в целом, которые нельзя вывести из свойств составляющих ее элементов. В таких случаях модель отражает сущность процесса, а имитация действий определенно приводит к единственной и наиболее простой траектории достижения предпочтительного результата, к оптимизации модели в самом полном смысле.

Синтез моделей (по уровню сложности, по результатам разных исходных данных) подразумевает их совмещение в общем комплексе технологического процесса отсыпки и уплотнения насыпей и упорядочение, которое основывается на объективном существовании выгодной модели развития процесса.

Предлагаемая методика прогнозирования динамики процесса отсыпки и уплотнения грунта в насыпи состоит из нескольких этапов:

- этап формирования банка данных параметров грунта;
- этап выбора способа послойного уплотнения грунта;
- этап декомпозиции технологического процесса;
- этап определения признаков нарушающих качество технологического процесса;
- вычислительный этап;

Рассмотрим схему прогнозирования развития технологического процесса [13].

Этап формирования банка данных параметров грунта.

Первый этап предусматривает накопление технологических параметров грунта, полученных в результате многочисленных испытаний, с привязкой к месту разработки (карьера). Результаты проведенных испытаний заносятся в банк данных.

Этап выбора способа послойного уплотнения грунта. Для определения наиболее выгодного способа уплотнения для образцов грунта необходимо воспользоваться эмпирическими формулами. Исходными данными в этом случае будут являться значения технологических параметров грунта, полученные в результате лабораторных испытаний. В результате прогнозирование наиболее выгодного способа уплотнения при минимальных интенсивностях отказов технологического процесса позволит:

- выбрать вид грунта в соответствии с проектом и привязать участок строительства к одному или нескольким карьерам для транспортировки грунта;
- определить способ отсыпки и уплотнения грунта;
- выбрать тип грунтоуплотнителя.

На основании выбранного способа послойного уплотнения грунта назначается фронт работ в соответствии с графиком производства работ. Далее поперечное сечение насыпи разбивается на слои. Для дальнейшего расчета выделяется конструкция из слоя i и слоя $i+1$. Слой i представляет собой нижележащий слой грунта (вначале расчета основание дорожной насыпи), а слой $i+1$ является очередным слоем, который отсыпается и уплотняется. Важно отметить, что если в слое i допущен брак, то возврата технологий для его устранения после некоторого промежутка времени не предусматривается. Учитывая, что поперечное сечение насыпи земляного полотна представляется собой несколько слоев необходимо организовать цикл, кото-

рый функционирует до тех пор, пока не будет рассмотрен последний слой насыпи.

Этап декомпозиции технологического процесса. Технологический процесс разбивается на ряд непересекающихся операций таким образом, чтобы каждая представляла собой относительно автономную часть процесса, а также была обозрима для дальнейшего исследования и имела единую «специализацию» задач. По результатам декомпозиции технологического процесса отсыпки и уплотнения грунта необходимо определить признаки, нарушающие качество производимых работ.

Этап определения признаков, нарушающих качество технологического процесса. На данном этапе устанавливаются признаки, характеризующие качество процесса отсыпки и уплотнения грунта, с последующим определением значений минимальных интенсивностей отказов. Под минимальными интенсивностями отказов подразумевается значение, отражающее разницу между временем необходимым для достижения заданной степени уплотнения и временем, при котором заданная степень уплотнения была достигнута.

Вычислительный этап. На основе данных полученных в результате статистических испытаний определяются минимальные интенсивности отказов технологического процесса на заданном фронте работ. Следует отметить, что в соответствии с теорией надежности значение интенсивности отказов технологии обратно пропорционально значению наработки на отказ данной технологии на заданном фронте работ. Таким образом, в случае определения предполагаемой наработки на отказ каждой из технологий (в результате испытаний) можно также определить значение интенсивности отказов технологий.

Далее формируются простая и сложная модели. В последней рассматривается возникновение отказов отдельных

технологий и их сочетаний. На основе моделей формируются ориентированные графы состояний и переходов технологического процесса.

В дальнейшем графы описываются системой дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова¹. После этого указывается нормировочное условие в соответствии с количеством вершин графа, устанавливаются начальные условия значений вероятностей пребывания процесса в начальный момент времени и задается временной промежуток для проведения расчета. Далее в соответствии с исходными данными выполняется расчет и построение графиков вероятностей пребывания процесса в том или ином состоянии в системе *Mathcad* на заданном интервале времени. Расчет производится с применением метода Рунге-Кутта.

Необходимо отметить, что предлагаемая методика прогнозирования динамики технологического процесса предполагает прогноз как на этапе проектирования производства работ (первичный прогноз), так и в процессе мониторинга технологического процесса возведения насыпи. В первом случае формируется, в некотором смысле, «идеализированная картина» развития процесса, основанная на математическом моделировании с элементами вероятностного подхода. Это, в свою очередь, позволяет запланировать необходимое количество ресурсов для производства работ с целью достижения результата, соответствующего проектным требованиям. Однако различные помехи и возмущения (природные, технические, технологические и др.) непосредственно в ходе работ будут вносить корректировки в процесс послойного уплотнения и, как следствие,

¹ Колмогоров Андрей Николаевич (1903-1987), математик, академик АН СССР, разработал универсальный метод анализа марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем

будут «искажать картину» его развития. Следует отметить, что возникающие помехи и возмущения происходят достаточно часто и разница во времени между их возникновением очень мала. В этом случае возникает необходимость в оперативной корректировке прогноза с учетом новых исходных данных. Это значит, что следует вновь произвести расчет в соответствии с новыми условиями. Автоматизация расчетов с применением ЭВМ в системе *Mathcad*, положенная в основу методики, способствует оперативному контролю процесса в различные моменты времени и на разных временных интервалах. Такой подход позволяет, во-первых, разрабатывать оперативные управляющие решения с целью управления технологическим процессом и, во-вторых, позволяет влиять на ресурсопотоки в ходе производства работ с целью оптимизации ресурсозатрат.

4. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОСЛОЙНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

Как уже отмечалось, целью рассматриваемого технологического процесса является получение доброкачественного результата, с учетом: оптимального расхода ресурсов, трудоемкости, стоимости.

Управление процессом послойного уплотнения грунта в насыпях предусматривает оценку качества процесса, управление качеством, его улучшение и обеспечение безопасности на основе данных получаемых в результате мониторинга. При этом обеспечение уровня качества заключается в осуществлении технологических, организационно-экономических, а также социальных мероприятий. В итоге необходимо принятие соответствующих мер и решений, позволяющих оценивать как процесс возведения, так и его результат [11,13,15].

При принятии управленческих решений о функционировании и развитии технологического процесса послойного уплотнения насыпи необходимо учитывать важную характеристику внешней среды – неопределенность. Под *неопределенностью* следует понимать отсутствие, неполноту, недостаточность информации об объекте, процессе, явлении или неуверенность в достоверности информации. К основным источникам возникновения неопределенности в процессе производства работ по послойному уплотнению грунта в насыпи, помимо отмеченных в п. 3, можно отнести следующие:

- 1) существенную зависимость технологических (строительных) процессов от погодных условий. Например, погодные условия могут вызвать непредвиденные последствия в перевозках строительных материалов и их последующем монтаже;
- 2) наличие, кроме организации, осуществляющей монтажные работы, других участников строительства – поставщиков материалов, потребителей материалов, и др.; результат их влияния на технологические процессы носит неопределенный и неоднозначный характер;
- 3) наличие в работе строительной техники элементов вероятности и случайности (надежность оборудования строительной техники, неравномерность спроса на материалы во времени и др.);
- 4) недостаточность, неполнота информации о строящемся объекте, процессе, явлении, по отношению к которому принимается решение, ограниченность в сборе и обработке информации, постоянная ее изменчивость;
- 7) относительная ограниченность сознательной деятельности лица, принимающего решение, существующие различия в социально-психологических установках, идеалах, намерениях, оценках, стереотипах поведения.

Неопределенность обуславливает появление ситуаций, не имеющих однозначного исхода (решения).

Основными подходами принятия решений в условиях неопределенности являются [23]:

- *1-й принцип:* принцип максимального правдоподобия.

В соответствии с этим принципом выбирается такое состояние «природы», которое наиболее вероятно, т.е. из вектора P_j выбирается максимальная компонента и считается, что «природа» будет находиться в этом состоянии.

- *2-й принцип:* принцип Байеса. Суть принципа состоит в том,

что оперирующая сторона рассчитывает на минимум средних затрат. В этом случае при применении стратегии x_i средние затраты составят

$$\bar{F}(x_i) = \sum_j F(x_i, S_j) P_j ,$$

где S_i – состояние технологического процесса;

x_i – затраты на «восстановление» процесса (приведение к плановому состоянию);

P_j – вероятность нахождения процесса в состоянии S_i .

- *3-й принцип:* если неприемлемы по тем или иным

причинам предыдущие подходы, например «природа» может находиться в равновероятных состояниях, то можно применить гарантированную оценку. В этом случае считается, что «природа» будет реализовывать такой вектор P_j , чтобы принести возможно больший вред, максимизировав функцию потерь, т.е. «природа» рассматривается как противник, реализующий наиболее выгодную для себя стратегию. Рассмотрим поведение оперирующей стороны с точки зрения противника. Если будет реализована стратегия x_1 , то противник должен применить стратегию, максимизирующую затраты (усреднение снизу):

$$F(x_i) = \max F(x_i, S_j).$$

В итоге, может получиться так, что при различных принципах принятия решений оптимальные из них могут быть различны, и результат зависит от психологии лица, принимающего решение. Первый подход отражает оптимистическую точку зрения на развитие событий, ей соответствуют минимальные затраты, которые могут быть существенны превышены при неблагоприятном стечении обстоятельств. Третий подход характерен для осторожного человека, он гарантирует, что затраты не превысят расчетного значения в самом неблагоприятном случае, однако в реальности могут оказаться существенно меньше. Наконец, второй подход занимает среднее положение и рассчитан на средний результат при проведении большого количества подобных операций.

Определение наиболее предпочтительного управленческого решения позволит в дальнейшем выявить потенциально ненадежные, с точки зрения качества, операции в рассматриваемом технологическом процессе. Целью воздействия на ход технологического процесса, в данном случае, является оптимальное распределение ресурсов, способствующих достижению доброкачественного результата труда.

5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

5.1. Цель работы

В результате оценки результатов наблюдений за динамикой технологического процесса послойного уплотнения грунта в насыпи были установлены интенсивности отказов определенных операций рассматриваемого процесса. На основе получен-

ных значений интенсивностей отказов спрогнозировано развитие процесса на интервале 60 мин (1 час). Используя результаты мониторинга и расчета графо-аналитической модели процесса послойного уплотнения насыпи в различных технических и технологических условиях, предложить оптимальную стратегию управления ходом работ.

5.2. Методика расчета

5.2.1. Основные понятия марковских процессов

Из теории случайных процессов известно, что функция $X(t)$ называется **случайной**, если ее значение при любом аргументе t является случайной величиной. Случайная функция $X(t)$, аргументом которой является время, называется **случайным процессом**.

