

6
А-43

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ

На правах рукописи
И.А. ЧЕРКАШИН

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ПОДЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ УГОЛЬНОЙ
ШАХТЫ

(техническая кибернетика, № 255)

А в т о р е ф е р а т

К и е в - 1968

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ

На правах рукописи
И.А.Черкашин

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ПОДЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

/ техническая кибернетика, № 255/

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Киев - 1968

В В Е Д Е Н И Е

Программа построения материально-технической базы коммунизма в СССР поставила перед угольной промышленностью задачу увеличить добычу угля за два десятилетия в 2,3 раза по сравнению с уровнем 1960 г. при резком улучшении технико-экономических показателей работы шахт.

В этой связи возникают большие задачи по техническому перевооружению угольной промышленности, путем широкого внедрения комплексной механизации и автоматизации управления основными технологическими процессами в шахтах.

Одной из важнейших задач в этом направлении является автоматизация диспетчерского управления подземным локомотивным транспортом - наиболее распространенному виду шахтного транспорта по главным откаточным выработкам. Важность подземного транспорта в технологической цепи добычи полезного ископаемого определяется как сильным непосредственным влиянием на бесперебойный характер работы добычных и подготовительных участков, так и большим удельным весом в экономических показателях работы шахт.

Однако, существующие в настоящее время на шахтах методы и средства оперативного диспетчерского управления оказываются в условиях интенсификации и механизации современного производства недостаточно эффективными, что приводит к значительным производственным простоям очистных забоев и, следовательно, в потерях добычи. В то же время на подземном транспорте имеются большие неиспользованные внутренние резервы. Сложившееся положение обуславливает актуальность задачи оптимизации диспетчерского управления подземным транспортом. Применение методов кибернетики и средств вычислительной техники позволяет подойти к решению

этой задачи по-новому

В соответствии с источниками экономичности систем управления, сформулированными академиком В.А.Трапезниковым, при оптимизации диспетчерского управления подземным транспортом экономический эффект может быть получен за счет уменьшения неупорядоченности производства, повышения производительности оборудования и экономии материалов и энергии.

Несмотря на чрезвычайную актуальность задачи оперативного управления подземным транспортом литература, обобщающая теоретические и практические работы в этой области, пока еще немногочисленна. Это объясняется тем, что создание автоматизированной системы диспетчерского управления подземным транспортом является весьма сложной задачей как в теоретическом, так и в техническом отношении. Теоретические трудности заключаются в особенностях системы управления подземным транспортом как сложной системы с иерархической структурой управления, стохастическим поведением взаимодействующих транспортных подсистем, нестандартностью с классическими объектами автоматизации, высокой размерностью задачи и наличием особенностей и ограничений, определяемых спецификой горного производства. Общие же методы анализа и синтеза систем такого класса пока еще отсутствуют.

Технические трудности заключаются в весьма небольшом опыте создания и эксплуатации комплексных автоматизированных систем с применением вычислительной техники на угольных шахтах, отсутствии достаточно надежных искробезопасных датчиков и т.п.

Целью настоящей диссертационной работы является: комплексное исследование системы оперативно-диспетчерского управления подземным локомотивным транспортом угольной шахты с позиций теории

управления сложными системами с иерархической структурой управления и на основе прикладной математики, включая исследование иерархической структуры и процессов взаимодействия уровней управления подземным транспортом в единой системе управления шахтой, выбор критериев оптимальности, разработка математической модели функционирования и оптимального оперативного управления подземным транспортом с последующим синтезом и реализацией в автоматизированной системе контроля и управления подземным транспортом на базе средств вычислительной техники и телемеханики.

В качестве объекта исследования, на котором проверялись теоретические выводы, была выбрана шахта им.А.Ф.Засядько треста "Куйбышевуголь" (Донбасс).

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, общих выводов, пяти приложений и списка литературы.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ ЛОКОМОТИВНЫМ ТРАНСПОРТОМ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

В состоянии вопроса выделены отдельно 2 аспекта:

1) аспект, относящийся непосредственно к оптимизации диспетчерского управления подземным транспортом угольной шахты;

2) аспект, относящийся к общей теории сложных (больших) систем управления.

В соответствии с первым аспектом в главе произведен анализ современного состояния диспетчерского управления подземным транспортом на угольных шахтах и работ по оптимизации подземного транспорта с использованием математических методов и средств вычислительной техники.

Над решением этой проблемы в настоящее время работает ряд

низаций: МГИ, ИГД им. А.А. Скочинского, Гипроуглеавтоматизация, Строгипрошахт, ДонУГИ, Институт автоматики / Киев/, КНИУИ, ЦНИИКА, ЦК им. М.М. Федорова и др.

По характеру решаемых задач можно выделить два относительно самостоятельных направления исследований:

1. Разработка научных основ проектирования подземного транспорта.
2. Разработка научных основ оперативного диспетчерского управления подземным транспортом.

В настоящее время более глубоко и разносторонне исследованы задачи первого направления. В соответствии с целью диссертационной работы основное внимание уделено анализу работ, посвященных второму направлению. Здесь, в первую очередь, необходимо отметить работы А.С. Бурчакова, Б.М. Воробьева, И.В. Бишеле, Э.И. Гойзмана, Э.Г. Саратовского, П.В. Авдулова и др. Из зарубежных источников анализируются работы по теории и практике автоматизации диспетчерского управления подземным транспортом, проводимые в Швеции, Франции, США, ПНР, ЧССР и др.

В целом, в настоящее время по проблеме автоматизации диспетчерского управления подземным транспортом предприняты первые шаги научного подхода к построению аналитической и имитирующей моделей функционирования и диспетчерского управления подземным транспортом и получены важные результаты. Однако, ряд задач принципиального характера по комплексному исследованию систем диспетчерского управления, как составной части единой системы управления шахтой, выбору критерия оптимальности, разработке математической модели оптимального оперативного управления, с учетом стохастического характера транспортных и сопряженных с ним звеньев, сложных структурных связей между звеньями и больших размеров системы, разработке

научно обоснованных технических требований и математического обеспечения автоматизированной системы диспетчерского управления еще ждет своего решения.