Для математического описания многих операций, развивающихся в форме случайного процесса, может быть с успехом применён математический аппарат, разработанный в теории случайных процессов для **марковских случайных процессов**².

Одним из распространенных видов случайных процессов и последовательностей, широко используемых в практике анализа динамики вероятностных свойств различных объектов, служит простейший поток событий, основанный на **марковских процессах с дискретными состояниями и непрерывным временем** [2], [23].

Следует отметить, что случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем называется **марковским**, если для любого момента времени t условные вероятно-

² Марков Андрей Андреевич (1856-1922), математик, академик РАН, еще в начале XX века первым стал исследовать особую разновидность случайных процессов, получившую название «марковских случайных процессов»

сти всех состояний рассматриваемой системы в будущем зависят только от того, в каком состоянии находится система в настоящем (при $t=t_0$), но не зависит от того, когда и каким образом она пришла в это состояние.

Переход может осуществляться в любой момент. Например, выход из строя (отказ) технологической операции может произойти в любой момент времени;

Окончание ремонта (восстановления) этого элемента также может произойти в заранее не зафиксированный момент и т.д.

Потоком событий называется последовательность однородных событий, появляющихся в случайные моменты времени. «Поток событий» представляет собой в общем случае просто последовательность случайных точек $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n, \dots$ на оси времени $0t$ (рис. 5.1) с разделяющими их случайными интервалами $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n, \dots$, так что

$$T_1 = \Theta_2 - \Theta_1, T_2 = \Theta_3 - \Theta_2, \dots, T_n = \Theta_{n+1} - \Theta_n.$$

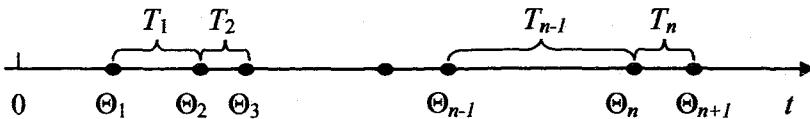


Рис. 5.1. Последовательность однородных событий во времени

На основе закона Пуассона процессы этого типа характеризуются свойствами ординарности, отсутствия последействия и стационарности.

1. *Ординарность.* Поток событий является ординарным, если вероятность появления двух и более событий на малом промежутке времени Δt пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления только одного события. Иными словами, появление двух или более событий одновременно – прак-

тически невозможное событие. Важной характеристикой однородности потока является интенсивность потока.

2. *Отсутствие последействия.* Поток событий является потоком без последействия, если вероятность $P_{\Delta t}(k)$ появления k событий в течение произвольного промежутка времени Δt не зависит от того, появлялись или нет события в моменты времени, предшествующие началу рассматриваемого промежутка времени. Это означает, что количества появления событий на непересекающихся промежутках времени представляют независимые события.

3. *Стационарность.* Поток событий называется стационарным, если все его вероятностные характеристики не меняются со временем. Таким образом, сущность стационарности потока событий заключается в том, что вероятность появления k событий в течение произвольного промежутка времени Δt зависит только от k и Δt и не зависит от момента начала отсчета этого промежутка времени. Другими словами, указанная вероятность $P_{\Delta t}(k)$ не зависит от места расположения промежутка Δt на оси времени. Таким образом, фиксируется однородность вероятностных свойств потока событий на оси времени. В частности для стационарного потока событий его интенсивность $\lambda(t)$ постоянна $\lambda(t)=\lambda=const$.

Простейшим этот поток является в связи с тем, что исследование систем, находящихся под воздействием простейших потоков, проводится самым простым образом.

Таким образом, вероятность перехода системы из одного состояния, в котором она находилась в момент t , в другое состояние за элементарный промежуток времени Δt , непосредственно примыкающий к t , приближенно равна $\lambda_{ij}(t)\Delta t$, где $\lambda_{ij}(t)$ – интенсивность пуассоновского потока событий, переводящего систему из одного состояния в другое.

Рассматривая технологический процесс отсыпки и уплотнения грунта в насыпи как объект моделирования, примем следующее [15], [17]:

- под моделью понимается совокупность состояний и элементов технологического процесса, а под системой – технологический процесс как множество элементов (состояния, интенсивности отказов и восстановлений), находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующие целостную и единую структуру;
- технологический процесс (система) рассматривается как марковский процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем, т.е. переходы в системе из состояния в состояние могут происходить не в фиксированные моменты времени, а в случайные моменты;
- процесс обладает свойствами ординарности, отсутствия последействия и стационарности.

Далее по результатам моделирования необходимо будет принять решение относительно дальнейшего развития рассматриваемого технологического процесса. Для этого можно воспользоваться основными подходами принятия решений в условиях неопределенности. При этом необходимо будет воспользоваться данными, полученными при вероятностно-статистическом анализе (то есть результатах решении уравнений Колмогорова) процесса.

Решение может быть принято в целом ко всему технологическому процессу отсыпки и уплотнения грунта:

- x_1 – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени использования грунтоуплотняющей машины с целью достижения проектной величины,

- x_2 – ликвидация отклонений в технологическом процессе путем замены менее производительной грунтоуплотняющей машины на более производительную,
- x_3 – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени использования и замены грунтоуплотняющей машины на более производительную,
- x_4 – ликвидация отклонений в технологическом процессе с применением всех основных ресурсов строительной организации,
- x_5 – ликвидация отклонений в технологическом процессе с применением основных и привлечением дополнительных ресурсов строительной организации.

Для решения задачи управления процессом возможны три различных подхода, рассмотренные в п. 4.

1. *Принцип максимального правдоподобия.*
2. *Принцип Байеса.*
3. *Принцип определения гарантированной оценки, в случае если неприемлемы два предыдущих принципа.*

В результате на основании проведенного анализа необходимо принять окончательное решение относительно дальнейшего развития процесса послойного уплотнения грунта.

5.2.2. Постановка задачи

Строительное производство как вероятностная система характеризуется определенной степенью надежности. В ее функционировании участвуют технические средства, материальные элементы и трудовые ресурсы. Под надежностью технологического процесса подразумевается вероятность того, что он в течение своего функционирования сохранит работоспо-

собность. Одной из характеристик надежности является понятие отказа. В общей теории надежности отказ трактуется как утрата объектом необходимого качества [4], [13], [19].

Причинами возникновения отказов в процессе функционирования технологических процессов могут быть:

- отказы технических средств (поломки машин и механизмов);
- выход из строя объектов инженерного обеспечения (энергосетей, водоснабжения);
- нарушение норм эксплуатации технических средств;
- нарушение длительности технологических процессов и операций;
- некомплектность поставки строительных материалов и изделий, нарушение сроков их поставок;
- непредвиденные работы;
- простой из-за природно-климатических и погодных условий;
- отсутствие рабочих требуемой специальности и квалификации и т.д.

Технология возведения железнодорожной насыпи представляет собой совокупность процессов [7], [13]:

- контроля качества уплотнения предыдущего (нижележащего, подстилающего) слоя грунта,
- отсыпки текущего (очередного) слоя,
- укатки очередного слоя несколькими проходами катка.

Из практики строительства известно, что качество дорожной насыпи в текущий момент времени t окажется неудовлетворительным в случаях [7], [13], [23]:

- завышения толщины отсыпаемого слоя,

- укладки несоответствующего проектным требованиям грунта,
- недостаточности количества проходов катка,
- неудовлетворительного качества уплотнения нижележащего слоя грунта.

Таким образом, необходимо рассмотреть модель из пяти состояний, которая раскрывает развитие ситуации при уплотнении слоев грунта насыпи земляного полотна в части отказов технологического процесса. При этом состояния будут рассматриваться, как условно самостоятельные этапы процесса.

S_0 – все процессы в момент t достигают результата;

S_1 – недоуплотнение в момент t верхнего слоя грунта вследствие завышенной толщины слоя;

S_2 – недоуплотнение в момент t верхнего слоя грунта вследствие недостаточного количества проходов грунтоуплотнителя;

S_3 – состояние, когда в момент t отсыпается несоответствующий проектным требованиям грунт;

S_4 – снижение плотности основания (подстилающего слоя) в момент t превысило допустимый предел.

Входными параметрами при формировании и формализации модели технологического процесса уплотнения грунта являются интенсивности отказов технологий (отдельных состояний (операций) технологического процесса) – λ . В соответствии со свойствами потока событий, среднее число событий потока, наступающих в единицу времени, называется интенсивностью или средней плотностью потока.

Интенсивность отказов может быть отождествлена со средним числом выбросов в единицу времени. Экспоненциальный закон функции надежности характеризуется постоянной

интенсивностью отказов. Однако отмечается, что функция надежности технологического процесса не подчиняется экспоненциальному закону. Для них важен срок эксплуатации технологии или ее элементов.

В результате, физическим смыслом интенсивности потока событий (отказов или восстановлений) является среднее число событий, приходящееся на единицу времени. Интенсивность потока событий может быть любой неотрицательной функцией времени и имеет размерность [1/время] (5.1):

$$\lambda = \frac{1}{T_o}, \quad (5.1)$$

где T_o – время безотказного функционирования технологической операции;

При рассмотрении технологического процесса уплотнения грунта, а именно этапов уплотнения, интенсивности отказов технологий являются основной характеристикой при осуществлении перехода из одного состояния в другое.

При этом переход процесса из состояния S_i в состояние S_j за время Δt с точностью до бесконечно малых высших порядков происходит с вероятностью (5.2):

$$\dot{P}_{ij}(t) = \lambda_{ij} \Delta t, \quad (5.2)$$

где λ_{ij} – плотность вероятности перехода (интенсивность отказа технологии).

При определении величины интенсивностей отказов и состояний технологического процесса отсыпки и уплотнения грунта следует учитывать длину фронта работ, а также результаты вычисления интенсивности потока событий или данные статистического анализа. В частности значение интенсивности отказов технологии зависит от времени безотказной работы составляющих элементов этапа технологического процесса и

влияния окружающей среды. Важно отметить, что значение интенсивности отказа и восстановления технологии относится ко всему фронту работ, так как средства механизации, трудовые ресурсы и природно-климатические условия оказывают влияние на весь рабочий участок в целом. Это связано с тем, что если бы данные факторы не оказывали влияние на технологический процесс уплотнения грунта в пределах фронта работ, то данный участок насыпи не претерпевал бы нежелательных изменений (деформации, дефекты) в своей структуре на протяжении последующих лет эксплуатации.

В результате примем следующие плотности вероятности перехода [7], [8], [13], [23]:

λ_1 – интенсивность отказов технологии, связанная с неудовлетворительным качеством уплотнения очередного слоя грунта (1/мин);

λ_2 – интенсивность отказов технологии, связанная с завышенной толщиной очередного слоя грунта (1/мин);

λ_3 – интенсивность отказов технологии, связанная с несоответствующим качеством отсыпаемого грунта (1/мин);

λ_4 - интенсивность отказов технологии, связанная с неудовлетворительным качеством уплотнения грунта нижележащего слоя (1/мин);

В случаях систематического недоуплотнения текущих (очередных, в данный момент - верхних) слоев грунта интенсивность отказов λ_4 увеличивается на величину λ_5 .