Перечисленные задачи исходят, главным образом, из особенностей системы подземного транспорта как сложной системы управления. В связи с этим для комплексного и разностороннего решения этих задач необходимо подойти с позиций теории управления сложными системами.

Работы по ее созданию широким фронтом ведутся в ряде головных институтов СССР (ИАТ АН СССР, ЦЭМИ АН СССР, ИК АН УССР, ИК АН ГССР и др.) и за рубежом (США, Япония, Бельгия, ПНР, НРБ и др.).

В этой области имеются уже значительные достижения, однако, еще не создана инженерная методика анализа и синтеза сложных систем, которую можно было бы применить, в частности, для решения задачи диспетчерского управления подземным транспортом. В связи с этим на современном этапе большую помощь в развитии некоторых положений общей теории и в разработке вопросов инженерной методики анализа и синтеза сложных систем может оказать исследование конкретных сложных систем, в частности, системы управления подземным транспортом.

Исходя из проведенного анализа в первой главе формулируются следующие задачи исследования:

1. Исследование иерархической структуры системы управления подземным транспортом в единой системе управления шахтой, процессов взаимодействия уровней иерархии, свойств и связей.
2. Выбор критерия диспетчерского управления подземным транспортом и установление зависимости его со стоимостным глобальным критерием шахты.

3. Разработка вопросов инженерной методики анализа и синтеза сложной системы диспетчерского управления подземным транспортом

4. Математическое описание функционирования подземного транспорта как объекта управления на уровне диспетчерской задачи, отражающего стохастический характер транспорта и сопряженных с ним звеньев, сложные структурные связи и большие размеры системы.

5. Разработка математической модели и метода оптимального диспетчерского управления подземным транспортом.

6. Вывод алгоритма диспетчерского управления.

7. Разработка имитирующей математической модели функционирования и управления подземным транспортом на ЭЦМ.

8. Статистические испытания алгоритма управления на модели, имитирующей реальную шахту.

9. Определение научно обоснованных технических требований и математического обеспечения для проектирования автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления подземным транспортом с последующей реализацией.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СВЯЗЕЙ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ ШАХТНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Во второй главе перечисляются признаки сложных систем управления и показывается принадлежность системы управления шахты в целом и подземного транспорта к указанному классу по каждому из этих признаков.

Производится построение иерархической структуры управления подземным транспортом в единой системе управления шахтой по функциональному признаку. Описывается функционирование этой системы на основании зависимости глобального критерия шахты с

локальными критериями производственных подразделений.

Для выбора критерия оптимальности при оперативном управлении подземным транспортом необходимо прежде выявить глобальный критерий шахты и установить функциональную связь между ними. С этой целью в главе анализируются основные существующие экономические критерии эффективности шахты (рентабельность, прибыль, себестоимость, коэффициент использования основных фондов, трудоемкость работ и производительность труда) и дальнейшие исследования производятся на примере показателя себестоимости I_t угля, так как он является достаточно общим и удобным для задач оперативного управления и в то же время удобным для перехода к показателям прибыли и рентабельности.

Однако, осуществляющий в настоящее время экономический анализ работы шахт, отвечая своему основному назначению, в то же время недостаточно развит для постановки задачи управления шахтой, поскольку в задачи экономического анализа не входило определение с позиций управления аналитических зависимостей глобального критерия эффективности от локальных критериев шахтных подразделений, не раскрывались зависимости критериев эффективности от управляющих воздействий каждой подсистемы и не исследовались перечисленные зависимости в функции времени.

В связи с этим выражение для подсчета себестоимости I_t угля преобразовано и развито таким образом, чтобы оно в определенной степени отражало взаимодействие производственных подразделений шахты между собой в процессе функционирования, т.е.

$$Z_r = \frac{\sum_{k=1}^3 Q_k^* - \sum_{q=1}^2 R_q}{\sum_{q=1}^2 z_q}, \quad (I)$$

где Z_r - глобальный критерий шахты;
 Q_k^* - максимально возможная производительность k -го
 добычного участка;
 R_q - потери добычи из-за несогласованной работы q -го
 производственного участка шахты.

Максимизация глобального критерия шахты возможна путем
 регулирования переменных R_q и Z_q на минимум по всем шахтным
 подсистемам при заданных ограничениях.

Для раскрытия зависимости глобального критерия шахты Z_r
 от критерия оптимальности транспортной подсистемы Z_{tr} в функции
 времени $Z_r = F(Z_{tr}, t)$ в работе проведены исследования процес-
 сов взаимодействия подсистем в динамике.

В качестве одного из подходов решения указанной задачи
 в главе предложен подход, основанный на использовании одного
 характерного свойства, присущего производственному процессу
 шахты и раскрывающего динамическую природу функционирования
 сложной системы. Это свойство, которое определим как свойство
 периодичности, заключается в том, что материальные ресурсы
 (капитальные сооружения, оборудование, материалы, электроэнергия
 и др.), составляющие основу функционирования шахты, имеют раз-
 личную периодичность потребления за время деятельности шахты.
 В этом явлении отражаются частотные характеристики множества
 объектов управления, входящих в систему управления шахтой.

Если на схеме преобразования материальных потоков шахты
 выделить объекты управления и определить по каждому из них перио-
 ды повторяемости потребления ресурсов, то можно получить вектор
 периодичности:

$$T = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_k), \quad (2)$$

где $T_1 < T_2 < T_3 < \dots < T_k$ - не менее, чем на порядок.

Поскольку процесс потребления ресурсов представляет собой
 управляющие материальные воздействия на объекты, то ясно, что
 производить эти воздействия можно лишь с частотой, зависящей
 от свойств объектов. Исходя из этого, сделано предположение, что
 число уровней иерархии диктуется частотными свойствами объектов
 и должно быть равно числу составляющих вектора периодичности,
 т.е.

$$j = k. \quad (3)$$

Тогда каждому уровню управления должна быть свойственна опре-
 деленная частота управляющих воздействий, причем, чем выше
 уровень управления, тем период повторяемости управляющих воздей-
 ствий больше. Показано влияние информационных характеристик
 системы на выбор числа уровней иерархии. Проверка согласования
 информационных характеристик управляющей системы и объекта управ-
 ления производится из условия

$$\frac{J_{yc}}{T^{(j)}} \geq \frac{J'_{об} \cdot N^{(j)}}{T^{(j)}},$$

где J_{yc} - пропускная информационная способность управляющей
 системы j -го уровня в течение периода $T^{(j)}$;
 $J'_{об}$ - среднее количество информации, создаваемое каждым
 объектом управления в течение периода $T^{(j)}$;
 $N^{(j)}$ - количество объектов, входящих в j -й уровень
 управления.

Предлагается методологическая схема анализа и синтеза
 иерархической структуры системы управления шахтой.

На основании свойства периодичности формулируется (в свете
 метода динамического программирования) принцип оптимальности функ-
 ционирования сложных систем. Идея принципа заключается в том,

что верхний j -й уровень управления, принимая очередное управляющее решение, тем самым задает на период одного своего шага локальным подсистемам нижнего ($j-1$)-го уровня ограничения на начальное количество ресурсов, на область управляющих воздействий и на значения критерия оптимальности. Вследствие разной периодичности управляющих воздействий уровней иерархии, нижний уровень сделает „ m “ шагов управления, в то время как верхний уровень сделает всего лишь один шаг, т.е.

$$T^{(j)} = m T^{(j-1)} \quad (4)$$

Таким образом, в течение „ m “ шагов нижний уровень является единицей самоуправления, а верхний не вмешивается в действия нижнего, за исключением случаев компенсации возмущений большой величины.

Обратное же влияние заключается в том, что эффективность принятых решений верхнего уровня зависит от поведения подсистем нижнего уровня в течение „ m “ шагов.

Используя сформулированный принцип оптимальности, основное функциональное уравнение Беллмана преобразуем к задаче управления сложной системой и для двух уровней иерархии имеет следующий вид:

$$Z_N^{(j)}(S_0^{(j)}(y_1^{(j+1)})) = \max_{y_1^{(j)} \in Y^{(j)}} [Z_{01}^{(j)}(S_0^{(j)}(y_1^{(j+1)}), y_1^{(j)}, Z_{m_1}^{(j-1)}(S_0^{(j-1)}(y_1^{(j)})) + Z_{m_1}^{(j)}(S_1^{(j)})] \quad (5)$$

где

$$Z_{m_1}^{(j-1)}(S_0^{(j-1)}(y_1^{(j)})) = \max_{y_1^{(j-1)} \in Y^{(j-1)}} [Z_{01}^{(j-1)}(S_0^{(j-1)}(y_1^{(j)}), y_1^{(j-1)}, Z_{m_2}^{(j-2)}(S_0^{(j-2)}(y_1^{(j-1)})) + Z_{m_1}^{(j-1)}(S_1^{(j-1)})]$$

Здесь левая часть первого уравнения выражает максимальный

„доход“, который может быть получен сложной системой за N шагов управления, начиная с состояния $S_0^{(j)}$, заданного принятым первым решением ($j+1$)-го уровня $y_1^{(j+1)}$.

Первый член в квадратных скобках правой части означает „доход“, получаемый системой в результате первого шага управления j -го уровня в зависимости от собственного начального состояния этого уровня $S_0^{(j)}$, от примененного управления на первом шаге $y_1^{(j)}$ и от максимального „дохода“ ($j-1$)-го уровня $Z_{m_1}^{(j-1)}$ в течение m_1 шагов кратных одному шагу j -го уровня. Последний член в квадратных скобках выражает результирующий выигрыш за ($N-1$) шагов управления.

Значения величин, входящих во второе уравнение, аналогичны.

Предложен возможный алгоритм решения функциональных уравнений, включающий в себя улучшение стратегий. Анализируются особенности вычислительных аспектов решения уравнений и делается вывод о том, что вследствие периодического ступенчатого хода решения задачи резкого возрастания размерности не произойдет. Ход рассуждений иллюстрируется применительно к системе управления подземным транспортом на различных уровнях иерархии в единой системе управления шахты.

Предлагается на основе свойства периодичности способ оценки эффективности функционирования каждого уровня управления и всей системы в целом путем определения приведенных значений критериев оптимальности уровней управления,

пересчитанных к выбранному интервалу времени T , исходя из изменения полезности затрат и доходов с течением времени в соответствии с рекомендациями академика В.А.Трапезникова.

Исходя из выражения глобального критерия шахты (1), можно получить после преобразований критерий оптимальности участка подземного транспорта (третий уровень управления), т.е.

$$Z_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{тр}}}{\sum_{q=1}^n g_q}, \quad (6)$$

где $R_{\text{тр}}$ - составляющая потерь добычи из-за несогласованной работы подземного транспорта с очистными забоями.

Поскольку при оперативном диспетчерском управлении транспортные ресурсы уже заданы решением задачи проектирования и в область управляющих решений диспетчера не входит их регулирование, то оценку эффективности диспетчерского управления будем производить по величине составляющей потерь добычи из-за неоптимального оперативного распределения порожних вагонеток между погрузочными пунктами.

Тогда критерий службы движения (второй уровень управления), исходя из выражения (6) и структуры системы диспетчерского управления, определится следующим образом:

$$R_{\text{дв}}^{(2)} = R_{\text{дис}}^{(2)} + \left(R_{\text{ок}}^{(1)} + \sum_{u=1}^v R_{u, \text{пок}}^{(1)} + \sum_{i=1}^N R_{i, \text{пог}}^{(1)} \right), \quad (7)$$

где $R_{\text{ок}}^{(1)}$, $R_{u, \text{пок}}^{(1)}$, $R_{i, \text{пог}}^{(1)}$ - соответственно составляющие потерь добычи, оценивающие эффективность управления локальными подсистемами первого уровня: околоствольного двора, u -го локомотива, i -го погрузочного пункта.