Тогда переходные вероятности системы:

- из состояния S_0 за время Δt система перейдет в состояние S_1 с вероятностью $\lambda_1 \Delta t$, если будет завышена толщина слоя;

- из состояния S_0 за время Δt система перейдет в состояние S_2 с вероятностью $\lambda_2 \Delta t$, если будет занижено число проходов грунтоуплотнителя;
- из состояния S_0 за время Δt система перейдет в состояние S_3 с вероятностью $\lambda_3 \Delta t$, если будет отсыпан несоответствующий проектным требованиям грунт;
- из состояния S_0 за время Δt система перейдет в состояние S_4 с вероятностью $\lambda_4 \Delta t$, если снижение плотности основания (подстилающего слоя) превысит допустимый предел при удовлетворительном качестве уплотнения верхнего слоя;
- с вероятностью $(\lambda_4 + \lambda_5) \Delta t$ система перейдет из состояния S_1 в состояние S_4 или из состояния S_2 в состояние S_4 или из состояния S_3 в состояние S_4 , если снижение плотности подстилающего слоя превысит допустимый предел при неудовлетворительном качестве уплотнения верхнего слоя.

Ориентированный граф пяти состояний и возможные переходы системы показаны на рис. 5.3.

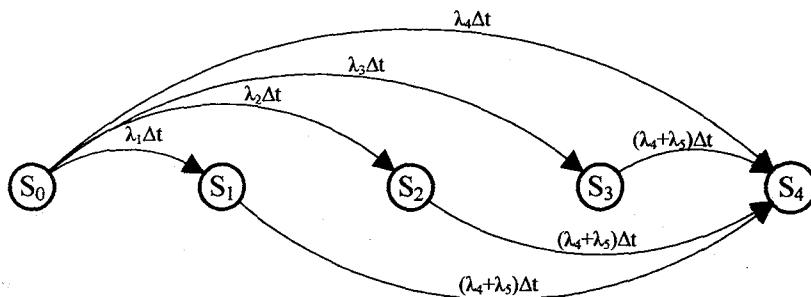


Рис. Л.5.3. Граф состояний и переходов

Для этого графа система дифференциальных уравнений Колмогорова, определяющих вероятность каждого состояния системы в текущий момент времени t , имеет вид (5.3) [7],[13].

После того, как составлены дифференциальные уравнения для каждого состояния процесса, определяют вероятности нахождения процесса в каждом из состояний в момент времени t при заданных начальных ненулевых условиях с учетом того, что сумма вероятностей всех состояний процесса равна единице.

В начальный момент времени $t=0$ все этапы технологического процесса уплотнения грунта функционировали без отказов, то есть $P_0(0)=1, P_1(0)=P_2(0)=P_3(0)=P_4(0)=0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_0(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda_4 + \lambda_5)P_1(t); \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - (\lambda_4 + \lambda_5)P_2(t); \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_3 P_0(t) - (\lambda_4 + \lambda_5)P_3(t); \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_4 P_0(t) + (\lambda_4 + \lambda_5)P_1(t) + (\lambda_4 + \lambda_5)P_2(t) + (\lambda_4 + \lambda_5)P_3(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1 \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Решением системы уравнений (5.3), с учетом принятых начальных условий, является система функций (решение получено операторным методом с применением обратного преобразования Лапласа):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}; \\ P_1(t) = \frac{\lambda_1(e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t})}{\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_5 + \lambda_1}; \\ P_2(t) = \frac{\lambda_2(e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t})}{\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_5 + \lambda_1}; \\ P_3(t) = \frac{\lambda_3(e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t})}{\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_5 + \lambda_1}; \\ P_4(t) = 1 - \frac{\lambda_1 e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t} + \lambda_2 e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t} + \lambda_3 e^{-(\lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_5 + \lambda_1} + \frac{\lambda_5 e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}}{\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_5 + \lambda_1} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Для численного решения системы дифференциальных уравнений (5.3) остается подставить в полученные формулы (5.4) значения интенсивностей отказов операций технологического процесса возведения дорожной насыпи.

Исходные данные:

$$T_1 = 75 \text{ мин}; T_2 = 23 \text{ мин}; \\ T_3 = 74 \text{ мин}; T_4 = 87 \text{ мин}.$$

Следовательно:

$$\lambda_1 = \frac{1}{75}, \text{ (1/мин)}; \lambda_2 = \frac{1}{23}, \text{ (1/мин)}; \\ \lambda_3 = \frac{1}{74}, \text{ (1/мин)}; \lambda_4 = \frac{1}{87}, \text{ (1/мин)},$$

если недоуплотнение текущих (очередных, в данный момент - верхних) слоев грунта носит систематический характер, то $\lambda_5 = 0,0003$, (1/мин). В качестве временного интервала рассмотрены 60 мин. Результаты вычислений представлены в табл. 5.1 и рис. 5.4 (изменение значений вероятностей показано с интервалом в 5 мин)