Из всех составляющих потерь добычи в данной работе минимизируется только составляющая потерь добычи на уровне оперативного диспетчерского управления подземным транспортом, т.е.

$$R_{\text{дис}}^* = \min_{y_i \in Y} R_{\text{дис}}, \quad (8)$$

где Y - область диспетчерского управления.

Показано, что более удобным и точным для оперативного управления подземным транспортом и в то же время адекватным критерием потерь добычи $R_{\text{дис}}$ является критерий среднеквадратичного отклонения фактического количества порожних вагонеток на погрузочных пунктах от заданного неснижаемого их запаса на этих пунктах, т.е.

$$w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i^* - d_i)^2}{N}}, \quad (9)$$

где d_i^* , d_i - безразмерные величины, характеризующие степень обеспеченности i -го погрузочного пункта порожними вагонетками; $d_i^* = \frac{b_i}{B_i} = 1$, $d_i = \frac{b_i}{B_i} (B_i / B_i)$ соответственно заданный решением задачи проектирования неснижаемый запас порожних вагонеток на i -м погрузочном пункте и текущее их количество).

Таким образом, по своему физическому смыслу критерий оценивает общую степень обеспеченности порожними вагонетками системы N погрузочных пунктов и отражает условия координации подземного транспорта с добычными участками.

Задача диспетчерского управления заключается в минимизации выражения (9).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ЛОКОМОТИВНОГО ТРАНСПОРТА

В третьей главе производится математическое описание функционирования подземного транспорта на уровне диспетчерского управления им в соответствии с такими его особенностями, как сложность, многомерность, динамический и стохастический характер.

Рассматривается лепестковая модель функционирования подземного транспорта, состоящая из околоствольного двора и номера погрузочных пунктов. Грузопотоки угля поступают из очистных забоев на погрузочные пункты и грузятся в порожние вагонетки. По мере заполнения груженные составы обмениваются на порожние прибывающими локомотивами и далее ими же транспортируются в околоствольный двор, где разгружаются и вновь поступают на погрузочные пункты. Локомотивы не закреплены за определенными погрузочными пунктами. Функционирование всех звеньев подземного транспорта, вследствие действия разнообразных по силе и характеру возмущений, происходит стохастически.

Для выделения транспортных подсистем и определения связей между ними были исследованы материальные потоки, составляющие основу функционирования подземного транспорта, и получен алгоритм функционирования подземного транспорта в операторной форме по методу А.А. Ляпунова. В результате выделены следующие явно выраженные подсистемы: I — подсистема околоствольного двора, II — подсистема номера погрузочных пунктов и III — подсистема локомотивов.

Предложена наглядная геометрическая интерпретация взаимодействия транспортных подсистем в виде пересекающихся пульсирующих колец.

В соответствии с выделенными подсистемами определен вектор состояния системы:

$$Q = (N, E_1, E_2, \dots, E_N, K_1, K_2, \dots, K_s), \quad (10)$$

где N — подмножество переменных, характеризующих состояние подсистемы околоствольного двора;

E_i, K_q — то же для подсистем i -го погрузочного пункта и q -го локомотива.

Исходя из функционального назначения подсистем, критерия оптимальности подземного транспорта и понятий теории управления построена функциональная схема управления и выбраны существенные переменные по каждой подсистеме. По принятой аналогии околоствольный двор выполняет роль источника питания и его вектор состояния включает в себя две составляющие:

$$N = (N^{(a)}, N^{(b)}), \quad (11)$$

где $N^{(a)}, N^{(b)}$ — состояния, характеризующие отсутствие или наличие в околоствольном дворе свободного состава порожних вагонеток.

Погрузочные пункты выполняют роль объекта управления и могут быть описаны следующим вектором состояния:

$$E = \left\| \begin{array}{c} E_1 (v_1^{(a)}, v_1^{(b)}, \dots, v_1^{(k)}, s_1^{(a)}, s_1^{(b)}) \\ E_2 (v_2^{(a)}, v_2^{(b)}, \dots, v_2^{(k)}, s_2^{(a)}, s_2^{(b)}) \\ \dots \\ E_N (v_N^{(a)}, v_N^{(b)}, \dots, v_N^{(k)}, s_N^{(a)}, s_N^{(b)}) \end{array} \right\|, \quad (12)$$

где b_i, S_i — переменные, характеризующие количество вагонов и состояние функционирования i -го погрузочного пункта.

Аналогично для подсистемы локомотивов как исполнительного органа системы диспетчерского управления вектор состояния имеет вид:

$$K = \begin{pmatrix} K_1(K_1^{(0)}, K_1^{(1)}, K_1^{(2)}, \dots, K_1^{(N)}) \\ K_2(K_2^{(0)}, K_2^{(1)}, K_2^{(2)}, \dots, K_2^{(N)}) \\ \dots \\ K_3(K_3^{(0)}, K_3^{(1)}, K_3^{(2)}, \dots, K_3^{(N)}) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Здесь переменная K_q характеризует местонахождение q -го локомотива ($q = 1, 2, \dots, 8$);

Размерность вектора состояния, например, для шахты, имеющей $N = 4$, $S = 10$, равняется 19 переменным при числе возможных состояний 23 000.

Для согласования работы подземного транспорта с очистными забоями необходимо производить прогнозирование будущих состояний подсистемы погрузочных пунктов в течение времени транспортного запаздывания, которое также является стохастической величиной и, в свою очередь, нуждается в прогнозировании.

Произведена вероятностная оценка транспортного запаздывания, т.е. перехода подсистемы локомотивов из состояния $K_q^{(0)}$ (околоствольный двор) в состояние $K_q^{(i)}$ (i -й погрузочный пункт). С этой целью были собраны и обработаны хронометражные данные по движению локомотивов на нескольких шахтах Донбасса. Оптимальная величина интервала статистического ряда определялась по формуле Стерджеса. Проверка теоретического и эмпиричес-

кого распределений по критериям Пирсона и Романовского показала, что случайное время транспортного запаздывания согласуется с показательным законом распределения, плотность которого для одного из маршрутов имеет вид:

$$f(\tau) = 0,049 \exp(-0,049\tau) \quad (\text{мин}^{-1}) \quad (14)$$

В соответствии с задачей диспетчерского управления выведены уравнения, описывающие функционирование объекта управления — подсистемы номера погрузочных пунктов в интервале времени транспортного запаздывания. Если известно настоящее состояние i -го погрузочного пункта $E_i(t)$, ~~тошнее ставится задача~~ и можно предсказать будущее его состояние спустя время движения локомотива к нему, т.е. $E_i(t+\tau_i)$. С этой целью в рамках некоторых предположений процесс потребления порожних вагонок на i -м погрузочном пункте рассматривается как марковский процесс с непрерывным временем. Построен граф переходов и получена квадратная матрица интенсивностей переходов переменной b_i . В конечном итоге процесс потребления порожних вагонок на i -м погрузочном пункте в интервале транспортного запаздывания при условии безотказной работы i -го погрузочного пункта в этом интервале описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{dP_0(\tau_i)}{d\tau} = -\lambda_i P_0(\tau_i) \\ \dots \\ \dots \\ \frac{dP_k(\tau_i)}{d\tau} = -\lambda_i [P_k(\tau_i) - P_{k-1}(\tau_i)] \end{cases} \quad (15)$$

$$\tau_{i \min} \leq \tau_i \leq \tau_{i \max}$$

где $P_0(\tau_i)$, $P_K(\tau_i)$ - вероятности погрузки 0 и K вагонеток на i -м погрузочном пункте в течение транспортного запаздывания τ_i .

Решение системы дифференциальных уравнений представляет собой закон распределения Пуассона для количества погруженных вагонеток.

Теоретические предположения подтверждены экспериментально. С этой целью были проведены хронометражные замеры времени погрузки вагонеток на шахте им.А.Ф.Засядько (Донбасс).

Проверка по критериям Пирсона и Романовского показала, что время погрузки одной вагонетки, т.е. перехода погрузочного пункта из состояния $b_i^{(g)}$ в состояние $b_i^{(g+1)}$ ($g = 0, 1, 2, \dots, K$), согласуется с показательным законом распределения, плотность которого для одного из погрузочных пунктов имеет вид

$$f(t_i) = 0,055 \exp(-0,055 t) \text{ (сек}^{-1}\text{)}, \quad (16)$$

что указывает на марковские свойства процесса функционирования погрузочного пункта в рабочем состоянии.

На основании полученных результатов производится экстраполирование ожидаемого количества порожних вагонеток на i -м погрузочном пункте за ожидаемое время транспортного запаздывания. Учет фактического состояния функционирования погрузочного пункта (работа или простой) в течение транспортного запаздывания производится вводом соответствующих условных вероятностей. В итоге получаем следующие соотношения для подсчета числа вагонеток.

Если в момент начала отсчета времени $t = 0$, соответствующий возникновению шаговой ситуации, погрузочный пункт находился в рабочем состоянии $S_i^{(0)}$ и на нем имелось $b_i(0)$ порожних вагонеток, то ожидаемое количество погруженных вагонеток за ожидаемое время движения определится из выражения

$$M\{\Delta b_i(\tau_i) / S_i^{(0)}\} = \lambda_i M\{\tau_i\} \cdot P_i\{S_i^{(0)}(\tau_i) / S_i^{(0)}\}. \quad (17)$$

А ожидаемое количество оставшихся порожних вагонеток на погрузочном пункте спустя ожидаемое время движения к нему $M\{\tau_i\}$ соответственно

$$M\{b_i(\tau_i) / S_i^{(0)}\} = b_i(0) - M\{\Delta b_i(\tau_i) / S_i^{(0)}\}. \quad (18)$$

Здесь λ_i - интенсивность погрузки вагонеток на i -м погрузочном пункте в интервале безотказной работы;

$P_i\{S_i^{(0)}(\tau_i) / S_i^{(0)}\}$ - условная вероятность безотказной работы i -го погрузочного пункта в течение времени $M\{\tau_i\}$ при условии, что в момент времени $t = 0$ он находился в рабочем состоянии $S_i^{(0)}$.

Если же в момент $t = 0$ погрузочный пункт находился в состоянии простоя $S_i^{(0)}$, то соотношения получаются аналогично (17, 18) с той разницей, что подставляется соответствующая условная вероятность пребывания погрузочного пункта в состоянии простоя - $P_i\{S_i^{(0)}(\tau_i) / S_i^{(0)}\}$.

По аналогии с математическим описанием i -го погрузочного пункта получена система дифференциальных уравнений в матричной форме, описывающая функционирование подсистемы погрузочных пунктов, и далее матрицы соотношений вида (17, 18), составляющие основу для вычисления ожидаемого значения критерия оптимальности (9) при различных стратегиях управления.

ОПТИМАЛЬНОЕ ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДЗЕМНЫМ ЛОКОМОТИВНЫМ ТРАНСПОРТОМ

В четвертой главе производится математическая постановка задачи управления и ее решение. Рассматривается многоэтапный производственный процесс распределения транспортных ресурсов при оперативном управлении подземным транспортом.

Имеется один пункт распределения ресурсов (околотвольный двор) и N пунктов потребления (погрузочные пункты), имеющие фиксированную вместимость по количеству порожних вагонеток для временного хранения груза.

В околотвольном дворе и на погрузочных пунктах сосредоточено некоторое начальное количество порожних вагонеток. Потребление порожних вагонеток на погрузочных пунктах происходит стохастически дискретными единичными порциями Δb_i^n . Задача управления заключается в поддержании начального количества ресурсов в пунктах потребления путем распределения между ними вагонеток, имеющихся в пункте распределения. Поступление порожних вагонеток на погрузочные пункты происходит крупными дискретными порциями (составами) Δa_i^n также через случайные интервалы времени.