Таблица 5.1

t	$P_0(t)$	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$
0	1	0	0	0	0
5	0.664	0.053	0.173	0.054	0.056
10	0.441	0.085	0.278	0.086	0.109
15	0.293	0.104	0.338	0.105	0.16
20	0.195	0.113	0.369	0.115	0.208
25	0.129	0.117	0.382	0.119	0.253
30	0.086	0.117	0.382	0.119	0.295
35	0.057	0.115	0.375	0.117	0.336
40	0.038	0.112	0.364	0.113	0.374
45	0.025	0.107	0.35	0.109	0.409
50	0.017	0.102	0.334	0.104	0.443
55	0.011	0.097	0.318	0.099	0.475
60	0.008	0.092	0.301	0.094	0.505

Рассмотрим основные подходы принятия решений в условиях неопределенности на следующем примере. При этом воспользуемся полученными данными и выделим два существенных критерия необходимых для решения поставленной задачи. Первым критерием будет минимальное значение вероятности безотказного функционирования технологического процесса $\bar{P}_0(t)$. Этому значению соответствует момент времени, когда необходимо принимать меры для восстановлению процесса с целью получения заданной проектом степени уплотнения. Для рассматриваемого примера зададимся значением вероятности $\bar{P}_0(t) \geq 0.4$. Вторым критерием будет количество времени в минутах необходимое для уплотнения слоя грунта установленной толщины при заданном количестве проходов на определенной длине гона, позволяющее достигнуть заданную

степень уплотнения (определяется в соответствии с ЕНиР); в данном случае примем 30 мин.

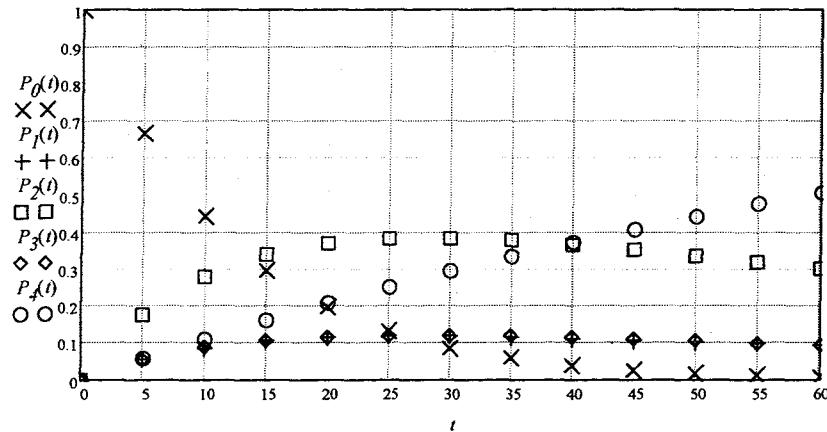


Рис. 5.4. График изменения значений вероятностей состояний технологического процесса. P_0 – все процессы в момент t достигают результата (S_0); P_1 – недоуплотнение в момент t верхнего слоя грунта вследствие повышенной толщины слоя (S_1); P_2 – недоуплотнение в момент t верхнего слоя грунта вследствие недостаточного количества проходов грунтоуплотнителя (S_2); P_3 – состояние, когда в момент t отсыпается несоответствующий проектным требованиям грунт (S_3); P_4 – снижение плотности основания (подстилающего слоя) в момент t превысило допустимый предел (S_4).

Для управления ходом работ необходимо принимать решение по устранению отказов в целом ко всему процессу послойного уплотнения грунта [23]:

- x_1 – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени работы планировочной техники,

- x_2 – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет уменьшения скорости движения грунтоуплотнительной техники,
- x_3 – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени работы планировочной техники и уменьшения скорости движения и грунтоуплотнительной машины,
- x_4 – ликвидация отклонений в технологическом процессе с применением всех основных ресурсов строительной организации,
- x_5 – ликвидация отклонений в технологическом процессе с применением основных и привлечением дополнительных ресурсов строительной организации.

Затраты на проведение вышеуказанных операций даны в табл. 5.2.

На основании результатов предыдущего расчета и значений затрат на проведение восстановительных работ определим наиболее оптимальное решение для управления рассматриваемым технологическим процессом с целью достижения установленного проектом уровня качества.

Таблица 5.2

Затраты на проведение восстановительных работ

	P_j	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
S_1	0.085	6	9	4	2	4
S_2	0.278	9	3	6	8	7
S_3	0.086	4	8	5	6	3
S_4	0.109	2	5	1	3	5

В соответствии с первым критерием в рассматриваемом примере ближайшим значением снижения вероятности безотказной работы ($\bar{P}_0(t) \geq 0,4$) является $P_0(t) = 0,441$. Этому значе-

нию соответствует время $t = 10$ мин. Однако для достижения запланированной степени уплотнения необходимо затратить 30 мин. Таким образом, после 10 мин с момента начала работ технологический процесс выходит за рамки планового развития. Это значит, что через установленные 30 мин заданная степень уплотнения не будет достигнута и потребуются дополнительные ресурсы (время, энергия, информация) для её достижения, что недопустимо. В этом случае необходимо принять оптимальное решение относительно дальнейшего развития процесса направленного на достижение положительного результата (заданной степени уплотнения).

В качестве примера задана матрица затрат на ликвидацию отказов в технологическом процессе размером 4×5 с координатами первого элемента (2,4).

Для решения указанной задачи возможны три различных подхода [23].

1. *Принцип максимального правдоподобия.* В соответствии с этим принципом выбирается такое состояние «природы», которое наиболее вероятно, т.е. из вектора P_j выбирается максимальная компонента и считается, что «природа» будет находиться в этом состоянии. Для данного примера наиболее вероятное состояние – недоуплотнение в момент t (10 мин) верхнего слоя грунта вследствие недостаточного количества проходов грунтоуплотнителя $P_2 = 0,278$. Функция затрат должна быть минимизирована: $\min_x F(x, S_1) = \min_i \{9,3,6,8,7\} = 3$ и оптимальная стратегия – ликвидация отклонений в технологическом процессе за счет уменьшения скорости движения грунтоуплотнительной техники с целью достижения заданной величины степени уплотнения.