Погруженные вагонетки поступают на околотвольный двор и после разгрузки вновь возвращаются на распределение в том же количестве. Поступление их происходит также стохастически единичными порциями Δa_i^n . Одновременно с этим происходит распределение и убытие порожних вагонеток на погрузочные пункты крупными порциями Δa_i^n . Уравнения материального баланса имеют вид:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta a_{ij}^n = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta b_{ij}^n \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta b_{ij}^n = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta a_{ij}^n,$$

где m — общее количество шагов управления за все время протекания процесса.

В соответствии с технологическими особенностями транспортного процесса на всякую возможную стратегию управления наложены ограничения типа равенств и неравенств на запасы ресурсов в околотвольном дворе, погрузочных пунктах по их вместимости и в целом в системе, ограничения на транспортные каналы по количеству локомотивов в системе и величине вагонеток в составе, ограничения на распределение ресурсов (выбор только одной стратегии управления на каждом шаге, одинаковые порции распределения вагонеток).

Вследствие ограниченного количества вагонеток в системе, стохастического характера процессов поступления, потребления и транспортирования ресурсов и перечисленных ограничений на каждом шаге возникает столкновение интересов между погрузочными пунктами. Конфликтная ситуация выражается в том, что суммарный ожидаемый (за время транспортного запаздывания) спрос погрузочных пунктов на порожние вагонетки и локомотивы превышает их фактическое количество в околотвольном дворе на j -м шаге, т.е.

$$\sum_{i=1}^N M\{\Delta b_{ij}(\tau_i)\} > a_j, \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N M\{K_{ij}(\tau_i)\} > K_{0j}.$$

Для решения задачи используется априорная информация сог-

ласно правой части выражения (17) об интенсивности поступления угля из лав λ_i и о среднем времени движения локомотивов $M\{T_i\}$, полученная в результате предварительного обследования объекта, и рабочая информация о количестве порожних вагонеток на погрузочных пунктах и околоствольном дворе, о местонахождении локомотивов согласно векторам (I1, I2, I3), получаемая от системы сбора информации.

Задача выбора оптимальной стратегии диспетчерского управления состоит в поддержании условий координации подземного транспорта с добычными участками, что выражается в минимизации функционала математического ожидания среднеквадратичного отклонения (9) по области, заданной постановкой задачи, т.е.

$$W_m^* = \min_{y_i \in Y} M \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i^y - d_i)^2}{N}} \right) \right\}. \quad (21)$$

При этом общее количество шагов управления или область конечных состояний системы неизвестны, поскольку транспортный процесс осуществляется неопределенно долгое время в течение всего периода функционирования шахты.

Исходя из постановки, произведена классификация задачи оперативного управления подземным транспортом как задачи распределения ресурсов и отмечены следующие ее особенности: дискретность, многошаговость, многомерность, наличие стохастически взаимодействующих подсистем нижнего уровня, неопределенное общее количество шагов, наличие стохастического запаздывания, квадратичного критерия, ограничений типа равенств и неравенств, многократное использование ресурсов.

Анализируется возможность решения сформулированной задачи

некоторыми наиболее известными методами оптимизации: линейным и нелинейным программированием, вариационными методами, на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина, сетевыми методами, методами теории массового обслуживания и динамическим программированием. Указаны препятствия и трудности их применения. Делается вывод, что метод динамического программирования по своей природе и возможностям наиболее приемлем для решения задачи оперативного управления подземным транспортом. Однако трудности, связанные с наличием стохастически взаимодействующих подсистем нижнего уровня, многомерностью задачи, с наличием стохастического запаздывания, с неопределенной длительностью процесса также оказываются весьма существенными и при использовании метода динамического программирования в его классическом виде. Решение этой задачи оказывается возможным, если в сочетании с методом использовать некоторые естественные свойства транспортного процесса, специальные приемы и ограничения.

С этой целью формулируется ряд требований к сетке фазового пространства, в соответствии с которыми производится расчленение транспортного процесса на шаги. Вследствие циклического характера стохастически взаимодействующих транспортных подсистем шаговая ситуация оценивается моментом завершения производственных циклов во всех трех подсистемах, обеспечивающих условия для диспетчерского воздействия, что выражается системой из трех неравенств

$$\begin{cases} |a_{j+1} - a_j| \geq a^* \\ |K_{0j+1} - K_{0j}| \geq K_0^* \\ \left| \sum_{i=1}^n b_i^* - \sum_{j=1}^n b_{ij} \right| \geq \Delta b^* \end{cases} \quad (22)$$

Константы a^* , K_0^* , b^* выражают размер сетки и выбираются исходя из назначения транспортных подсистем и технико-экономических ограничений. Смысл системы неравенств (22) состоит в том, что диспетчерское воздействие может быть произведено в том случае, если в околоствольном дворе имеется свободный состав порожних вагонеток a^* , свободный локомотив K_0^* и у погрузочных пунктов возник спрос на порожние вагонетки b^* . Совпадение этих трех условий соответствует одному узлу сетки (момент отправления состава).

Таким образом, вместо применения многомерной заранее фиксированной сетки в пространстве переменных вектора состояния (IO) имеем одномерную следующую сетку, физически реализуемые узлы которой автоматически отыскиваются в ходе транспортного процесса. Этим самым преодолеваются две первые из перечисленных трудностей. Наличие стохастического запаздывания приводит в данном случае к возникновению последствий. Для устранения его влияния накладывается ограничение, согласно которому при выборе стратегии на каждом j -м шаге из рассмотрения исключаются те стратегии, которые еще не завершены, т.е. на данном шаге эти стратегии считаются неконкурентноспособными.

Показано, что решение задачи оперативного управления подземным транспортом можно свести к оптимизации процесса на каждом шаге в отдельности независимо от общего количества шагов. Основанием для этого служат следующие свойства процесса: в соответствии со смыслом критерия оптимальности (21) точка оптимума на каждом шаге совпадает с глобальным оптимумом на всем протяжении процесса; транспортные ресурсы циркулируют в системе

по лепестковой замкнутой схеме, вследствие чего не может возникнуть ситуации, когда из-за нехватки ресурсов в конце процесса система терпит убытки, превосходящие полученный ранее доход; разложение процесса на шаги произведено по физически реализуемым состояниям, соответствующим моментам возвращения в пункт распределения порции ресурсов, равной затраченной на предыдущем шаге, т.е. система на каждом шаге по наличию ресурсов в пункте распределения находится в одинаковых условиях. Вследствие перечисленных свойств транспортного процесса и ограничений в системе не возникает столкновения интересов между этапами управления, а только между стратегиями на каждом шаге. Таким образом, нет необходимости тянуть всю цепочку условных оптимальных управлений от конца к началу и основное функциональное уравнение динамического программирования преобразовывается к виду

$$W_m^*(Q_1) = \min_{y_1 \in Y} M\{w_1(Q_1, y_{11})\} + \dots + \min_{y_m \in Y} M\{w_m(Q_m, y_{m1})\}, \quad (23)$$

где Q_1, Q_m - известные векторы состояния системы на первом и m шагах.

Оптимальное управление на j -м шаге находится из выражения

$$w_j^*(Q_j) = \min \left\{ \begin{array}{l} M\{w_j(Q_j, y_{0j})\} \\ M\{w_j(Q_j, y_{1j})\} \\ \dots \\ M\{w_j(Q_j, y_{nj})\} \end{array} \right\}, \quad (24)$$

где y_0 - нулевая стратегия (никуда не посылать состав); y_i - i -я стратегия (послать состав на i -й участок).

Произведена геометрическая интерпретация выбора оптимальной траектории в фазовом пространстве. Разработан сравнительно простой алгоритм диспетчерского управления подземным транспортом, перерабатывающий входную априорную и рабочую информацию о процессе в управляющие решения о выборе оптимального маршрута локомотива и времени отправления состава. Получено численное решение задачи.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Поставлены следующие задачи моделирования: проверка методом статистических испытаний эффективности разработанного алгоритма управления подземным транспортом, выработка технических требований к управляющему вычислительному устройству, определение оптимального неснижаемого запаса порожняка на погрузочных пунктах, сравнение критериев оптимальности потерь добычи и среднеквадратического отклонения, отработка принципов и приемов моделирования сложной системы в целом и отдельных элементов технологических процессов.

Разработана и запрограммирована на ЭЦВМ "Урал-4" математическая модель подземного транспорта типа Монте-Карло, имитирующая реальную шахту им. А.Ф. Засялько (Донбасс).

В основу модели положены алгоритмы функционирования и управления подземным транспортом, конкретные данные транспортной схемы указанной шахты и статистические данные о поступлении угля из лав, разгрузке составов в руддворе и времени движения локомотивов. Модель включает в себя следующие блоки: блок времени, погрузки вагонеток по погрузочным пунктам и разгрузки в руддворе, блок перемещения электровозов и блок диспетчера. В модели применены

генераторы случайных чисел. В главе приведено подробное описание перечисленных алгоритмов.

Произведен расчет ошибки моделирования при известном числе испытаний. В течение моделируемых 760 рабочих смен диспетчер произвел 11 530 посылок по маршрутам, что составило ошибку моделирования 0,4 %. Подсчитанные в результате моделирования показатели, оценивающие эффективность алгоритма управления, представлены в таблице. Для сравнения приведены фактические значения этих показателей по шахте за тот же период сбора статистики, что и в модели

Показатели	Модель шахты	Фактически по шахте
Потери добычи из-за транспорта	2 %	10 %
Коэффициент использования электровозов	0,74	0,31
Вагонеточный парк	311	600
Локомотивный парк	4	8

Результаты испытаний свидетельствуют об оптимальных свойствах алгоритма диспетчерского управления подземным транспортом

Проведены испытания на модели в соответствии с третьей и четвертой задачами моделирования. Получены кривые зависимости потерь добычи от величины неснижаемого запаса порожняка на погрузочных пунктах и найдено оптимальное их соотношение. Сняты сравнительные экспериментальные зависимости критериев потерь добычи и среднеквадратического отклонения от одного и того же аргумента. Произведен их анализ и подтверждена адекватность критериев. Отработаны приемы моделирования нескольких параллельно протекающих процессов, перемещения электровозов и графиков погрузки и разгрузки вагонеток.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Результаты проведенных исследований были использованы для построения автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления подземным транспортом на базе средств вычислительной техники, автоматики и телемеханики.

В соответствии с назначением системы диспетчеру подземного транспорта представляется контролируемая информация о наличии порожних и груженых вагонеток на порожних пунктах и околоствольном дворе, места нахождения локомотивов и сигналы о задержке их, а также советы по управлению о времени отправления и маршруте следования локомотивов. Статистическая информация печатается на автоматическом печатающем устройстве.

На основании цифрового моделирования подземного транспорта и информационных характеристик объекта в главе сформулированы технические требования и произведен выбор управляющей машины УМ-ИНХ. На базе этой машины в Институте горной механики и технической кибернетики им. М. М. Федорова разработан и изготовлен экспериментальный образец информатора - советчика диспетчера подземного транспорта, предназначенный для проведения в 1968 г. промышленных испытаний на шахте им. А. Ф. Засялько треста "Куйбышевуголь". В качестве устройств телемеханики применена разработанная в том же институте аппаратура ТВЧС-66, использующая в качестве канала связи силовую сеть шахты. Для счета вагонеток использованы весовые гидравлические датчики.

С учетом особенностей устройств системы и алгоритма управления в главе получено математическое обеспечение системы. Разработана структура сообщений и установлены логические зависимости

между элементами сообщений в символах алгебры логики.

Техническая документация на проектирование автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления подземным транспортом в общем комплексе на базе серийно выпускаемых машин и устройств автоматики и телемеханики передана Луганскому филиалу института "Гипроуглеавтоматизация" и заложена в проект автоматизации образцово-показательной шахты "Велико-Мостовская" № 8 комбината "Укрзападуголь".