Таким образом, на практике выбирают этот принцип, если максимальная вероятность значительно больше вероятности других состояний.

2. *Принцип Байеса* состоит в том, что оперирующая сторона рассчитывает на минимум средних затрат. В этом случае при применении стратегии x_1 средние затраты составят

$$\bar{F}(x_i) = \sum_j F(x_i, S_j) P_j \quad (7.1)$$

$$\bar{F}(x_1) = 0,085 \cdot 6 + 0,278 \cdot 9 + 0,086 \cdot 4 + 0,109 \cdot 2 = 3,574.$$

Соответственно для других стратегий оперирующей стороны имеем $\bar{F}(x_2) = 2,832$, $\bar{F}(x_3) = 2,547$, $\bar{F}(x_4) = 3,237$ и $\bar{F}(x_5) = 3,089$. Минимизация средних затрат дает $\min_x \bar{F}(x) = \min_i \{3,574, 2,832, 2,547, 3,237, 3,089\} = 2,547$ и оптимальную стратегию – ликвидацию отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени работы планировочной техники и уменьшения скорости движения и грунтоуплотнительной машины с целью достижения заданной величины степени уплотнения.

Если неприемлемы по тем или иным причинам предыдущие подходы, например «природа» может находиться в равновероятных состояниях, то можно применить гарантированную оценку. В этом случае считается, что «природа» будет реализовывать такой вектор P_j , чтобы принести возможно больший вред, максимизировав функцию потерь, т.е. «природа» рассматривается как противник, реализующий наиболее выгодную для себя стратегию. Рассмотрим поведение оперирующей стороны с точки зрения противника. Если будет реализована стра-

тегия x_1 , то противник должен применить стратегию, максимизирующую затраты (усреднение снизу):

$$\underline{F}(x_i) = \max_j F(x_i, S_j). \quad (7.2)$$

Соответственно $\underline{F}(x_1) = \max\{6,9,4,2\} = 9$, $\underline{F}(x_2) = 9$, $\underline{F}(x_3) = 6$, $\underline{F}(x_4) = 8$, $\underline{F}(x_5) = 7$. Оперирующая сторона выбирает свою стратегию как минимальную из оценок $\min_x \underline{F}(x) = \min_i \{9,9,6,8,7\} = 6$, что соответствует стратегии x_3 , а именно ликвидации отклонений в технологическом процессе за счет увеличения времени работы планировочной техники и уменьшения скорости движения и грунтоуплотнительной машины.

Таким образом, можно заключить, что наиболее оптимальной стратегией развития технологического процесса будет x_3 , поэтому принимаем решение ликвидировать отклонения в процессе послойного уплотнения грунта за счет увеличения времени работы планировочной техники и уменьшения скорости движения грунтоуплотнительной машины с целью достижения заданной величины степени уплотнения.

5.3. Исходные данные

Студенту необходимо сформировать таблицу аналогичную табл. 5.2, сохранив значения вероятностей отказов операций технологического процесса, а значения затрат на ликвидацию отклонений взять из табл. П.1 Приложения. При этом преподаватель задает каждому студенту исходные данные: координаты первого элемента матрицы размерностью 4×5 (4 строки и 5 столбцов).

5.4. Выводы по работе

Проведенные вычисления показали, что при различных принципах принятия решений оптимальные из них различаются. Расчет по первому принципу дал отличный результат от результатов, полученных в ходе расчетов по второму и третьему принципам. В итоге, окончательный результат зависит от лица, принимающего решение. Следует отметить, что первый подход отражает оптимистическую точку зрения на развитие событий, второй подход рассчитан на средний результат при проведении большого количества подобных операций, а третий – гарантирует, что затраты не превысят расчетного значения в самом неблагоприятном случае.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	8	4	7	1	3	9	9	5	7	3	8	6	5	8	9
2	7	7	6	6	9	4	2	4	8	5	9	3	5	5	1
3	3	8	6	9	3	6	8	7	9	8	3	4	2	9	5
4	3	7	3	4	8	5	6	3	4	3	2	3	5	3	8
5	3	6	4	2	5	1	3	5	6	4	8	7	3	6	4
6	4	9	9	4	5	5	3	4	5	8	8	3	4	7	5
7	1	6	9	1	2	5	5	9	2	4	5	5	8	4	8
8	7	5	8	8	3	3	2	2	6	5	5	5	8	5	5
9	2	5	7	7	5	3	3	7	1	4	4	4	6	7	4
10	5	7	3	6	5	9	2	3	1	1	6	4	4	9	3
11	3	2	8	7	7	5	5	4	3	2	3	3	9	8	6
12	7	8	6	7	8	2	2	5	7	3	6	5	5	4	8
13	3	2	7	8	5	5	5	2	4	8	5	7	6	5	4
14	3	5	9	7	5	3	6	9	1	8	4	4	6	8	6
15	7	3	7	5	4	6	2	1	4	9	7	6	4	5	8
16	7	6	8	2	1	1	5	8	6	7	6	8	1	3	1
17	2	4	3	6	8	3	8	1	9	4	6	3	3	6	6
18	6	4	4	7	6	4	7	5	4	3	6	3	1	2	6
19	3	1	7	7	5	6	7	5	7	9	8	1	6	8	9
20	5	2	2	5	1	3	7	5	5	7	4	2	4	2	1
21	9	4	8	5	6	1	3	2	5	7	5	7	7	3	5
22	4	7	6	6	4	5	4	3	8	6	8	9	7	8	7
23	3	2	2	7	5	6	3	3	9	3	6	4	1	3	8
24	7	7	1	1	6	2	7	4	8	3	3	5	6	3	6
25	5	2	3	5	5	3	8	5	5	7	3	1	6	3	4
26	5	5	9	5	4	3	1	1	5	2	3	4	6	4	1
27	3	3	9	5	2	5	2	3	6	8	8	7	8	1	4
28	5	3	1	5	5	5	5	4	5	7	3	6	6	7	3
29	2	5	3	4	3	7	4	9	6	8	9	6	5	9	6
30	7	8	3	6	7	5	9	3	2	2	8	4	3	5	5