В главе произведен расчет предполагаемого экономического эффекта от внедрения системы на шахтах комбината "Донецкуголь". Основными источниками экономического эффекта являются: повышение нагрузки на забой за счет снижения непроизводительных простоев из-за отсутствия порожних вагонеток, а также экономия по себестоимости, возникающая в результате уменьшения "условно-постоянных" расходов. Предполагаемый экономический эффект составит: прирост добычи угля - 2 194 000 т/год; снижение себестоимости 1 т угля - 2 % или 0,29 руб; срок окупаемости - 9 месяцев; снижение трудоемкости работ - 2 %; повышение производительности труда - 1,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения настоящей работы проведено комплексное исследование системы оперативно-диспетчерского управления подземным локомотивным транспортом угольной шахты с позиций теории управления сложными системами. При этом, получены следующие основные результаты:

1/ исследована система управления подземным транспортом как составная часть единой системы управления всей шахты :

выявлены иерархическая структура системы управления подземным транспортом, материальные и информационные потоки, характер взаимодействия и связи между подсистемами, установлена зависимость критерия диспетчерского управления подземным транспортом с глобальным стоимостным критерием управления шахтой в целом;

2/ исследованы динамические свойства системы управления подземным транспортом как сложной системы: выявлено характерное свойство периодичности, на основе которого предложен способ выбора рационального числа уровней управления, сформулирован в качестве гипотезы принцип оптимальности в сложных системах управления по аналогии с методом динамического программирования, определены функциональные уравнения и предложен алгоритм их решения;

3/ получено математическое описание транспортного процесса на уровне диспетчерского управления им с учетом стохастического характера функционирования транспорта и сопряженных с ним звеньев;

4/ разработана математическая модель оперативного диспетчерского управления подземным локомотивным транспортом, отражающая характерные особенности транспортного процесса, стохастический характер, большие размеры и сложные структурные связи. Предложен метод оптимизации диспетчерского управления, представляющий собой комбинацию основных положений метода динамического программирования, эмпирических свойств транспортного процесса и специальных приемов и ограничений. Способ расчленения сложного процесса на шаги и методические приемы сочетания различных методов могут быть применены для синтеза других систем этого класса;

5/ получен сравнительно простой алгоритм оперативного диспетчерского управления подземным локомотивным транспортом, произведены

статистические испытания его на цифровой математической модели, имитирующей реальную шахту им. А.Ф. Засядько / Донбасс / и подтверждены оптимальные свойства алгоритма. Некоторые разработанные приемы моделирования могут быть применены для имитации других процессов;

6/ произведено внедрение результатов исследования: определены научно-обоснованные технические требования и математическое обеспечение автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления подземным локомотивным транспортом, реализуемой в экспериментальном образце информатора-советчика, разработанного и изготовленного в ИГМ ТК им. М.М. Федорова и в проекте автоматизации образцово-показательной шахты "Велико-Мостовская" № 8 треста "Червоноградуголь" комбината "Укрзападуголь", разрабатываемого институтом ЛФГУА.

Отдельные разделы работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. IV Всесоюзное совещание по технической кибернетике / октябрь 1968 г., г. Тбилиси /.
2. Киевский республиканский семинар Научного совета по кибернетике АН УССР / ноябрь 1966 г., г. Киев /.
3. Семинар МДНТП по применению вычислительной техники для автоматизации производственных процессов / февраль 1965 г., г. Москва /.
4. Межвузовская конференция по разработке научных основ создания высокопроизводительных автоматизированных шахт / декабрь 1966 г., Московский горный институт /.
5. Межвузовская конференция по вопросам организации и управления горными предприятиями / март 1968 г., МГИ /.
6. I-я Всесоюзная конференция по экономической кибернетике / октябрь 1966 г., г. Батуми /.

Кроме того, работа докладывалась на двух областных конференциях молодых ученых, семинарах ИГМТК им. М.М. Федорова, а также делегации специалистов из института автоматизации и механизации /ЧССР/.

По теме диссертации опубликованы девять печатных работ:

1. Черкашин И.А. / соавтор Поляков В.Г./, Управление подземным шахтным транспортом с помощью электронно-цифровой вычислительной машины, в сб. "Вычислительная техника", МДНТП, М., 1965.

2. Черкашин И.А., Математическая модель /функционирования и управления подземным локомотивным транспортом на ЭЦВМ/, журн. "Горные машины и автоматика", № 8, 1966.

3. Черкашин И.А., Алгоритмирование подземного локомотивного транспорта угольной шахты, журн. "Горные машины и автоматика", № 12, 1966.

4. Черкашин И.А., /соавтор Федоренко М.А./, Индетерминированная модель стохастического процесса подземного локомотивного транспорта, журн. "Автоматика", № 6, 1966.

5. Черкашин И.А. /соавторы Гольдин М.А., Поляков В.Г., Боронин В.Ф./, Угольная шахта как сложная система с иерархической структурой управления, Тезисы докладов научно-технической межвузовской конференции "Организация и управление горными предприятиями", МГИ, 1968.

6. Черкашин И.А., Динамика функционирования уровней иерархии в единой системе управления угольной шахты, Тезисы докладов научно-технической межвузовской конференции "Организация и управление горными предприятиями", МГИ, М., 1968.

7. Черкашин И.А. /соавторы М.А. Гольдин и др. /, Некоторые вопросы кибернетизации угольных шахт, Тезисы докладов научно-технической межвузовской конференции "Организация и управление горными предприятиями", МГИ, 1968.

8. Черкашин И.А. /соавторы Скогорев В.А., Поляков В.Г., Шульга Ю.Н./, Совершенствование транспортного обслуживания на базе применения экономико-математических методов, в сб. "Вопросы научной организации труда в промышленности", Институт экономики АН УССР, К., 1968.

9. Черкашин И.А., Оценка методов управления подземным транспортом угольной шахты, Тезисы докладов 1-й молодежной научно-технической конференции, Донецк, 1966.