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог. Под ред. С.П. Першина. М.: Транспорт, - 1991. – 261 с.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 432 с.
3. Гиссин В.И. Управление качеством (2-е издание). – Москва: ИКЦ «МарТ», Ростов-н/Д: Издательский центр «МарТ», 2003. – 400 с.
4. Железнодорожное строительство. Технология и механизация. Учебник для вузов ж.д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. / С.П. Першин, Н.А. Зензинов, М.А. Фищуков, Г.Н. Шадрина. Под ред. С.П. Першина. – М.: Транспорт, 1991. – 407 с.
5. Королев В.А. Мониторинг геологической среды. Учебник / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: МГУ, 1995. - 270 с.
6. Материалы и изделия для строительства дорог. Справочник. Н.В. Горелышев, И.Л. Гуряков, Э.Р. Пинус и др. Под ред. Горелышева. – М.: Транспорт, 1986, - 288 с.
7. Нейман А.О. Системное управление ресурсопотоками строительных процессов: Монография. – М.: Маршрут, 2006. - 240 с.
8. Нейман А.О. Синергетика технологических процессов в строительстве. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2006. – 280 с.
9. Нейман А.О. Оценка надежности технологий с позиции качества результата труда // Межвузовский сб. науч. тр. – М.: МИИТ. 1989. - Вып. 823.
10. Нейман А.О., Полянский А.В. Управление качеством земляных работ при возведении дорожных насыпей. //

ВИНИТИ РАН. Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – №4, С. 18-24.

11. Нейман А.О., Полянский А.В., Жорняк С. Г., Ткачевский И.Д., Козлов А.В. Регулирование процесса возведения железнодорожных насыпей. // ВИНИТИ РАН. Транспорт: наука, техника, управление. – 2005. – №4, С. 4-8.
12. Першин С.П., Нейман А.О. Методические основы автоматизации контроля качества земляных работ. Сб. тр. МИИТ. – Вып. 512, М.: МИИТ, 1976. С. 15-24. 124 с.
13. Полянский А.В. Мониторинг технологического процесса возведения насыпей земляного полотна / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МИИТ, 2006. 190 с.
14. Полянский А.В. Разработка концепции строительного мониторинга процесса возведения насыпей земляного полотна. // Безопасность движения поездов / Труды VI научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2005. – С. VIII-17-18.
15. Полянский А.В. Формирование методических подходов технического регулирования технологических процессов возведения земляного полотна. // Труды научно-практической конференции Неделя науки – 2004 «Наука - транспорту». – М.: МИИТ, 2005. – С. II-22-24.
16. Полянский А.В. Элементы мониторинга управления качеством строительных свойств грунта. // Труды научно-практической конференции Неделя науки – 2003 «Наука - транспорту». – М.: МИИТ, 2004. – С. II-13-15.
17. Системотехника./ Под редакцией А.А. Гусакова, М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2002. – 768 с.
18. Спиридовон Э.С., Шепитько Т.В. Разработка системы мониторинга производственной ситуации // Под ред. Т.В. Шепитько. – М.: МИИТ, 2003.-50 с.

19. Технология железнодорожного строительства: Учебник для ВУЗов / Э.С. Спиридовон, А.М. Призмазонов, А.Ф. Акуратов, Т.В. Шепитько; Под ред. А.М. Призмазонова, Э.С. Спиридовона. – М.: Желдориздат, 2002. – 631 с.
20. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании».
21. Федюкин В.К. Основы квалиметрии. Управление качеством продукции. Учебное пособие. – М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 2004. – 296 с.
22. Цернант А.А. Экосистемный подход к управлению качеством природно-технических систем.// Актуальные проблемы оптимизации конструкций. – Сузdalь-Владимир: 2-я Все-союзная школа-семинар, 1990. - С. 42-44.
23. Симонов К.В., Полянский А.В. Решение задач планирования железнодорожного строительства с применением системы Mathcad: Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2006. – 226 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. МОНИТОРИНГ КАК ПРАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.....	3
2. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА.....	6
3. МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА В НАСЫПИ.....	13
4. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОСЛОЙНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА.....	28
5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	31
ЛИТЕРАТУРА.....	52

Учебно-методическое издание

ПОЛЯНСКИЙ Алексей Викторович

**МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ВОЗВЕДЕНИЯ НАСЫПЕЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

**Методические указания
к лабораторным занятиям и самостоятельной работе студентов
по дисциплине «Технология, механизация и автоматизация
железнодорожного строительства»**

Подписано в печать - **04.10.07.** Изд. №31-07 Формат 60x84/16

Усл.-печ. л. – 3,5. Тираж 100 экз. Заказ № **524.**

127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 15. Типография МИИТа